



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ALTAMIRA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO

OLGANETH MOREIRA DE OLIVEIRA

Microplásticos em solos agrícolas: Panorama cienciométrico global e um estudo de caso em sistema agroflorestal na Amazônia Oriental

ALTAMIRA/ PA

AGOSTO/2026



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ALTAMIRA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO

OLGANETH MOREIRA DE OLIVEIRA

Microplásticos em solos agrícolas: Panorama cienciométrico global e um estudo de caso em sistema agroflorestal na Amazônia Oriental

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Verônica Regina Lobato de Oliveira-Bahia

ALTAMIRA/ PA
AGOSTO/2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M835m Moreira de Oliveira, Olganeth.
 Microplásticos em solos agrícolas: Panorama cienciométrico
 global e um estudo de caso em sistema agroflorestal na Amazônia
 Oriental / Olganeth Moreira de Oliveira. — 2026.
 101 f. : il. color.
- Orientador(a): Profª. Dra. Verônica Regina Lobato de Oliveira -
 Bahia
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Campus Universitário de Altamira, Programa de Pós-Graduação
 em Biodiversidade e Conservação, Altamira, 2026.
1. Microplásticos; . 2. Solo agrícola; . 3. Análise
 cienciométrica; . 4. Sistema Agroflorestal; . 5. Amazônia.. I.
 Título.

CDD 631.47811

OLGANETH MOREIRA DE OLIVEIRA

Microplásticos em solos agrícolas: Panorama cienciométrico global e um estudo de caso em sistema agroflorestal na Amazônia Oriental

Orientadora: Dr^a. Verônica Regina Lobato de Oliveira-Bahia
Instituição: Universidade Federal do Pará

Membro Interno: Dr. Miqueias Freitas Calvi (Avaliador Interno)
Instituição: Universidade Federal do Pará.
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1925851965991165>

Membro Interno: Dr. Emil José Hernandez Ruz – (Avaliador Interno)
Instituição: Universidade Federal do Pará
Currículo Lattes <http://lattes.cnpq.br/9304799439158425>

Membro Externo: Dr^a. Tamiris Pegado de Souza e Silva (Avaliadora Externa)
Instituição: Universidade Federal do Ceará
Currículo Lattes: : <http://lattes.cnpq.br/0944107104953197>

Membro Externo: Dr^a. Juliana Caroline Dias Pantoja (Avaliadora Externa)
Instituição: Universidade Federal do Pará
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1848773133977370>

Membro Externo: Dr^a. Brenda Stefany dos Santos Braga (Avaliadora Externa)
Instituição: Universidade Federal do Pará
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4220684508094046>

AGRADECIMENTOS:

A Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele não seria possível concluir essa jornada.

A meus pais Izaltino Barbosa de Oliveira e Maria Olga Moreira de Oliveira, pelo exemplo de pessoas que são e por me encorajarem sempre.

A meus irmãos Gracinete e Dorival, sobrinhos Lucas, Gustavo, Izabela e Filipe pela força e carinho.

A meu esposo Adriano e minha filha Isadora Maria pelo incondicional apoio, paciência e incentivo.

Aos colegas de mestrado por nunca largarem a mão de ninguém.

Ao Programa de Pós-Graduação Biodiversidade e Conservação- PPGBC, pela oportunidade e assistência.

A CAPES pelo incentivo financeiro.

A minha Orientadora Prof^a. Dr^a. Verônica Bahia, pela compreensão.

A equipe do LAMMOA (Adrian, Fabrielle, Maria Luiza, Maria Gabriela, Sandra, Flávio, Matheus) pelo acolhimento e ensinamentos.

Ao Dr. Fernando Mendes pela confiança cedida.

Ao Prof. Dr. Luiz Mauro pelas instruções e bons conselhos.

A Instituições (UFPA, CEPLAC, EMBRAPA, IPEN) pela parceria e apoio.

A eles dedico inteiramente este trabalho.

“Esforce-se e tenha coragem! Não se apavore, nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.” (Josué 1:9)

RESUMO

Os microplásticos (MPs) têm se destacado como contaminantes emergentes de preocupação global devido à sua ampla ocorrência em ambientes aquáticos e terrestres. Apesar do crescente número de estudos sobre o tema, as pesquisas têm se concentrado predominantemente nos ecossistemas aquáticos, enquanto os solos agrícolas permanecem comparativamente pouco explorados. A agricultura depende do solo como recurso fundamental para a produção de alimentos e envolve o uso de materiais plásticos, fertilizantes, sistemas de irrigação, adubos orgânicos e outros insumos agrícolas que podem contribuir para a introdução e o acúmulo de microplásticos no solo. Em elevadas concentrações, esses contaminantes podem afetar a estrutura do solo, a biota associada e o desenvolvimento das plantas. Nesse contexto, o presente estudo combinou análises cienciométricas e investigações de campo para avaliar as tendências das pesquisas sobre microplásticos em solos agrícolas e verificar sua ocorrência em solos de sistemas agroflorestais e áreas de floresta na Amazônia. A análise cienciométrica revelou um crescimento exponencial das publicações científicas após 2019, com pesquisas concentradas principalmente na China e predominantemente voltadas para sistemas agrícolas intensivos e extensivos. Os resultados também demonstraram que os microplásticos podem comprometer a qualidade do solo ao alterar propriedades físico-químicas e afetar negativamente o desenvolvimento das plantas e dos organismos associados ao solo. Os dados de campo obtidos na Estação de Recursos Genéticos José Haroldo (ERJOH) confirmaram a presença de microplásticos tanto em solos de sistemas agroflorestais quanto em áreas de floresta. As fibras de coloração azul e transparente foram as formas predominantes identificadas. A espectroscopia Raman revelou a presença de diferentes tipos de polímeros, além de corantes e pigmentos industriais comumente associados a materiais plásticos, têxteis, papel, tubulações, embalagens e outros produtos de uso industrial. Os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre a contaminação por microplásticos em solos amazônicos, evidenciam a necessidade de novas pesquisas envolvendo diferentes sistemas de produção e classes de solo, a fim de compreender os fatores que influenciam o acúmulo e o comportamento desses contaminantes em ecossistemas terrestres.

Palavras Chaves: Microplásticos; Solo agrícola; Análise cienciométrica; Sistema Agroflorestal; Amazônia.

ABSTRACT

Microplastics (MPs) have become emerging contaminants of global concern due to their widespread occurrence in aquatic and terrestrial environments. Despite the growing number of studies on this topic, research has predominantly focused on aquatic ecosystems, while agricultural soils remain comparatively understudied. Agriculture relies heavily on soil as a fundamental resource for food production and involves the use of plastic materials, fertilizers, irrigation systems, organic amendments, and other agricultural inputs that may contribute to the introduction and accumulation of microplastics in soils. Elevated concentrations of these contaminants can affect soil structure, soil biota, and plant development. In this context, the present study combined scientometric analysis and field investigations to evaluate research trends on microplastics in agricultural soils and assess their occurrence in agroforestry and forest soils in the Amazon region. The scientometric analysis revealed an exponential increase in scientific publications after 2019, with research concentrated mainly in China and predominantly focused on intensive and extensive agricultural systems. The results also demonstrated that microplastics can negatively affect soil quality by altering physicochemical properties and impacting plant development and soil-associated organisms. Field data collected at the José Haroldo Genetic Resources Station (ERJOH) confirmed the presence of microplastics in both agroforestry and forest soils. Blue and transparent fibers were the predominant forms identified. Raman spectroscopy revealed the presence of different polymer types, as well as dyes and industrial pigments commonly associated with products such as plastics, textiles, paper, pipes, packaging materials, and industry items. These findings contribute to the understanding of microplastic contamination in Amazonian soils and highlight the need for further studies addressing different production systems and soil types to better understand the factors influencing microplastic accumulation and behavior in terrestrial ecosystems.

Keywords: Microplastics; Agricultural soils; Scientometric analysis; Agroforestry systems; Amazon.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1- Mapa solos do Brasil	15
--------------------------------------	----

CAPITULO I

Figure 1 – Fluxograma ilustrando o processo de seleção, adaptado de Jamil et al 2024 ..	27
---	----

Figure 2: Tendência anual de publicações sobre microplásticos e solo agrícola	29
---	----

Figure 3: Autores com o maior número de artigos publicados em periódicos internacionais	30
--	----

Figure 4: Periódicos com o maior número de publicações sobre microplásticos em solo agrícola	31
---	----

Figure 5. Frequência das principais culturas e sistemas de produção relatados	32
--	----

Figure 6. Práticas de gestão relatados com maior frequência nas publicações selecionadas	34
---	----

Figure 7. Frequência dos tipos de solos relatados nas publicações selecionadas	35
--	----

Figure 8. Efeitos físicos e químicos no solo com maior frequência nas publicações selecionadas	37
---	----

Figure 9. Principais tipos de polímeros, formas e cores de microplásticos relatados nas publicações selecionadas	39
---	----

CAPITULO II

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo	51
---	----

Figura2. Áreas de coleta. (A) Floresta. (B) Sistema Agroflorestal SAF	52
---	----

Figura3.Presença de Partículas de MPs no SAF e floresta(mata).	55
--	----

Figura 4- Cor das partículas encontradas nas áreas.	56
--	----

Figura 5- Formas das Partículas: (a, c, d) - fibras; (b, e, f) fragmentos.	56
---	----

Figura 6- Morfotipos das partículas encontradas por área.	57
--	----

Figura 7 – Classificação das amostras pela espectroscopia Raman.	58
---	----

Figura 8- Concentração da Partículas SAF e floresta (Mata)	59
--	----

Figura 9- Granulométrica do solo entre as áreas de mata e SAF	60
---	----

Figura 10- pH do solo nas áreas SAF e Floresta	60
--	----

TABELA

Tabela 1- Caracterização das partículas encontradas nas áreas de estudos	
--	--

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1 PLÁSTICO E MICROPLÁSTICO	12
1.2 SOLO E MICROPLÁSTICO	13
1.3 SOLOS AMAZÔNICOS	14
1.4 SISTEMA AGROFLORESTAL	16
2. JUSTIFICATIVA	17
3. OBJETIVO	18
3.1 OBJETIVO GERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4. REFERÊNCIAS	19
CAPÍTULO I	23
RESUMO	24
1- INTRODUÇÃO	25
2- MATERIAL E MÉTODOS	26
2.1- ESTRATÉGIA DE BUSCA E METODOLOGIA DE REVISÃO	26
2.2 -ANÁLISE CIENCIOMETRICA E SISTEMÁTICA DE DADOS	27
3- RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4- CONCLUSÃO	40
5- REFERÊNCIAS	42
CAPÍTULO II	47
RESUMO	48
1- INTRODUÇÃO	49
2- MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1-ÁREA DE ESTUDO	51
2.2- COLETA DAS AMOSTRAS	52
2.3- TRATAMENTO E SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	53
2.4- IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS	53
2.5- ANÁLISE NO ESPECTRO RAMAN	53
2.6- ANÁLISES DO PH E GRANULOMETRIA DO SOLO	54
2.7- CONTROLE DE CONTAMINAÇÃO	54
2.8- ANÁLISE ESTATÍSTICA	54
3- RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4- CONCLUSÃO	64
5- REFERÊNCIAS	65
ANEXOS	71

1. INTRODUÇÃO GERAL

A poluição plástica é um dos maiores desafios da atualidade. Mais de 400 milhões de toneladas de plástico são produzidas globalmente por ano e, sem descarte adequado, vem poluindo ambientes terrestres e aquáticos (Chia et al. 2022). Um subproduto de resíduos plásticos são os microplásticos (partículas de tamanho entre 1µm a 5 mm), que estão presentes em todos os ecossistemas (Fu, et al. 2020). Os microplásticos possuem uma origem primária quando produzidos para um determinado fim, como a indústria de cosméticos, e uma origem secundária, decorrente da decomposição fotolítica, mecânica e degradação biológica (Cole et al. 2011). A maioria dos estudos que avaliam microplásticos se concentraram em ambientes marinhos, enquanto sistemas terrestres são negligenciados, apesar de ser a maior fonte de microplásticos (Qi et al. 2020).

A quantidade de plástico descartado em ambientes terrestres é amplamente desconhecida; no entanto, existem algumas estimativas que mostram que aproximadamente 32% dos resíduos plásticos estão direcionados ao ambiente do solo (Qi et al. 2020). Solos agrícolas e urbanos são considerados “pontos críticos” de plásticos em ecossistemas terrestres, pois representam um grande reservatório de microplásticos, com muitas fontes diferentes, tais como: deposição atmosférica, cobertura plástica, irrigação que utiliza água de rio contaminada, aplicação de fertilizantes orgânicos, aplicação de lodo de esgoto, inundações e lixo (Huang et al. 2020, Qi et al. 2020, Van den Berg et al. 2020, Wang et al. 2020).

Na Amazônia, a agricultura ocupa 2,3% da área do bioma, tendo como principais atividades a produção em larga escala (como no caso da soja) e a utilização de sistemas agroflorestais (como no caso do cacau, dendê e açaí) (Koch et al. 2020). No estado do Pará, a agricultura é responsável por 40% da economia, e a cultura que se destaca em produtividade é a lavoura do cacau, tendo produzido 145 mil toneladas na safra 2021/2022, com uma produtividade média de 977 quilos por hectare, perdendo apenas para o açaí, mandioca e soja (Koch et al. 2020). A maior parte do cultivo do cacau no Pará – cerca de 70% da produção – é feito por agricultores familiares e em sistemas agroflorestais, os quais são reconhecidos como modelos produtivos mais sustentáveis e de menor impacto ambiental. Contudo, os sistemas de cultivo de baixo impacto ou de larga escala, causam certos impactos, contribuindo para a introdução e contaminação de microplásticos nos solos. Assim, medidas de manejo que visem minimizar a presença dos microplásticos nesses ambientes contribuiriam para melhoria da saúde ambiental (He et al. 2018; Huang et al. 2021). Há, portanto, a necessidade premente de avaliar a presença desse contaminante em solo de cultivos, avançar em novas descobertas e propor novas medidas de manejo do uso do solo agrícola.

1.1 PLÁSTICOS E MICROPLÁSTICOS

Os plásticos referem-se a um grupo de materiais sintéticos feitos de hidrocarbonetos. Eles são formados por polimerização: uma série de reações químicas em matérias-primas orgânicas (contendo carbono), principalmente gás natural e petróleo bruto (Montenegro et al. 2020). São materiais poliméricos sintéticos leves, impermeáveis e duráveis, que podem ser formulados para serem rígidos ou flexíveis, transparentes ou coloridos, e apresentam baixo custo (Montagner et al. 2021).

A presença desses poluentes passou despercebida ao longo dos anos, sendo o nosso planeta exposto ao plástico há quase um século (Pompêo, 2022). O plástico não desaparece no meio ambiente, sua decomposição, na verdade, consiste em um processo de sucessivas fragmentações. Tais fragmentos podem ser classificados em uma escala decrescente de tamanho, a saber: macrolásticos (>25 mm), mesoplásticos (5-25 mm), microplásticos (5 mm – 1 µm) e nanoplásticos (<1 µm de diâmetro) (Gesamp, 2016; Lechthaler et al. 2020). A fragmentação do plástico no meio ambiente acontece devido à interação com fatores bióticos e abióticos, tais como: radiação UV, presença de oxigênio, variações de temperatura, umidade, ação das ondas e exposição aos microrganismos (Cole et al. 2011).

Os microplásticos são frequentemente agrupados em um amplo conjunto, mas, na verdade, contêm uma variedade complexa de características físicas diferentes, tais como: composição química, tipos, tamanhos, formas e densidades (Waldschläger, & Schüttrumpf, 2019; Onink, et al. 2022; Stride 2024). Estas partículas microscópicas têm o potencial de impactar praticamente todos os níveis da cadeia alimentar, incluindo a espécie humana, e a exposição aos microplásticos pode resultar em uma série de efeitos adversos, incluindo contaminação química e até danos físicos (Kin & Na, 2020; Yuan, Nag & Cummins, 2022). Pesquisas vem mostrando que os microplásticos podem servir como “cavalo de Tróia”, por atuarem como transportadores de diversos xenobióticos (O'Donovan et al. 2018), patógenos (Gkoutselis et al. 2021), além de poder serem ingeridos e bioacumular em organismos aquáticos ou terrestres (Miller et al. 2020).

Essas micropartículas possuem uma origem primária quando produzidas com uma determinada finalidade, como a indústria de cosméticos, para compor a formulação de produtos de higiene pessoal, a exemplo de esfoliantes faciais e cremes dentais (Napper et al. 2015). Podem, também, ter uma origem secundária, decorrente da fragmentação e decomposição fotolítica, mecânica e degradação biológica. O processo de fragmentação varia de forma combinada de acordo com os fatores ambientais, o tipo de polímero e os aditivos

presentes no material (Cole et al. 2011, Akdogan e Guven, 2019). Os polímeros microplásticos mais produzidos são dos tipos de polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e cloreto de polivinila (PVC) (Chen et al. 2019; Nguyen et al. 2020).

Estes resíduos de microplásticos crescem exponencialmente em todo o mundo. Espera-se que os microplásticos secundários continuem a se acumular de forma desenfreada no meio ambiente (Cole et al. 2014). Recentemente, o ambiente terrestre foi reconhecido como a verdadeira fonte e sumidouro de plásticos, especialmente solos agrícolas (Pérez-Reverón et al. 2022). A ocorrência, abundância, distribuição e fontes de microplásticos em solos agrícolas são, portanto, cruciais para avaliar os possíveis impactos e medidas corretivas (Islam et al. 2024).

1.2 - SOLO E MICROPLÁSTICO

Os solos agrícolas são considerados “pontos críticos” de plásticos em ecossistemas terrestres, pois representam um grande reservatório de microplásticos, oriundos de muitas fontes diferentes, tais como: deposição atmosférica, cobertura plástica, água de rio contaminada, aplicação de fertilizantes orgânicos e aplicação de lodo de esgoto (Huang et al. 2020, Qi et al. 2020, Van den Berg et al. 2020, Wang et al. 2020). Os microplásticos, ao atingirem o solo, podem acumular-se, migrar, difundir-se no ambiente ou até interagir com a biota do solo, como, por exemplo, minhocas ou colêmbolos, que são capazes de transferir detritos plásticos na cadeia alimentar terrestre (Huerta Lwanga et al. 2017). Além de prejudicar a biota, a presença destas partículas pode alterar as propriedades físico-químicas e biológicas do solo (Rillig et al. 2017).

As propriedades físicas do solo podem ser afetadas pela presença dos microplásticos. Tais contaminantes podem produzir mudanças na densidade do solo, porosidade, formação de agregados e disponibilidade de distribuição de água (Pérez-Reverón et al. 2022). Níveis altos de microplásticos podem afetar a química do solo, alterando a degradação da matéria orgânica (Souza Machado et al. 2019). Estudos têm mostrado que os microplásticos contribuem para a alteração do pH do solo, densidade aparente ou retenção de água, afetando assim o crescimento das plantas (Souza Machado, et al. 2019, Shafea et al. 2023). Podem, também, liberar aditivos químicos, como compostos desreguladores endócrinos (bisfenol ou ftalatos) (He 2018), além de serem capazes de transportar diversas substâncias tóxicas em sua superfície hidrofóbica, como por exemplo, metais potencialmente tóxicos e antibióticos, agindo como vetores de contaminantes químicos.

1.3 - SOLOS AMAZÔNICOS

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) define o solo uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões do nosso planeta, contêm matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas (Santos, 2018).

O SiBCS é o sistema taxonômico de classificação dos solos no Brasil, do qual classificou os solos no primeiro nível categórico em 13 ordens as quais são: Organossolos (O), Neossolos (R), Vertissolos (V), Espodossolos (E), Planossolos (S), Gleissolos (G), Latossolos (L), Chernossolos (M), Cambissolos (C), Plintossolos (F), Luvisolos (T), Nitossolos (N), Argissolos (P) (Lima, 2022). Os solos mais comuns do Brasil e da região Amazônica são os Latossolos e Argissolos, que ocupam aproximadamente 60% das terras brasileiras (Moreira et al. 2013). Abaixo o mapa de solos do Brasil é mostrado na Figura 1.



Figura 1- Mapa do solo do Brasil. Fonte IBGE (2005)

Na Amazônia, a diversidade de solos é um reflexo dos fatores de formação como relevo, geologia, clima, fatores bióticos e feições da paisagem (Do Vale Junior et al. 2011). Os solos mais representativos da Amazônia Oriental (Amapá, no Pará e no Tocantins) são: Latossolos, Argissolos, Gleissolos, Plintossolos e o Neossolos (Segovia, 2020). Os Latossolos são de coloração avermelhada, alaranjada ou amarelada, muito profundos, friáveis, porosos, de textura variável, com argila de atividade baixa. São solos fortemente intemperizados, os minerais primários pouco resistentes ao intemperismo, bem como a fração silte, estão ausentes ou existem em pequenas proporções e os teores de óxidos de ferro e alumínio são elevados (Silva et al.2005).

Argissolos são bem estruturados, apresentam profundidade variável e cores predominantemente avermelhadas ou amareladas no horizonte B, textura variando de arenosa a argilosa nos horizontes superficiais, e de média a muito argilosa naqueles mais profundos; sua fertilidade é variada, no entanto, predominam aqueles de baixa fertilidade natural (Moreira et al. 2013). Os Gleissolos são observados em expressão em áreas de planícies fluviais ou em regiões em que as depressões no terreno favorecem a acumulação de água

favorecendo o desenvolvimento do processo pedogenético de gleização. Contudo, a maior parte dos Gleissolos possui potencial agrícola principalmente para cultura do arroz irrigado ou quando drenados para culturas menos sensíveis a eventuais problemas de deficiência de oxigênio (Ribeiro et al.2020).

Os Plintossolos grande parte destes solos foram anteriormente mapeados como Lateritas Hidromórficas (HL). Compreende solos minerais hidromórficos ou com séria restrição à percolação de água. Os Neossolosos compreendem solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso (menos de 50 cm) com pequena expressão dos processos pedogenéticos em consequência da baixa intensidade de atuação destes processos (Silva et al. 2005).

Em relação ao bioma Amazônia, ainda são escassas as pesquisas de microplásticos direcionadas ao solo ou aos sedimentos. Estudos de Martinelli Filho e Monteiro (2019) e Gerolin et al (2020) são pioneiros por demonstrar a presença desse poluente em solos de praias da costa amazônica e sedimentos de rio na Amazônia. Apesar do potencial agrícola da região Amazônica, não há estudos que relatam a fontes, ocorrência, abundância, distribuição e destinos dos microplásticos em solos agrícolas da região.

1.4 –SISTEMA AGROFLORESTAL:

A utilização de Sistemas Agroflorestais (SAFs) vem se expandindo nos últimos anos e possuem inúmeras vantagens ambientais, econômicas e sociais, pois ao mesmo tempo que auxiliam na recuperação de áreas degradadas, contribuem para a atividade econômica de pequenos produtores (Pereira & Torres, 2023). Os sistemas agroflorestais são excelentes alternativas para o uso do solo. São formas de uso e manejo do solo em que árvores ou arbustos, cultivos agrícolas e/ou animais são combinados em uma mesma área, ao mesmo tempo (associação simultânea) ou em uma sequência de tempo (associação temporal), para diversificar a produção, gerar renda, promover o envolvimento da população local (SENAR, 2017), proteção do solo, incorporação da matéria orgânica no solo, redução das temperaturas, regulação dos ciclos hidrológicos, preservação das matas ciliares, preservação da biodiversidade, sequestro de carbono etc(CEPLAC, 2022).

Na Amazônia a riqueza da biodiversidade esta aliada ao grande valor econômico das suas fontes naturais, tornando-se meio de sobrevivência para as populações nativas (Pereira & Torres, 2023) e com o seu delicado equilíbrio ecológico, a Amazônia tem exigido, cada vez mais, a busca de alternativas sustentáveis de produção e de convivência, a exemplo da

necessidade atual de uso de áreas de pastagens degradadas e capoeira, que podem ser recuperadas por meio de SAFs (SENAR, 2017).

2 - JUSTIFICATIVA

A ocorrência de microplásticos no solo permanece pouco compreendida até agora, sem mencionar seu destino ambiental e toxicidade (Li et al. 2021). Diversas práticas e atividades usam e lançam resíduos plásticos no ambiente, de maneira proposital ou não. Como exemplo podemos citar fontes terrestres de emissão de microplásticos relacionada à atividade agrícola (Montagner et al. 2021), por meio da degradação de filmes plásticos, irrigação com esgoto, deposição atmosférica e atrito entre pneus e o solo, podendo ainda ser transportados pela ação do vento (Zhao et al. 2024).

Os sistemas agroflorestais são uma forma de uso da terra que combina culturas agrícolas, árvores frutíferas, florestais e animais, de forma a tentar reproduzir o desenho original das florestas e diminuir os impactos do uso do solo. No Pará é a forma mais comum de cultivo do cacau, onde áreas de pastagens degradadas estão sendo gradativamente substituídas por áreas de cacauicultura, em diferentes modelos, que diversificam a renda do produtor além de promover vários benefícios ambientais como o sequestro de carbono da atmosfera, manutenção da biodiversidade, proteção do solo contra erosão, eliminação das queimadas e recomposição de matas ciliares (CEPLAC 2002).

Contudo, os sistemas de cultivo de pequeno ou de grande porte, causam certo impacto, contribuindo para a introdução e contaminação de microplásticos nos solos, e medidas de manejo que visam minimizar a presença dos microplásticos nesses ambientes contribuiriam para melhoria da saúde ambiental (He et al. 2018; Huang et al. 2021). Neste contexto a pesquisa destaca a necessidade de constatar microplásticos em solos agrícolas na Amazônia e os seus efeitos, considerando não haver estudos específicos. Portanto, é essencial aprofundar e avançar em novas descobertas e propor novas medidas de manejo do uso do solo agrícola.

A partir dessa problemática ambiental dos microplásticos e da ausência de estudos sobre presença, distribuição e tipos de microplásticos em solos agrícolas e agrossistemas da Amazônia, formulou-se a seguinte questão de pesquisa: qual é o panorama científico das pesquisas sobre microplásticos em solos agrícolas, e quais as fontes de contaminação e distribuição desses poluentes em sistemas agroflorestais na Amazônia?

Partindo dessa questão, estabelece-se a hipótese de que a produção científica sobre microplásticos em solos agrícolas apresenta crescimento contínuo, porém com reduzida

representatividade de estudos realizados em sistemas agroflorestais amazônicos. Adicionalmente, espera-se que esses sistemas apresentem ocorrência de microplásticos no solo, porém com menor abundância e diversidade de polímeros quando comparado com outras pesquisas.

3 - OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a presença de microplásticos em sistemas agroflorestais amazônicos, integrando abordagens cienciométricas e análises de campo para compreender sua ocorrência, distribuição, caracterização e potenciais efeitos ambientais no solo agrícola.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar análise bibliométrica sobre microplásticos em solos agrícolas e seus efeitos no agroecossistema.
- Investigar a presença de Microplástico (MPs) em solo de sistema agroflorestal e Floresta.
- Tipificar/classificar os microplásticos e determinar o tipo de polímero existentes em solo de sistema agroflorestal e floresta.
- Identificar o tipo de polímero encontrado em solo do sistema agroflorestal e floresta.
- Relacionar as características físico-químicas e granulométricas do solo do sistema agroflorestal e floresta com quantidades de microplásticos presentes

Para isso esta dissertação foi dividida em dois capítulos: Capítulo I: Microplásticos em ecossistemas terrestres: uma análise cienciométrica de sua ocorrência e impactos em solos agrícolas e Capítulo II Prevalência de microplásticos em sistema agroflorestal: um estudo de caso.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKDOGAN, Zeynep; GUVEN, Basak. Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. **Environmental pollution**, v. 254, p. 113011, 2019.
- CHEN, X et al. Sinking of floating plastic debris caused by bio film development in a freshwater lake. **Chemosphere**, 222 (5) (2019), pp. 856-864,
- CHIA, Rogers Wainkwa *et al.* Soil health and microplastics: a review of the impacts of microplastic contamination on soil properties. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 10, p. 2690–2705, 2022.
- COLE, M.; LINDEQUE, PK; HALSBAND, C; et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**. Volume 62, Issue 12, 2011.
- DO VALE JÚNIOR et al. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. Revista Agro@mbiente On-line, v. 5, n. 2, p.158-165, maio-agosto, 2011.
- DUARTE et al 2016. SISTEMAS AGROFLORESTAIS / SOS AMAZÔNIA. – Rio Branco: SOS Amazônia, 2016.44 p.: il.
- FU, Z G. CHEN, W. WANG, et al. Microplastic pollution research methodologies, abundance, characteristics and risk assessments for aquatic biota in China. **Environmental Pollution**, 266 (2020).
- GESAMP, Joint group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection. Sources, fate and effects of microplastic in the marine environment: part 2 of a global assessment. Disponível em: Kershaw, P.J. (Ed), **Rep. Stud. GESAMP No. 90 (96 pp)**, 2016.
- GKOUTSELIS, Gerasimos et al. Microplastics accumulate fungal pathogens in terrestrial ecosystems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 13214, 2021.
- HE, D.; LUO, Y.; LU, S.; LIU, M.; SONG, Y.; LEI, L. Microplastics in Soils: Analytical Methods, Pollution Characteristics and Ecological Risks. **TrAC Trends Anal. Chem.** **2018**, 109, 163–172.
- HUANG, Y., LUI, Q., YAN, C., et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment – **Environment Pollution** 260 (2020) 114096.
- HUANG, D., WANG, X., YIN, L., CHEN, S., TAO, J., ZHOU, W. ... & XIAO, R. Research progress of microplastics in soil-plant system: Ecological effects and potential risks. **Science of The Total Environment**, 151487. 2021.
- HUERTA L. E.; VEJA J. M.; QUEJ V. K.; CHI J. A.; DEL CID L. S; CHI, C.; SEGURA, G. E.; GERTSEN, H.; SALÁNKI, T.; PLOEG, M. V. D.; KOELMANS, A. A.; GEISSEN, A. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. **Scientific Reports** volume 7, Article number: 14071 (2017)
- ISLAM, MUHAMMAD SAIFUL; ISLAM, ZAHIDUL; ISLAM, DIPPA. Abundance, Source Apportionment, and Surface Characteristics of Microplastics in Agricultural Soil in a Flood-Prone Area of Central Bangladesh. **Water Air and Soil Pollution**, [s. l.], v. 235, n. 3, 2024.
- KIM, S, W.; AN Y, J Edible size of polyethylene microplastics and their effects on springtail behavior. **Environmental Pollution**, 266. 2020.

- KOCH, N.; ERASMUS, K. H. J.; ZU E. ; WEHKAMP, J. OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; SCHWERHOFF, G. Agricultural Productivity and Forest Conservation: Evidence from the Brazilian Amazon. **American Journal of Agricultural Economics**. 2019
- LECHTHALER, S. et al. The way of macroplastic through the environment. **Environments – MDPI**, 7 (10), 1-30, 2020.
- LI, Q.; ZENG, A.; JIANG, X.; GU, X.; Are microplastics correlated to phthalates in facility agriculture soil?. **Journal of Hazardous Materials** Volume 412, 15 June 2021.
- MANUAL TÉCNICO DO CACAUEIRO PARA A AMAZÔNIA BRASILEIRA. Reimpressão. Belém-PA, CEPLAC/SUEPA,2022.
- MARTINELLI FILHO, J. E.; MONTEIRO, R. C. P. Widespread microplastics distribution at an Amazon macrotidal sandy beach **Marine Pollution Bulletin**. **Volume 145**, August 2019, Pages 219-223
- MILLER, Michaela E.; HAMANN, Mark; KROON, Frederieke J. Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms: A review and meta-analysis of current data. **PloS one**, v. 15, n. 10, p. e0240792, 2020.
- MONTAGNER, CASSIANA C. et al. Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. **Química Nova**, [s. l.], v. 44, p. 1328–1352, 2021.
- MONTENEGRO, M.; VIANNA, M.; TELES, B. D.; Atlas do Plástico: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos/-- 1. ed. -- Rio de Janeiro: Fundação Heirich Böll, 2020.
- MOREIRA, F. M.S. et al. O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal. Lavras: Ed. UFLA,2013. 352p.
- MORAES, L.M.S; QUEIROZ, A. F.S; BRITO, B.K.F. et al. Microplastics in the Amazon biome: State of the art and future priorities- *Heliyon*10 (2024) e 2885l.
- NAPPER, Imogen E. et al. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Marine pollution bulletin*, v. 99, n. 1-2, p. 178-185, 2015.
- NGUYEN,T. H. ; TANG, F. H. M. ; MAGGI, F. Sinking of microbial-associated microplastics in natural waters. **PLoS ONE**, 15 (2) (2020), 1-20,
- O'DONOVAN, S. et al. Ecotoxicological effects of chemical contaminants adsorbed to microplastics in the clam *Scrobicularia plana*. *Frontiers in Marine Science*, 5, 143, 2018.
- ONINK, V. MLA KAANDORP, E. VAN SEBILLE, C. LAUFKÖTTER Influence of Particle Size and Fragmentation on Large-Scale Microplastic Transport in the Mediterranean Sea. **Environ Sci Technol**, 56 (22) (2022), pp.
- PEREIRA &TORRES. Sistemas Integrados de Produção- Campina Grande: Editora Amplla,2023. 286p.
- PÉREZ-REVERÓN, R.; ÁLVAREZ-MÉNDEZ, S.J.; KROPP, R. M.; PERDOMO-GONZÁLEZ, A.; HERNÁNDEZ-BORGES, J.; DÍAZ-PEÑA, F.J. Microplastics in Agricultural Systems: Analytical Methodologies and Effects on Soil Quality and Crop Yield. *Agriculture* 2022, 12, 1162.<https://doi.org/10.3390/agriculture12081162>.

PANTOJA, J. C. D.; OLIVEIRA, A. E. P.; FERREIRA, ; COSTA, L. P.; NUNES, Z. M. P. ; ROCHA, R. M. First register of microplastic contamination in oysters (*Crassostrea gasar*) farmed in Amazonian estuaries. **Marine Pollution Bulletin**, v. 201, p. 116182, 2024.

POMPÊO, M.; Microplásticos nos ecossistemas: São Paulo, SP: Instituto de Biociências, 2022.

QI, Y., BIRIOT, N., GORT, G., et al. Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties- *Environmental pollution* 266 (2020) 115097.

RIBEIRO et al. Ciências Exatas e da Terra: Conhecimentos Estratégicos para o Desenvolvimento do País. Editora Atena 2020.

RODRIGUES, R.A.S., Ciência do solo: Morfologia e gênese- Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A.2028. 264p.

RILLIG, M.C, INGRAFFIA, R.; DE SOUZA MACHADO A.A. (2017) Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. **Front. Plant Sci.** 8:1805. doi: 10.3389/fpls.2017.01805.

SEGOVIA, J.F.O., **Floricultura Tropical: Técnicas e inovações para negócios sustentáveis na Amazônia**. – Brasília, DF: Embrapa, 2020.PDF (211 p.). ISBN 978-85-7035-890-5.

SHAFEA, L.; YAP, J.; BERIOT, N.; FELDE, V. J. M. N. L.; OKOFFO, E. D.; ENYOH, C. E; PETH, S. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. 186 (1) 2023.

SILVA et al. Descrição das Principais Classes de Solos. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária - EMBRAPA -Centro nacional de pesquisa de solos - CNPS unidade de execução de pesquisa e desenvolvimento de recife - uep/recife.2005

SISTEMAS AGROFLORESTAIS (SAFs): Conceitos e práticas para implantação no bioma amazônico/ Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). — 1. ed. Brasília: SENAR, 2017. 140 p.

STRIDE, B.; ABOLFATHI, S.; BENDING, G. D.; PEARSON, J. Quantifying microplastic dispersion due to density effects, **Journal of Hazardous Materials**, Volume 466, 2024.

SOUZA, M. T. V.; SALES-SHIMOMOTO, V.; SILVA, G. S.; VALA, A. L. Microplastics and the Amazon: from the rivers to the estuary. **Quim. Nova**, Vol. 46, No. 6, 655-667, 2023.

SOUZA-FERREIRA, M. L. C.; REIS, A. J. O. FERREIRA, E. B. L.; DIPOLD, J.; FREITAS, A. Z.; WETTER, N. U. OLIVEIRA-BAHIA, V. R. L. & VIEIRA, T. B. First record of microplastic contamination in adult endemic amazonian anuran species. **Scientific Reports**. 2025

SANTOS et al. **SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS** / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.356 p.: il. color.; 16 cm x 23 cm. ISBN 978-85-7035-800-4

SOUZA MACHADO. A. A. et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 6044–6052.

VAN DEN BERG, P., HUERTA-LWANGA, E., CORRADINI, F., & GEISSEN, V. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. **Environmental Pollution**, 2020. Pag 261, 114198.

VENTURIERI, A. et al. The Sustainable Expansion of the Cocoa Crop in the State of Pará and Its Contribution to Altered Areas Recovery and Fire Reduction. **Journal of Geographic Information System**, 14, 2020. 294-313.

YUAN, Z.; NAG, R.; CUMMINS, E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment-From marine to food systems. **Science of the Total Environment**, 2022

WALDSCHLÄGER, K.; SCHÜTTRUMPF, H. Effects of particle properties on the settling and rise velocities of microplastics in freshwater under laboratory conditions. **Environmental science & technology**, 2019

WANG, Q., ENYOH, C. E., CHOWDHURY, T., & CHOWDHURY, M. A. H. Analytical Techniques, Occurrence and Health Effects of Micro and Nano Plastics Deposited in Street Dust. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, 2020. 102, 6435–6453.

CAPÍTULO I

MICROPLÁSTICOS EM ECOSISTEMAS TERRESTRES: MICROPLÁSTICOS EM ECOSISTEMAS TERRESTRES: UMA ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DE SUA OCORRÊNCIA E IMPACTOS EM SOLOS AGRÍCOLAS

Este capítulo foi submetido a revista *Water, air & Soil Pollution*, está formatado de acordo com as normas da revista, disponível no link:

<https://link.springer.com/journal/11270/submission-guidelines>

Microplásticos em ecossistemas terrestres: Microplásticos em ecossistemas terrestres: uma análise cienciométrica de sua ocorrência e impactos em solos agrícolas.

Olganeth Moreira Oliveira¹, Maria Luiza Souza-Ferreira^{1, 2}, Fabrielle Barbosa Araujo¹, Adrian Oliveira Reis¹, Fernando Antônio Teixeira Mendes³, José Eduardo Martinelli⁴ e Veronica R. L. Oliveira-Bahia^{1*}

1. Instituto de Ciências Biológicas. Laboratório Multidisciplinar de Morfofisiologia Animal. Universidade Federal do Pará. Pára. Brasil
2. Instituto de Ciências Biológicas. Laboratório de Ecotoxicologia. Universidade Federal do Pará. Pára. Brasil
3. Comitê Executivo do Plano da Lavoura Cacaueira – CEPLAC. Pára. Brasil.
4. Laboratório de Oceanografia Biológica. Centro de Estudos Avançados da Biodiversidade. Universidade Federal do Pará. Pára. Brasil.

* Autor para correspondência vrlo@ufpa.br

Resumo

A poluição por microplásticos atingiu níveis alarmantes em todos os ecossistemas. O ambiente terrestre, particularmente os solos agrícolas, merece atenção especial devido à sua importância para a produção de alimentos e ao uso intensivo de materiais plásticos nas atividades agrícolas. Nesse contexto, coletamos dados cienciométricos relacionados a diferentes indicadores, avaliando tendências temporais em publicações e citações, a origem dos artigos e autores, os periódicos e editoras que concentram o maior número de publicações na área, bem como as palavras-chave mais utilizadas. Além disso, identificamos aspectos-chave da pesquisa, como tipos de uso da terra, culturas mais estudadas, sistemas de produção, práticas de manejo, impactos em plantas, solo e microfauna do solo, bem como a caracterização dos microplásticos quanto ao tipo de polímero, forma e cor em solos agrícolas. Os resultados demonstraram um aumento significativo nas pesquisas sobre o tema nos últimos anos, evidenciando a crescente preocupação científica com os riscos ambientais associados à poluição por plásticos em ecossistemas terrestres. Portanto, essas descobertas contribuem para futuros estudos sobre a poluição por microplásticos em solos agrícolas, ao identificar lacunas importantes na pesquisa e necessidades de conhecimento.

Palavras-chave: Microplásticos; Solos agrícolas; Análise bibliométrica; Poluição do solo.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade evoluiu e o plástico também. Ele se tornou parte integrante da vida cotidiana, proporcionando maior praticidade, conveniência, segurança e proteção em atividades que se tornaram mais fáceis com o uso de diferentes tipos de materiais plásticos. No entanto, a crescente demanda e produção de plásticos, associada a práticas inadequadas de gestão de resíduos, contribuiu para o acúmulo persistente de resíduos plásticos no meio ambiente (De Sousa et al. 2021; Sun et al. 2022).

Os materiais plásticos que permanecem no meio ambiente fragmentam-se gradualmente em partículas menores, conhecidas como microplásticos (MPs), com tamanhos que variam de 1 μm a 5 mm, por meio de processos físicos, químicos e biológicos (Zhao et al., 2024). Essas partículas se acumulam no meio ambiente e podem causar diversos efeitos adversos na biota. A maioria dos estudos sobre microplásticos tem se concentrado em ambientes marinhos, enquanto os ecossistemas terrestres permanecem relativamente pouco estudados, apesar de serem reconhecidos como importantes fontes e reservatórios desses contaminantes (Qi et al. 2020).

Entre os componentes dos ecossistemas terrestres, o solo é reconhecido como um dos locais de acumulação e retenção de microplásticos, e sua presença pode representar uma ameaça à saúde do solo e ao funcionamento do ecossistema (Boots, Russell & Green, 2019). Uma vez presentes no ambiente do solo, os microplásticos podem alterar propriedades físico-químicas, como densidade aparente, capacidade de retenção de água e ciclagem de nutrientes (Boots, Russell & Green, 2019; Yang et al. 2021). Além disso, podem afetar os microrganismos do solo, modificando os padrões de estrutura, diferenciação e sucessão da comunidade microbiana (Mao et al. 2020; Feng et al. 2022).

Estudos indicam que as principais fontes de microplásticos nos solos incluem águas residuais domésticas, atividades agrícolas, desgaste de pneus, resíduos urbanos e lixo doméstico (Nizzetto, Futter & Langaas, 2016). As áreas agrícolas podem representar importantes reservatórios de microplásticos, uma vez que esses contaminantes podem entrar no solo por diversas vias, incluindo cobertura plástica, aplicação de fertilizantes orgânicos, práticas de irrigação e deposição atmosférica (Jia et al. 2022). Além disso, foi demonstrado que os microplásticos influenciam o pH do solo, a densidade aparente, as comunidades microbianas e a capacidade de retenção de água, afetando consequentemente o crescimento e o desenvolvimento das plantas (de Souza Machado et al. 2019; Shafea et al. 2023).

Em todo o mundo, pesquisadores têm buscado identificar e compreender os potenciais efeitos associados à presença de microplásticos em solos agrícolas (Jamil et al. 2024). Nesse contexto, a análise cienciométrica surgiu como uma ferramenta importante para avaliar o desenvolvimento de atividades de pesquisa científica (Chae et al. 2018; Viçosi et al. 2018; Qi et al. 2020). Segundo Ruiz et al. (2009), a ciencimetria consiste na análise quantitativa da produção científica e tecnológica, visando mensurar e compreender a atividade científica. Essa abordagem é útil para avaliar o estado da arte, identificar tendências e padrões e analisar o desenvolvimento da literatura científica, fornecendo, assim, percepções valiosas para pesquisas futuras. Dessa forma, estudos cienciométricos são essenciais para avaliar a produção científica por meio de indicadores numéricos e análises estatísticas, aumentando a robustez e a confiabilidade das informações obtidas (Razera, 2016).

No presente estudo, utilizou-se a análise cienciométrica para explorar a literatura científica global sobre microplásticos em solos agrícolas, com o objetivo de identificar o crescimento das publicações e as principais tendências de pesquisa nessa área. Essa abordagem permitiu sistematizar informações sobre o número de publicações, periódicos de destaque, autores mais influentes, agrupamentos de palavras-chave, culturas agrícolas mais estudadas, tipos de solo e os efeitos dos microplásticos em plantas, solos e organismos edáficos. Além disso, os polímeros mais frequentemente relatados foram avaliados quanto ao seu tipo, forma e cor. Espera-se que este estudo contribua para uma compreensão mais ampla da ocorrência de microplásticos em solos agrícolas e de seus impactos ambientais associados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Estratégia de Busca e Metodologia de Revisão

Para garantir um levantamento bibliográfico abrangente, foram realizadas buscas nas bases de dados Scopus e Web of Science (Core Collection), reconhecidas como duas das fontes mais completas de literatura científica na área ambiental. A revisão sistemática foi conduzida seguindo as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Panic et al., 2013).

As buscas foram realizadas utilizando termos específicos relacionados ao tema do estudo, combinados por meio de operadores booleanos. A estratégia de busca adotada em ambas as bases de dados foi a seguinte: ("agricultural soil*" OR "agricultural ecosystem*" OR "cultivated soil*" OR "cropland soil*") AND (microplastic* OR "plastic polymer" OR plastic*).

Quanto ao período de abrangência, foram considerados artigos publicados entre janeiro de 2010 e julho de 2025. Aplicaram-se os seguintes critérios de inclusão: (i) estudos que abordam a contaminação por microplásticos em solos agrícolas; (ii) artigos de pesquisa original baseados em amostras de solo coletadas em campo; e (iii) artigos na íntegra publicados em periódicos científicos internacionais. Adicionalmente, foram definidos os seguintes critérios de exclusão: (i) cartas ao editor, capítulos de livros, relatórios técnicos, teses, dissertações e resumos de conferências; (ii) artigos com texto completo indisponível; e (iii) estudos publicados em idiomas diferentes do inglês.

O processo de seleção baseou-se na avaliação de títulos e resumos, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 1. O gerenciamento de dados bibliográficos, a remoção de duplicatas e a extração e organização das referências selecionadas foram realizados utilizando o pacote RefManageR (v. 1.4.0) no ambiente estatístico R (v. 4.3.0).

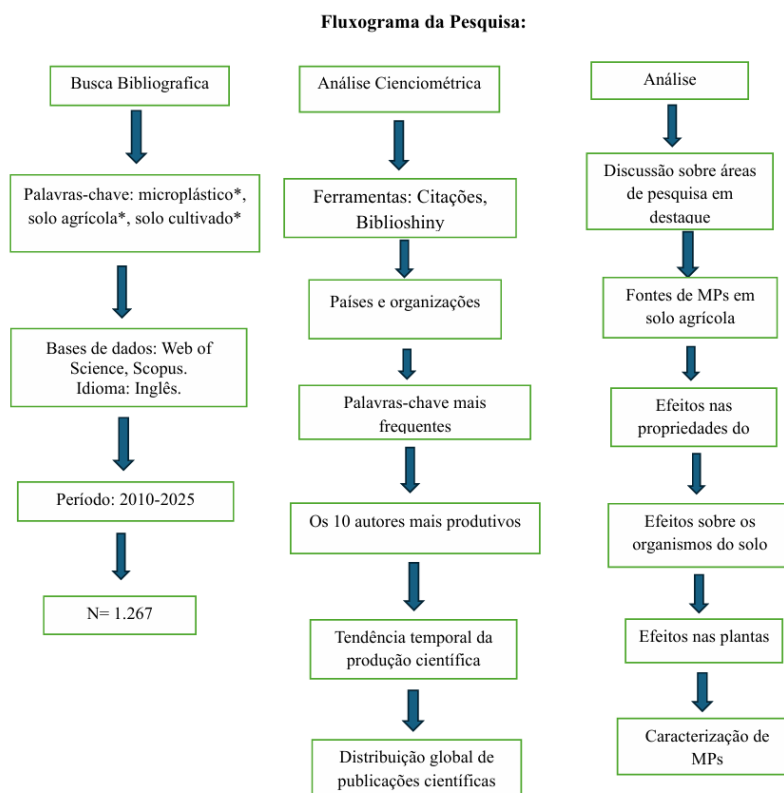


Fig. 1 Fluxograma ilustrando o processo de seleção de estudos, adaptado de Jamil et al. (2024)

2.2. Análise Cienciométrica e Sistemática de Dados

Com foco em microplásticos, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão abrangente da literatura científica que aborda a presença desses contaminantes em solos

agrícolas, bem como seus efeitos no solo e nas plantas, além dos principais polímeros identificados em áreas cultivadas.

Após a seleção dos artigos, dados bibliográficos foram extraídos das bases de dados para a análise cienciométrica, a qual foi conduzida com base nos critérios propostos por Vinkler (2010), com adaptações. Foram avaliados os seguintes aspectos: (1) evolução temporal das publicações; (2) palavras-chave mais frequentes; (3) produtividade dos autores; (4) distribuição global das publicações; e (5) principais periódicos. Todas as análises foram realizadas utilizando o pacote Bibliometrix no ambiente estatístico R (v. 4.3.0).

Para a revisão sistemática, os artigos selecionados foram analisados de acordo com os seguintes aspectos: (1) tipo de uso da terra; (2) tipo de cultura; (3) sistema de produção; (4) sistema de manejo; (5) tipo de solo; (6) efeitos dos microplásticos no solo; (7) efeitos dos microplásticos nos organismos do solo; (8) efeitos dos microplásticos nas plantas; e (9) caracterização do polímero, incluindo tipo, formato e cor. As informações restantes foram organizadas em planilhas para análise qualitativa (Material Suplementar).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a busca nas bases de dados bibliográficas, 1.324 documentos foram recuperados da Web of Science (WoS) e 1.591 do Scopus. Após a remoção de registros duplicados, 1.267 documentos permaneceram elegíveis para análise. No entanto, após o processo completo de triagem, 170 artigos atenderam aos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos nesta revisão e abordaram microplásticos em solos agrícolas e seus efeitos no ecossistema do solo.

A análise centimétrica dos artigos selecionados destacou a crescente relevância deste tópico na pesquisa ambiental. Em 2016, o número de publicações começou a aumentar de forma mais perceptível; no entanto, um aumento substancial foi observado em 2019, quando a produção de publicações apresentou crescimento exponencial. Esse aumento acentuado na produção científica reflete o crescente interesse dos pesquisadores nesta área (Jamil et al. 2024). Nos anos subsequentes, até 2024, o número de publicações continuou a aumentar, demonstrando o interesse científico sustentado na complexidade e nas implicações globais deste tema. Embora tenha sido observada uma desaceleração no crescimento das publicações em 2023 e 2024, isso não indica necessariamente um declínio no interesse científico. Para 2025, a análise incluiu apenas estudos publicados até julho. Mesmo assim, o número de publicações já havia se aproximado dos níveis registrados em 2023 e 2024, enfatizando ainda

mais a crescente preocupação com a contaminação por microplásticos em ambientes terrestres (Figura 2).

Os solos agrícolas e urbanos representam importantes reservatórios ambientais de microplásticos, comparáveis em importância aos ecossistemas marinhos (Hurley e Nizzetto, 2018; Li et al. 2021; Jamil et al. 2024). Nos sistemas agrícolas, uma grande variedade de materiais plásticos é utilizada durante a produção, incluindo coberturas plásticas, materiais de embalagem, coberturas de estufas, bandejas de mudas e tubos de irrigação, muitos dos quais que são frequentemente descartados no campo após o uso (Zhang e Liu, 2018; de Souza Machado et al. 2018; Hayes, 2019).

A presença de microplásticos em solos agrícolas tem atraído atenção crescente tanto da comunidade científica quanto da sociedade, devido aos riscos ainda pouco compreendidos associados à sua persistência em ambientes de solo e ao seu potencial de transferência pela cadeia alimentar (Medyńska-Juraszek & Szczepańska, 2023).

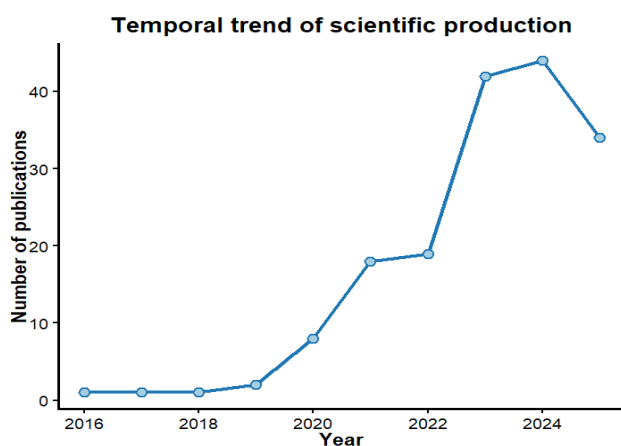


Fig. 2 Tendência anual de publicações sobre microplásticos e solo agrícola.

Dentre os 170 artigos selecionados, foram identificadas as palavras-chave mais utilizadas e os principais temas de pesquisa explorados nos últimos quinze anos. Entre as palavras-chave, "microplásticos" apresentou a maior frequência de ocorrência, evidenciando seu papel como foco central das pesquisas nesta área. Outros termos frequentes incluíram "poluição", "solo agrícola", "água", "plástico" e "degradação".

A alta frequência da palavra-chave "microplásticos" está diretamente relacionada à crescente preocupação global com a contaminação por essas partículas, cuja presença tem sido relatada inclusive em regiões remotas de todo o mundo (Li et al. 2021). Apesar do número crescente de estudos, a ocorrência de microplásticos em solos permanece pouco compreendida, particularmente no que diz respeito ao seu destino ambiental, comportamento e toxicidade em ecossistemas terrestres (Li et al. 2021).

Outro aspecto importante da análise foi a distribuição geográfica das publicações científicas. Os resultados mostraram que a Ásia e a Europa são as regiões com a maior concentração de estudos científicos relacionados a esse tema. Entre os países, a China destacou-se com a maior média de citações por artigo (5.910), seguida pela República Tcheca (1.154), Coreia do Sul (526) e Estados Unidos (524).

Além disso, a análise identificou os dez países com maior produção científica nessa área ao longo do período de estudo de quinze anos. A China ocupou o primeiro lugar, seguida pela Índia e pela Alemanha. Os Estados Unidos e a Austrália ocuparam a quarta e a quinta posições, respectivamente. O Brasil ficou em sexto lugar, à frente de países como Espanha, Coreia do Sul, Países Baixos e Áustria.

A análise também destacou os principais autores em termos de produtividade científica sobre o tema em nível mundial. Entre os dez pesquisadores mais produtivos, autores chineses ocuparam as primeiras posições, demonstrando ainda mais o papel de destaque da China no avanço das pesquisas sobre microplásticos em solos agrícolas (Figura 3).

A predominância da China nas publicações científicas relacionadas a microplásticos em solos agrícolas pode estar associada tanto a preocupações ambientais decorrentes dos altos níveis de poluição por microplásticos quanto a investimentos substanciais em pesquisa científica (Moeck et al. 2023). Sendo um dos maiores produtores e consumidores de materiais plásticos do mundo, a gestão eficaz da poluição por plásticos tornou-se um grande desafio ambiental.

Estudos demonstraram que a contaminação por microplásticos afeta uma ampla gama de ecossistemas na China, incluindo sistemas de água doce e ambientes marinhos, como estuários e lagos (Zhang et al. 2018; Li et al. 2019). Portanto, investimentos em pesquisa são essenciais para melhorar a compreensão da extensão dessa contaminação e de seus impactos ecológicos e na saúde. Além disso, tais esforços contribuem para o desenvolvimento de políticas públicas e soluções tecnológicas voltadas à mitigação dos riscos ambientais associados à poluição por microplásticos (Zhang et al. 2018; Li et al. 2019; Moeck et al. 2023)

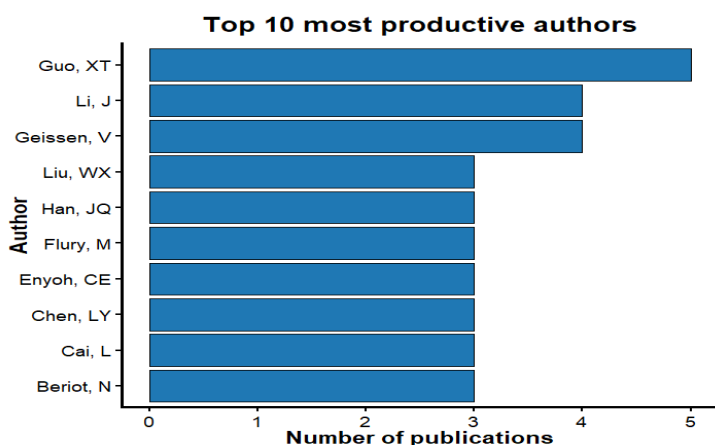


Fig. 3 Autores com o maior número de artigos publicados em periódicos internacionais

Outro ponto relevante diz respeito aos periódicos científicos com o maior número de publicações sobre microplásticos em solos agrícolas. Os dez principais periódicos em termos de volume de publicações estão apresentados na Figura 4. A maioria desses periódicos possui altos fatores de impacto e está amplamente indexada em bases de dados internacionais, como Web of Science e Scopus, o que contribui para uma maior visibilidade e disseminação dos resultados das pesquisas.

Entre os periódicos com maior número de publicações, destacam-se **Science of the Total Environment**, **Environmental Pollution** e **Journal of Hazardous Materials**. Os três periódicos são publicados pela Elsevier, evidenciando uma forte concentração da produção científica em grandes grupos editoriais internacionais. Além da Elsevier, editoras como Springer Nature, MDPI e American Chemical Society também desempenham um papel significativo na disseminação de pesquisas sobre esse tema.

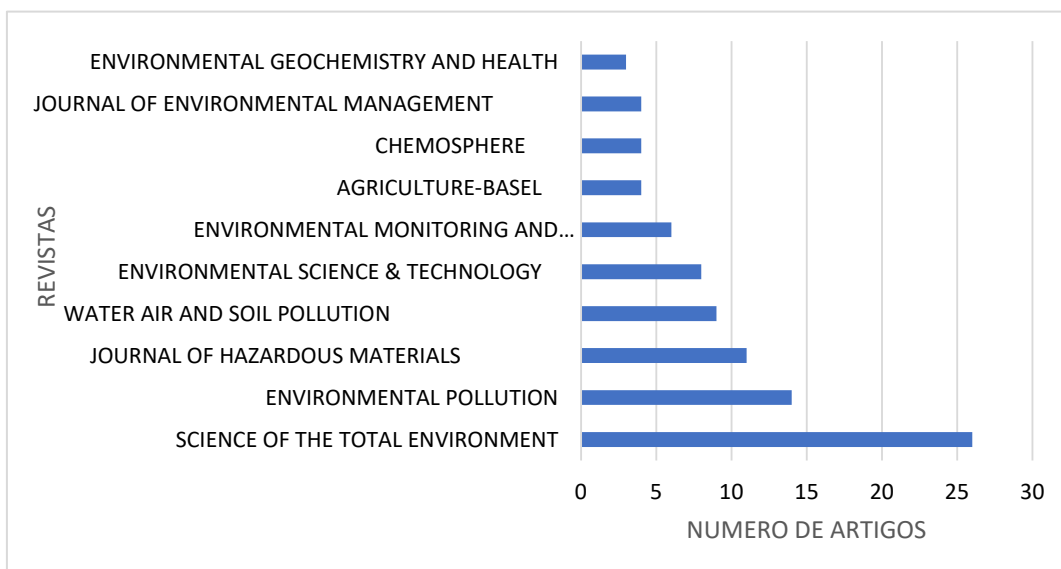


Fig. 4 Periódicos com o maior número de publicações sobre microplásticos em solos agrícolas

Entre as culturas mais frequentemente citadas nas publicações, *Oryza sativa* (arroz) foi a mais comum, com 13 ocorrências, seguida por hortaliças em geral, com 12 registros, e *Triticum sp.* (trigo), com 11 ocorrências (Figura 5).

O destaque do cultivo de arroz e trigo na literatura pode estar relacionado à importância desses cereais no abastecimento alimentar global, particularmente em países asiáticos como a China, onde ambas as culturas constituem alimentos básicos para uma grande parcela da

população (FAO, 2023). Além disso, essas culturas apresentam ciclos de produção relativamente curtos, geralmente concluídos em um ano, exigindo preparo do solo, adubação, semeadura, irrigação e outras práticas de manejo agrícola realizadas com frequência. Tais atividades frequentemente envolvem o uso de materiais plásticos, contribuindo significativamente para a geração e o acúmulo de microplásticos em ambientes agrícolas (Pedrosa, 2014).

Em áreas tradicionalmente dedicadas à agricultura intensiva, o uso de produtos plásticos tornou-se uma prática comum (He et al. 2018; Zhang e Liu, 2018; de Souza Machado et al. 2019; Hayes, 2019). O manejo contínuo dessas áreas aumenta a probabilidade de transferência de microplásticos do solo para as culturas agrícolas, elevando, assim, o potencial de exposição humana a esses contaminantes por meio da cadeia alimentar (Gao et al. 2022). De fato, as atividades agrícolas estão entre as fontes mais importantes de aporte de plásticos nos solos, embora sua contribuição seja frequentemente subestimada devido à dificuldade de quantificar esses resíduos em ambientes terrestres (Mongil-Manso et al. 2023).

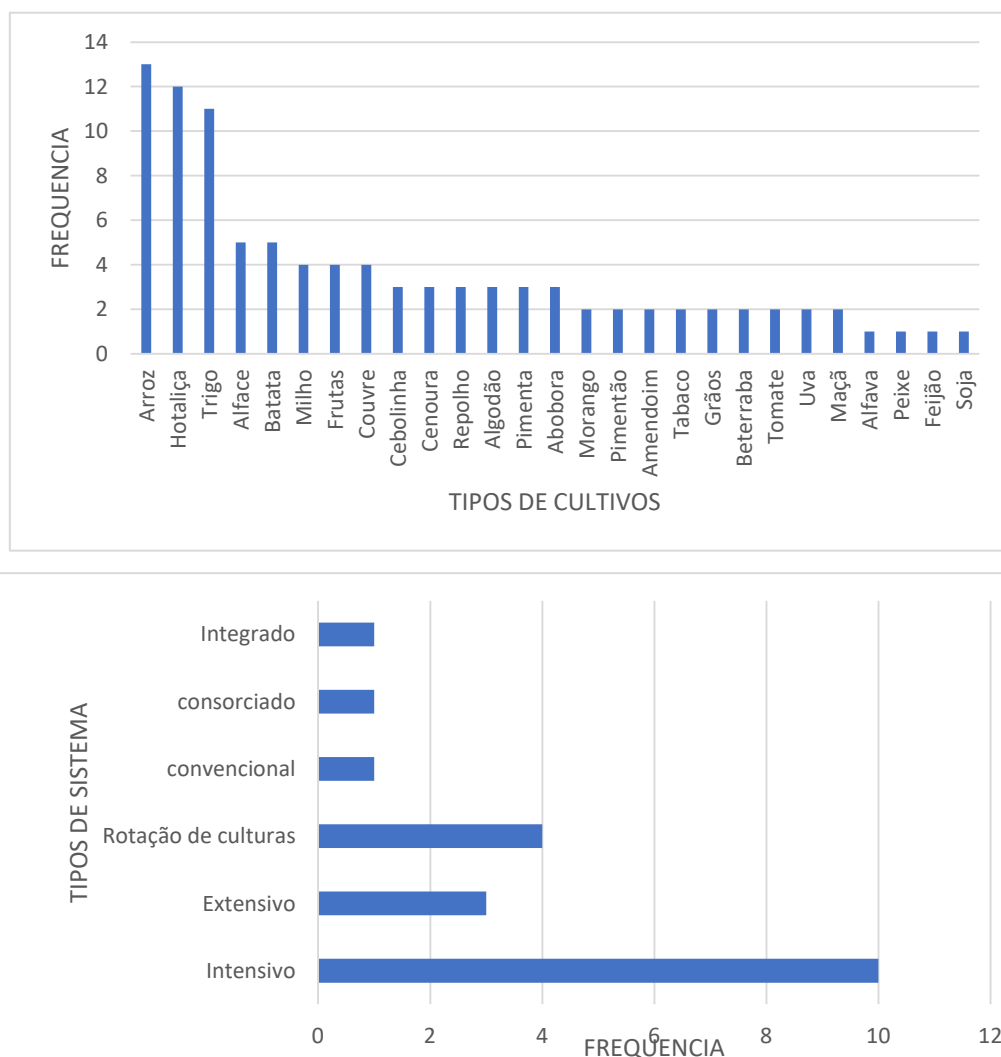


Fig. 5 Frequência das principais culturas e sistemas de produção relatados nas publicações selecionadas

O sistema de produção agrícola foi outro aspecto destacado em nossa análise (Figura 5). Entre os estudos revisados, os sistemas de cultivo intensivos foram os mais frequentemente relatados. Esses sistemas caracterizam-se pelo uso de tecnologias avançadas em áreas relativamente pequenas, maximizando a produtividade por meio do maior uso de insumos agrícolas para o controle de pragas e doenças. Em contrapartida, os sistemas de cultivo extensivos foram os segundos mais relatados, ocorridos em grandes áreas de terra e caracterizando-se por menor investimento tecnológico e níveis variados de utilização de mão de obra (Krajewski et al. 2003). A distribuição de culturas ocupou o terceiro local entre os sistemas de produção agrícola específicos nos estudos selecionados. Essa prática agrícola sustentável baseia-se na alternância regular e planejada de diferentes espécies de culturas em uma mesma área ao longo do tempo (Duarte Junior e Coelho, 2010).

Os sistemas convencionais, de cultivo consorciado e integrados ocuparam, respectivamente, posições de quarta, quinta e sexta. Os sistemas envolvidos envolvem práticas tradicionais de manejo do solo, como aração e gradagem (Embrapa, 2010). Os sistemas de cultivo consorciados caracterizam-se pelo cultivo simultâneo de duas ou mais espécies vegetais em uma mesma área agrícola durante o mesmo período de cultivo (Hirakuri et al. 2012). Por sua vez, os sistemas integrados, amplamente conhecidos como Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), consistem em uma estratégia de produção que combina atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área (Costa et al. 2022).

Diferentes sistemas de produção agrícola favorecem práticas de manejo distintas e, conseqüentemente, contribuem para a introdução no solo de contaminantes plásticos com características e composições variadas. Entre as principais fontes associadas à geração de microplásticos estão o uso de plásticos para cobertura do solo (“mulching”), a aplicação de corretivos de solo e fertilizantes, resíduos de embalagens agrícolas, filmes plásticos, transparência com águas residuais e processos de escoamento superficial (He et al. 2019; Lu et al. 2019; Chen et al. 2020; Zhou et al. 2020; Han et al. 2021; Meng et al. 2020; Nossa pesquisa evidenciou claramente esse cenário, identificando a honestidade, o uso de filmes plásticos de cobertura do solo (“mulching”), o lodo de esgoto, as águas residuais, os filmes plásticos e os fertilizantes orgânicos como as principais práticas de manejo associadas à introdução e ao acúmulo de microplásticos em sistemas agrícolas (Figura 6). Huang et al. (2020) constataram que solos expostos a filmes plásticos de cobertura por períodos prolongados apresentavam concentrações mais elevadas de microplásticos, atingindo $1075,6 \pm$

346,8 partículas kg^{-1} de solo. De modo semelhante, Dahl et al. (2021) relatando um aumento no acúmulo de microplásticos nas camadas superficiais do solo após a intensificação das atividades agrícolas na área de estudo, com uma concentração média de 3819 partículas kg^{-1} de solo.

O uso de ferramentas, equipamentos e materiais agrícolas fabricados com plástico tornou-se praticamente importante na agricultura moderna. Com o tempo, esses materiais sofrem intemperismo e manipulação, liberando microplásticos nos solos agrícolas (Gao et al. 2022).

Os microplásticos podem ingressar em solos agrícolas por diversas vias, incluindo a manipulação de filmes plásticos, a segurança com águas residuais, a deposição atmosférica e o desgaste de pneus resultante do atrito com superfícies de vias. Além disso, essas partículas podem ser transportadas pelo vento e depositadas em ambientes agrícolas (Zhao et al. 2024). Uma vez introduzidos em ecossistemas terrestres, os microplásticos podem migrar através do solo por meio de diferentes processos, incluindo lixiviação, bioturbação e perturbações mecânicas (Li et al. 2020).

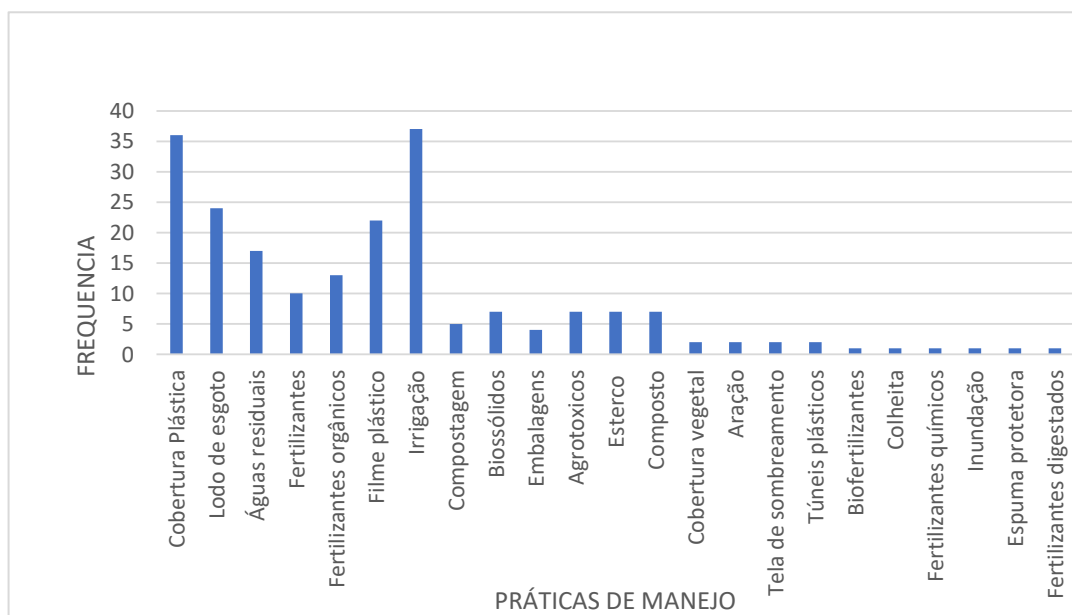


Fig. 6 Práticas de gestão relacionadas com maior frequência nas publicações selecionadas.

Quanto às classes de solo mais frequentemente relatadas nos estudos selecionados, os solos arenosos, argilosos, franco-argilosos e franco-arenosos foram os que mais se destacaram, conforme ilustrado na Figura 7. A distribuição de microplásticos (MPs) nos solos está estreitamente relacionada à textura do solo. Solos arenosos geralmente apresentam concentrações mais baixas de microplásticos em comparação com solos de textura mais fina, como os argilosos e franco-argilosos (Yu et al. 2021).

Essas evidências sugerem que solos com maior teor de argila e agregados mais estáveis tendem a reter microplásticos de forma mais eficaz, tornando-os menos suscetíveis a processos de lixiviação. Em contrapartida, solos arenosos, caracterizados por uma maior proporção de macroporos ($> 0,08$ mm), facilitam a movimentação de partículas de microplástico, promovendo seu rápido transporte vertical para camadas mais profundas do solo (Rillig et al. 2017).

O acúmulo de grandes quantidades de microplásticos em solos agrícolas pode comprometer funções ecossistêmicas importantes (Jia et al. 2022). Esses contaminantes podem afetar diretamente a saúde e a funcionalidade do solo ao alterar o pH, a estrutura física e a disponibilidade de nutrientes, impactando, assim, o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Além disso, os microplásticos podem ser transferidos ao longo da cadeia alimentar, representando riscos potenciais à saúde e ao bem-estar humanos (Yang et al. 2021).

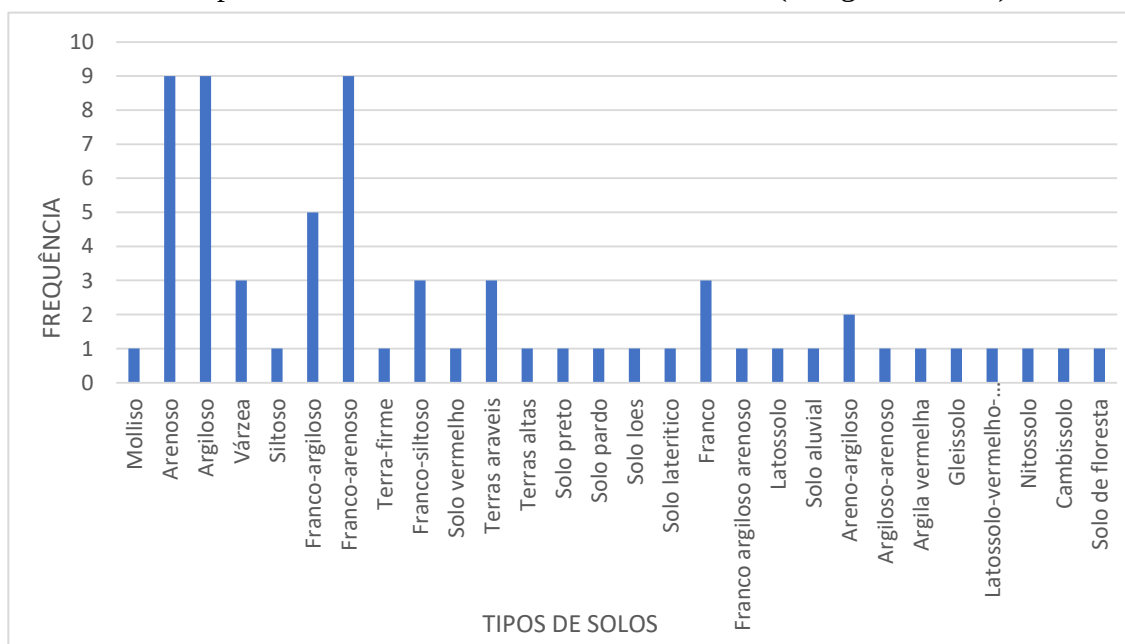


Fig. 7 Frequência dos tipos de solo relatados nas publicações selecionadas

A análise também permitiu identificar os principais efeitos associados à presença de microplásticos (MPs) em solos agrícolas sobre as plantas, os organismos do solo e o próprio solo. Em relação às plantas, os efeitos investigados com maior frequência estavam relacionados ao crescimento vegetal, ao desenvolvimento radicular, à atividade fotossintética e à produção de biomassa. No entanto, outros efeitos também foram relatados, incluindo alterações na germinação, redução da produtividade e ocorrência de clorose foliar.

Quanto aos solos, a análise revelou que os impactos dos microplásticos podem ser tanto físicos quanto químicos. Entre os efeitos físicos mais evidentes, foram frequentemente relatadas alterações na capacidade de retenção de água, a qual pode ser reduzida em

decorrência do acúmulo de microplásticos no solo. Outras propriedades afetadas incluem a densidade do solo, a porosidade e a fertilidade (Figura 8).

No que diz respeito aos efeitos químicos, as alterações no pH do solo foram identificadas como o parâmetro mais frequentemente investigado nos estudos analisados. Contudo, outras alterações químicas também foram relatadas, conforme ilustrado na Figura 8.

Quanto à biota do solo, estudos demonstraram que os microplásticos afetam principalmente a reprodução de organismos que habitam o solo. Outros efeitos frequentemente relatados incluem atraso no crescimento, alterações fisiológicas e perturbações nas funções biológicas, o que pode, em última análise, comprometer os papéis ecológicos desempenhados por esses organismos no ecossistema do solo.

Os microplásticos podem induzir efeitos tóxicos ao alterar diversos processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas, incluindo atraso ou redução na germinação de sementes, inibição do crescimento vegetal, alterações no desenvolvimento do sistema radicular, redução na produção de biomassa e no rendimento de frutos, interferência na atividade fotossintética, danos oxidativos e efeitos genotóxicos (Qi et al. 2018; Boots et al. 2019; Bosker et al. 2019; Yu et al. 2021; Hernandez-Arenas et al. 2021).

Nos solos, esses contaminantes podem alterar propriedades físico-químicas importantes, incluindo o aumento da porosidade e da capacidade de retenção de água, a redução da densidade aparente e a modificação da permeabilidade à água (de Souza Machado et al. 2018, 2019; Zhang et al. 2020). Além disso, podem comprometer a integridade estrutural do solo (Huerta Lwanga et al. 2017; Wan et al. 2019), alterar a estrutura física do solo (Zhao et al. 2021) e promover mudanças no pH do solo (Yang et al. 2021). Os microplásticos também podem reduzir os níveis de matéria orgânica do solo (MOS), fósforo disponível, nitrogênio alcalino e potássio disponível (Zhang et al. 2020; Dong et al. 2021; Wang et al. 2022), comprometendo, assim, diretamente a saúde e a fertilidade do solo.

Ademais, os microplásticos podem ser ingeridos por uma ampla gama de organismos terrestres, incluindo ciliados, amebas, flagelados, colêmbolos e minhocas. Sua ingestão pode resultar em taxas reduzidas de sobrevivência e crescimento, danos intestinais, distúrbios imunológicos, estresse oxidativo, neurotoxicidade, danos ao DNA e alterações na expressão gênica (Wang et al. 2020; Sarker et al. 2020; Wang et al. 2021). Além disso, os MPs podem alterar a diversidade e a riqueza da microbiota intestinal de organismos do solo, interferindo em processos ecossistêmicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica (Lu et al. 2018; Zhu et al. 2018).

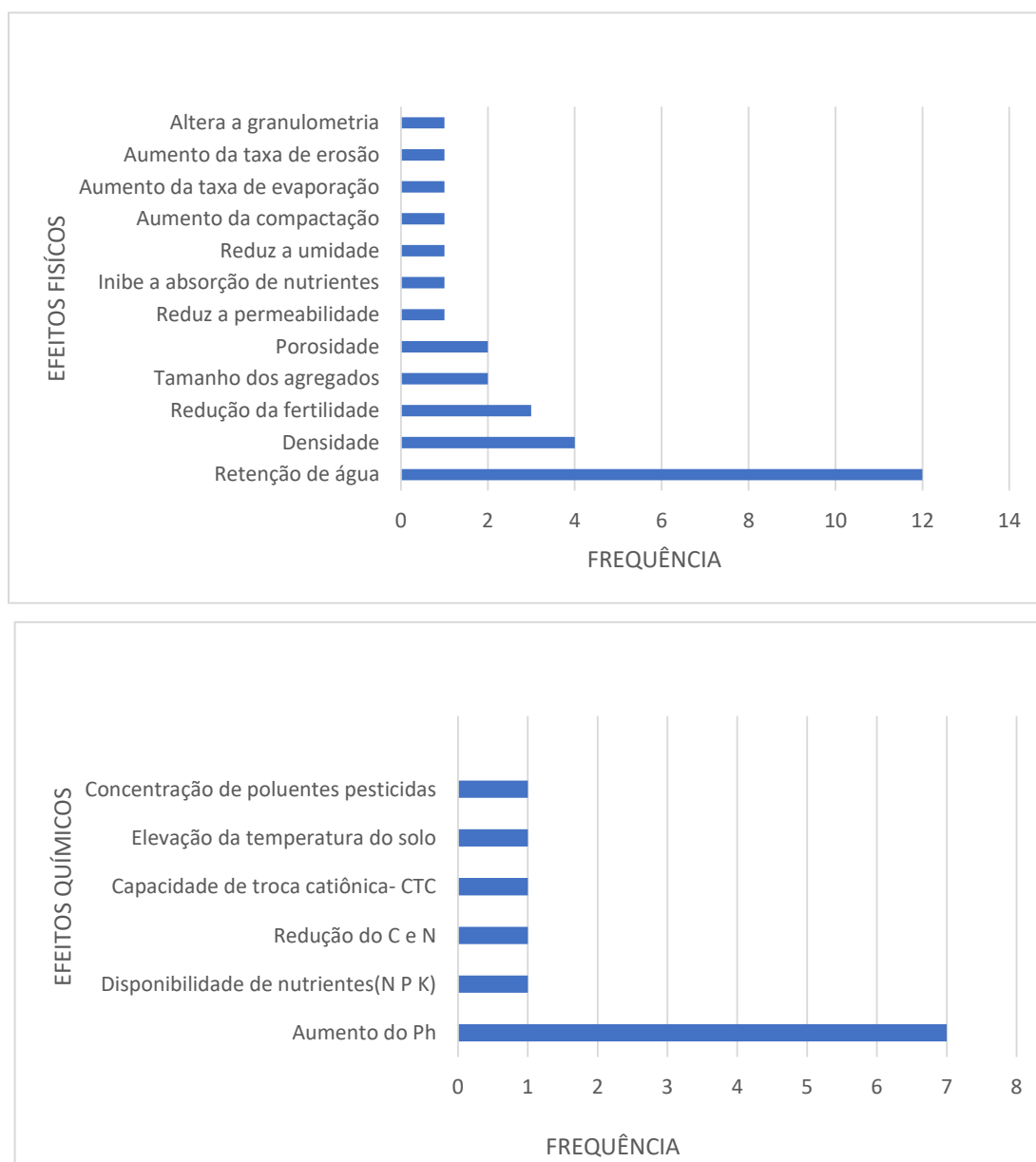


Fig. 8 Efeitos físicos e químicos no solo relatados com maior frequência nas publicações selecionadas.

Quanto às características dos polímeros relatados nos estudos analisados, observaram-se diferenças em termos de tipo, formato e cor dos microplásticos identificados. Entre os polímeros relatados com maior frequência, destacam-se: polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), polietileno de baixa densidade (LDPE), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS), poliamida (PA), polietileno de alta densidade (HDPE), poliuretano (PU), politetrafluoretileno (PTFE), polietersulfona (PES), polifluoreto de vinila (PVF), álcool polivinílico (PVA), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), policarbonato (PC), polimetilmetacrilato (PMMA), etileno-acetato de vinila (EVA), poli(adipato-co-tereftalato de

butileno) (PBAT), rayon/viscose (CV), polietileno-co-acetato de vinila (PEVA) e borracha sintética.

No entanto, o polietileno (PE) e o polipropileno (PP) foram identificados como os polímeros relatados com maior frequência nos estudos analisados, seguidos pelo poliestireno (PS) e pelo polietileno tereftalato (PET) (Figura 9).

Em relação à morfologia dos microplásticos, foram identificadas quatorze categorias de formato distintas, incluindo filmes, fibras, esferas, grânulos, fragmentos, espumas, blocos, partículas lineares, pellets, escamas, partículas, folhas, microesferas e partículas de formato irregular. Contudo, fragmentos, fibras e filmes foram as formas relatadas com maior frequência, respectivamente (Figura 9).

Quanto à cor, foram observadas treze categorias distintas, incluindo amarelo, transparente, preto, verde, roxo, vermelho, azul, branco, laranja, marrom, cinza, rosa e outros tons. Transparente, preto, branco, azul, vermelho e amarelo foram as cores relatadas com maior frequência, em ordem decrescente de ocorrência (Figura 9). Qi et al. (2020) relataram que os microplásticos predominantes encontrados em solos agrícolas consistem principalmente em polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET) e policloreto de vinila (PVC). A predominância desses polímeros está associada à sua alta resistência à degradação ambiental, resultante frequentemente da incorporação de plastificantes, antioxidantes e retardantes de chama durante a fabricação do plástico. Esses aditivos podem retardar os processos de degradação sob condições ambientais (Rawtani et al. 2023).

As formas mais comuns de microplásticos incluem grânulos, esferas, fibras e partículas (Lusher et al. 2020), bem como filmes, espumas e fragmentos (Lozano et al. 2021). Fragmentos de plástico são frequentemente detectados em solos agrícolas e podem originar-se da degradação de diversos materiais utilizados em atividades agrícolas, como redes, coberturas de solo (mulching), tubulações de irrigação, recipientes e bandejas para mudas (Shanmugam et al. 2024). Microplásticos na forma de filme provavelmente derivam de coberturas plásticas e filmes de proteção utilizados durante o cultivo. Esses materiais, amplamente empregados para a conservação da umidade do solo e controle de plantas daninhas, sofrem degradação gradual ao longo do tempo, gerando filmes plásticos finos que se acumulam em ambientes agrícolas (Convencional and Biodegradável Plastics in Agriculture, 2021; Mansoor et al. 2022).

As diferentes cores observadas nos microplásticos refletem a ampla diversidade de fontes de poluição presentes nos solos. Microplásticos de cores claras tendem a predominar

devido a processos de desbotamento causados pela exposição prolongada à radiação ultravioleta (UV). Em contrapartida, microplásticos de cores mais escuras, como partículas vermelhas e pretas são geralmente menos suscetíveis à descoloração devido à menor penetração da luz.

penetração da luz (Lib)

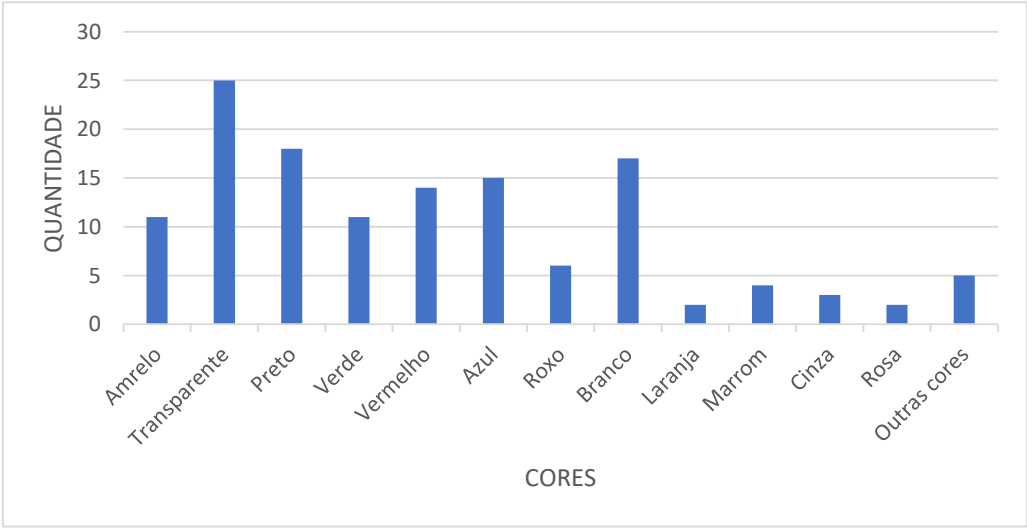
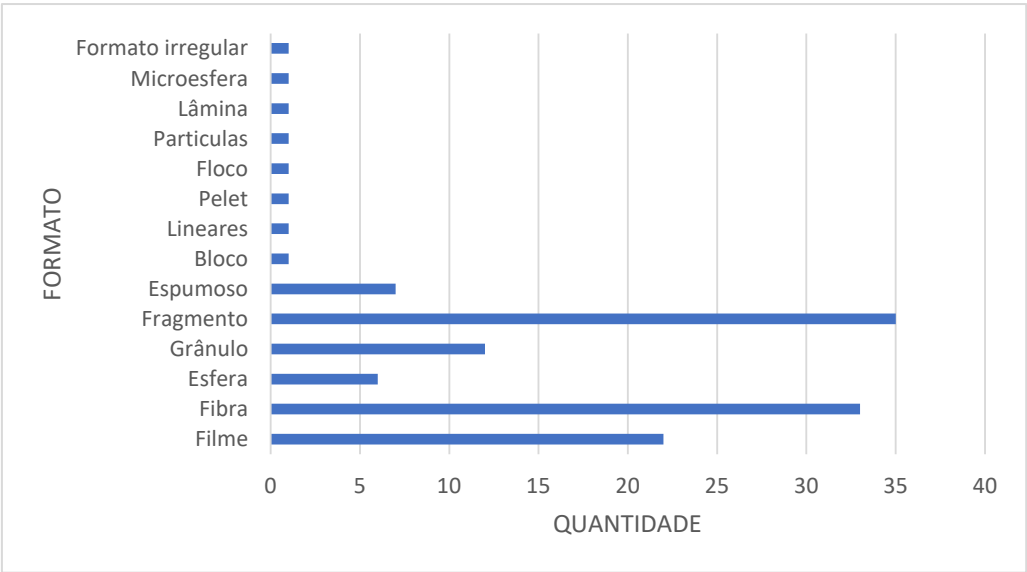
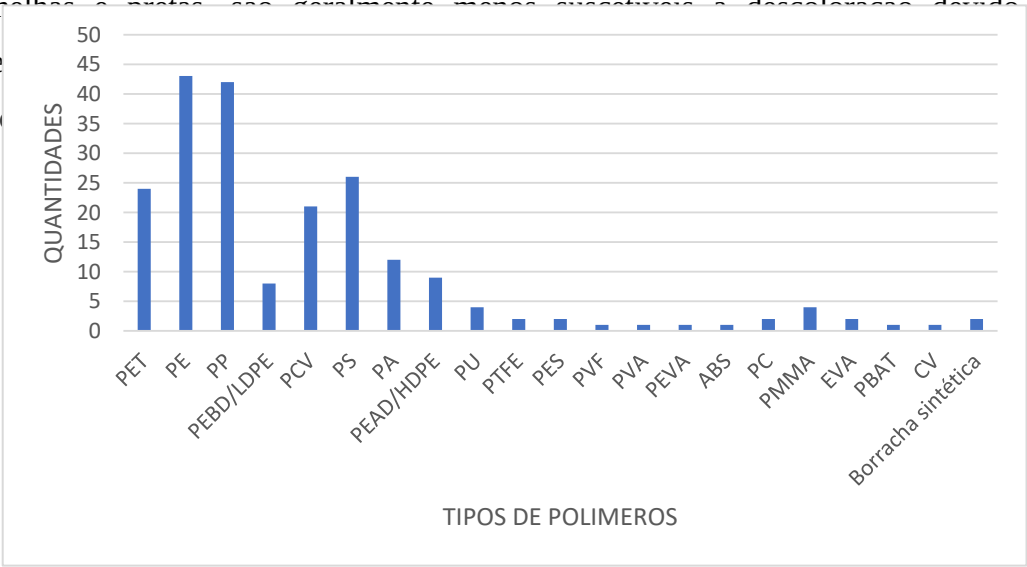


Fig. 9 Principais tipos de polímeros, formas e cores de microplásticos relatados nas publicações selecionadas.

Apesar do crescente interesse na contaminação de solos agrícolas por microplásticos, importantes lacunas de conhecimento permanecem insuficientemente exploradas na literatura científica, particularmente no que diz respeito à relação entre a contaminação e os sistemas de produção agrícola. A maioria dos estudos tem se concentrado em sistemas de cultivo intensivos e extensivos, enquanto modelos de produção alternativos, como sistemas integrados e de consórcio de culturas, permanecem sub-representados. Além disso, os sistemas agroflorestais estão praticamente ausentes da literatura disponível.

Considerando que diferentes práticas de manejo influenciam diretamente o uso de materiais plásticos nas atividades agrícolas, é essencial ampliar as pesquisas sobre sistemas de produção mais sustentáveis. Tais estudos podem contribuir para uma melhor compreensão dos mecanismos que impulsionam a contaminação por microplásticos e ajudar a identificar estratégias de manejo capazes de reduzir a introdução e o acúmulo desses contaminantes nos solos.

4 - CONCLUSÃO

A presente revisão cienciométrica demonstrou que a contaminação por microplásticos em solos agrícolas tornou-se um tema de pesquisa de crescente importância, devido às suas potenciais implicações ambientais. A análise cienciométrica revelou um aumento acentuado nas publicações científicas após 2019, com pesquisas concentradas principalmente na China e focadas predominantemente em sistemas agrícolas intensivos e extensivos.

As evidências disponíveis indicam que os microplásticos podem afetar a qualidade do solo ao alterar propriedades físico-químicas, incluindo a capacidade de retenção de água, o pH e a disponibilidade de nutrientes, comprometendo, assim, a fertilidade do solo e o funcionamento do ecossistema.

Além disso, os microplásticos podem afetar negativamente o desenvolvimento das plantas, inibindo o crescimento, reduzindo a produtividade e interferindo em processos fisiológicos importantes. Seus impactos estendem-se também à biota do solo, afetando organismos terrestres como ciliados, amebas, flagelados, colêmbolos e minhocas, com consequências para o crescimento, a sobrevivência e a reprodução. Tais efeitos podem, em

última análise, comprometer a biodiversidade e o equilíbrio ecológico dos ecossistemas terrestres.

Apesar do crescente volume de pesquisas, permanecem importantes lacunas de conhecimento, particularmente no que diz respeito à ocorrência e aos impactos de microplásticos em sistemas de produção agrícola alternativos. Estudos futuros devem priorizar modelos de produção mais sustentáveis, incluindo sistemas integrados e agroflorestais, que ainda estão sub-representados na literatura científica.

Ampliar o conhecimento científico sobre a ocorrência, o comportamento e os efeitos dos microplásticos em solos agrícolas é essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes. Medidas fundamentais incluem a redução do uso excessivo de materiais plásticos na agricultura, a promoção de alternativas biodegradáveis, o fortalecimento de práticas de gestão ambiental, o aumento da conscientização ambiental e o incentivo a pesquisas voltadas para enfrentar os múltiplos desafios associados à poluição por microplásticos em ecossistemas terrestres.

5- REFERÊNCIA

- Bosker, T et al. Microplastics Accumulate on Pores in Seed Capsule and Delay Germination and Root Growth of the Terrestrial Vascular Plant *Lepidium Sativum* (2019). *Chemosphere* 226, 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Chae, Y., An, Y. J. Current Research Trends on Plastic Pollution and Ecological Impacts on the Soil Ecosystem: A Review. *Environ. Pollut.* (2018). 240, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>
- Chen, Y.; Leng, Y.; Liu, X.; Wang, J. Microplastic pollution in vegetable gardens in the suburbs of Wuhan, Central China. *Environ. Pollut.* **2020**, 257, 113449. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449>
- Cheng, W. L. et al. Quantity and Distribution of Microplastics in Film Mulching farmland Soil of Northwest China. *J. Agro-Environment Sci.* (2020) 39 (11), 2561–2568. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140439>
- Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture. European Union, July 2021, pg 334. Access: [European Commission Environment Archive](https://ec.europa.eu/environment/archives)
- Costa et al. Sistemas Agroecológicos: Escolas da Linha Agroecológica. – Campina Grande: Embrapa Algodão, 2022. PDF (45 p.): il. color. – (Documentos / Embrapa Algodão, ISSN 0103-0205, 287).
- De Souza, A. A; Lau, C. W; Till, J.; Kloas, W.; Lehmann, A.; Becker, R.; Rillig, M.C. Impactos dos microplásticos no ambiente biofísico do solo. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, 52, 9656–9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Sousa, F. D. B. Plastic waste management: a mapping and bibliometric analysis. *Waste Management & Research* 2021, Vol. 39(5) 664–678. <https://doi.org/10.1177/0734242X21992422>
- De Souza Machado et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environ. Sci. Technol.* 53(2019) (10), 6044–6052. 10.1021/acs.est.9b01339. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., Song, Z. Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicol Environ Saf* 211, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111899>
- Gao et al. Macro- and microplastics Meta-analysis Random forest analysis Crop growth Soil health. *Resources, Conservation & Recycling* 186 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106549>
- Ground. *Environ. Sci. Technol.* 53 (19) (2019), 11496–11506. 10.1021/acs.est.9b03304. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- Han, L. H., Xu, L., Li, Q. L., Lu, A. X., Yin, J. W., Tian, J. Y. Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River basin. *Environ. Sci.* 42 (04) (2021), 1781–1790. DOI: [10.13227/j.hjlx.202006186](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202006186)
- Hayes, D. Micro- and Nanoplastics in Soil: Should We Be Concerned? *Biodegrad. Mulch Perform.* Adopt. **2019**, *Relatório nº PA-2019-01*, 1–6. [PDF Oficial da Universidade do Tennessee](https://www.tennessee.edu/research/pdfs/PA-2019-01.pdf).

- He, D et al. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends Anal. Chem.* **2018**, 109, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006>Obtenha direitos e conteúdo.
- He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H., Lü, F. Municipal Solid Waste (MSW) Landfill: A Source of Microplastics? -Evidence of Microplastics in Landfill Leachate. *Water Res.*159(2019), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.060>
- Hernández-Arenas, R.; Beltrán-Sanahuja, A., Navarro-Quirant, P., Sanz-Lazaro, C. The Effect of Sewage Sludge Containing Microplastics on Growth and Fruit Development of Tomato Plants. *Environ. Pollut.*268 (Pt B) (2021), 115779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115779>
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., Svendsen, C. Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities. *Sci. Total Environ.*586(2017), 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- Huerta et al. Incorporation of Microplastics from Litter into Burrows of *Lumbricus Terrestris*. *Environ. Pollut.*220(2017) (Pt A), 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.096>
- Hurley, R.R and Nizzetto, L. Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2018, 1:6–11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>
- Iqbal, B et al. Advancing environmental sustainability through microbial reprogramming in growth improvement, stress alleviation, and phytoremediation. *Plant Stress*(2023b) 10:100283. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100283>
- Jamil, A et al. Global microplastics pollution: a bibliometric analysis and review on research trends and hotspots in agroecosystems. *Environ Geochem Health* (2024) 46:486 <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02274-y>
- Jia et al. Automated identification and quantification of invisible microplastics in agricultural soils. *Science of the Total Environment* 844 (2022). <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156853>
- Li, D.; Peng, G.; Zhu, L. Progress and prospects of research on marine microplastics in China. *Anthr. Coasts* **2019**, 2, 330–339. Doi: [10.1139/anc-2018-0014](https://doi.org/10.1139/anc-2018-0014)
- Li et al. Microplastics Soil pollution Analytical method Transport Ecological risks. *Environmental Pollution* 257 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113570> 0269
- Li, Q. et al. Microplastic Phthalate ester LDIR Plastic films Greenhouse Soil. *Journal of Hazardous Materials* 412 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125164>.
- Liboiron, M. et al. Abundance and types of plastic pollution in surface waters in the Eastern Arctic (Inuit Nunangat) and the need for a science of reconciliation. *Science of the Total Environment*, 782, (2021), 146809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146809>
- Lozano, Y. M. et al. Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology: Volume 58, Issue 5* (2021). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13839>
- Lu, S et al. Impact of water chemistry on surface charge and aggregation of polystyrene microspheres suspensions. *Science of the Total Environment* 630 (2018) 951–959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.296>Get rights and content

Lu. X., Vogt. R. D., Li. H., Han. S., Mo. X., Zhang. Y. China's Ineffective Plastic Solution to Haze. *Science* 364(2019), 1145. [Doi: 10.1126/science.aax5674](https://doi.org/10.1126/science.aax5674)

Lusher. A. L. et al. Is it or isn't it: The importance of visual classification in the characterization of microplastics. *Applied Spectroscopy* 2020, Vol. 74(9) 1139–1153 <https://doi.org/10.1177/0003702820930733>

Mansoor et al. Increased frequency of forest fires in relation to climate change. *Journal of Environmental Management*. Volume 301, January 1, 2022, 113769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>

Medyńska-Juraszek, A.; Szczepańska, A. Microplastic Pollution in EU Farmland Soils: Preliminary Findings from Agricultural Soils (Southwestern Poland). *Agriculture* 2023, 13, 1733. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091733>

Meng. F., Fan. T., Yang. X., Riksen. M., Xu. M., Geissen. V. Effects of plastic cover on the accumulation and distribution of macro and microplastics in soils of two agricultural systems in northwest China. 2020. *PeerJ* 8:e10375. Doi: [10.7717/peerj.10375](https://doi.org/10.7717/peerj.10375)

Moeck, C., Davies, G., Krause, S. et al. Microplastics and nanoplastics in agriculture—A potential source of soil and groundwater contamination?. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologic* 28, 23–35 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00533-2>

Mongil-Manso, J.; Jiménez-Ballesta, R.; Trujillo-González, J.M.; San José Wery, A.; Díez Méndez, A. A Comprehensive Review of Plastics in Agricultural Soils: A Case Study of Castilla y León (Spain) Farmlands. *Land* 2023, 12, 1888. <https://doi.org/10.3390/land12101888>

Okeke, E. S. et al. Microplastics in Agroecosystems-Impacts on Ecosystem Functions and Food Chain. *Resour. Conservation Recycling* 177(2022), 105961. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105961>

Pedrosa. M. G. Culturas Anuais. / NT Editora. -- Brasília: 2014. 161p.: il.; 21,0 X 29,7 cm. ISBN. 1.

Pérez-Reverón, R. et al. Microplastics in Agricultural Systems: Analytical Methodologies and Effects on Soil Quality and Crop Yield. *Agriculture* 2022, 12, 1162. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081162>

Qi. R. et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 703). 2020. Elsevier BV <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134722>

Qi. Y. et al. Macro- and Micro- Plastics in Soil-Plant System: Effects of Plastic Mulch Film Residues on Wheat (*Triticum aestivum*) Growth. *Sci. Total Environ.* 645, (2018). 1048–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229>

Ragoobur. D.; Huerta-Lwanga. E.; Somaroo. G.D. Microplásticos em solos agrícolas, efluentes de águas residuais e lodo de esgoto em Maurício. *Sci. Total Environ.* 2021, 798, 149326.

Rawtani. D., Satish. S., Rao. P. Flame retardancy of nanocomposites with emphasis on halloysite nanotubes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 125(2023), 113. Doi: [10.1016/j.jiec.2023.04.036](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.04.036)

Razera. J.C.C. Contribuições da cienciometria para a área brasileira de Educação em Ciências. *Ciência & Educação* 2016. 22 (3): 557-560. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-731320160030001>

Rillig, M.C., Ingraffia, R. and de Souza Machado AA (2017) Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8:1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

Ruiz, M.A.; Greco, O.T.; Braile, D.M. Fator de impacto: importância e influência no meio editorial, acadêmico e científico. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular* 2009. 24 (3): 273-27. <https://doi.org/10.1590/S0102-76382009000400004>

Saadu I, Farsang, A. Greenhouse cultivation as a source of macroplastic and microplastic contamination in agricultural soils: a case study from southeastern Hungary. *Agrochem Soil Sci* 71(1). 2022:43–57. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00120>;

Sarker, A et al. A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: A global and Bangladesh perspective. *Science of the Total Environment* 733 (2020) 139296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139296>

Shanmugam.D.S., Praveena. S.M., Wahid. S.A., Liew. J.Y.C. Occurrence and characteristics of microplastics pollution in tropical agricultural soils in Klang Valley, Malaysia. *Environ Monit Assess* (2024) 196:144. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12330-w>.

Shafea, L et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 186 (1) 2023. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Souza Machado. A. A. et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>

Viçosi et al. Cienciometria: Análise qualitativa e quantitativa da literature científica global sobre estresse abióticos em *Jatropha curca* L. *Revista Agri. Environmental Sciences*, Palmas-TO, v 4 n 2, 2018. **Doi:** <https://doi.org/10.36725/agries.v4i2.530>

Wan, Y., Wu, C., Xue, Q., & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Total Environmental Science*, 2019, 654, 576–582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123> **Obtenha direitos e conteúdo.**

Wang, F., Wang, Q., Adams, C.A., Sun, Y., Zhang, S. Effects of microplastics on soil properties: current knowledge and future perspectives. *J Hazard Mater* (2022) 424:127531. Doi: [10.1016/j.jhazmat.2021.127531](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531)

Wang, Q.; Adams, C. A.; Wang, F.; Sun, Y.; Zhang, S. Interactions between Microplastics and Soil Fauna: A Critical Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* (2021b), 1–33. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1915035>

Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. Fate and environmental impacts of microplastics in soil ecosystems: progress and perspectives. *Total Environment Science* (2020), 708, 134841 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841>

Yang et al. Microplastics Soil Analytical methodology Sources Risk. *Science of the Total Environment* 780 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.14656>

Yang, W et al. Effects of Microplastics on Plant Growth and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in a Soil Spiked with ZnO Nanoparticles. *Soil Biol. Biochem.* (2021b) 155, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179>

- Yu. H. et al. Microplastic Residues in Wetland Ecosystems: Do They Truly Threaten the Plant-Microbe-Soil System? *Environ. Int.* 156, (2021d). 106708. Doi: [10.1016/j.envint.2021.106708](https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106708)
- Zhang, D et al (2020a). Plastic Pollution in Croplands Threatens Long-term Food Security. *Glob. Change Biol.* 26 (6), 3356–3367. <https://doi.org/10.1111/gcb.15043> **Identificador de Objeto Digital (DOI)**
- Zhang. G.S.; Liu. Y. F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwest China. *Sci. Total Environ.* **2018**, 642, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>
- Zhang, K et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: a review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *Sci. Total Environ.* **2018**, 630, 1641–1653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300>
- Zhao et al. Fate of plastic film waste in agroecosystems and its effects on soil carbon and nitrogen stocks associated with aggregates. *Journal of Hazardous Materials* , **416** , 125954.(2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125954>.
- Zhao, X et al. Comparison of Oil Extraction and Density Extraction Method to Extract Microplastics for Typical Agricultural Soils in China. *Agronomy* 2024, 14, 1193. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061193>.
- Zhou. B. et al. Microplastics in Agricultural Soils on the Coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple Sources Other Than Plastic Mulching Film. *J. Hazard. Mater.* (2020) 388, 121814. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>
- Zhu, D et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition. *Soil Biology and Biochemistry* 116 (2018) 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.027>.

CAPÍTULO II

PREVALÊNCIA DE MICROPLÁSTICOS EM SISTEMA AGROFLORESTAL: UM ESTUDO DE CASO

Este capítulo será submetido a revista *Water, air & Soil Pollution*, como short communication e será formatado de acordo com as normas da revista, disponível no link: <https://link.springer.com/journal/11270/submission-guidelines>

Prevalência de microplásticos em sistema agroflorestal: um estudo de caso.

Olganeth Moreira Oliveira¹, Maria Luiza Souza-Ferreira^{1, 2}, Fabrielle Barbosa Araujo¹, Adrian Oliveira Reis¹, Fernando Antônio Teixeira Mendes³, José Eduardo Martinelli⁴ e Veronica R. L. Oliveira-Bahia^{1*}

1 Instituto de Ciências Biológicas. Laboratório Multidisciplinar de Morfofisiologia Animal. Universidade Federal do Pará.

2 Instituto de Ciências Biológicas. Laboratório Ecotoxicologia. Universidade Federal do Pará.

3 Comissão Executiva ao Plano da Lavoura Cacaueira- CEPLAC

4 Laboratório de Oceanografia Biológica. Centro de Estudos Avançados da Biodiversidade. Universidade Federal do Pará

Resumo

A poluição por plásticos tem se tornado um dos principais desafios ambientais da atualidade. Os microplásticos (MPs) são contaminantes emergentes amplamente distribuídos em ecossistemas aquáticos e terrestres, sendo os solos agrícolas considerados importantes reservatórios dessas partículas. Apesar do crescente interesse científico sobre o tema, ainda são escassos os estudos. Nesse cenário, a presente pesquisa, talvez seja a primeira evidência de microplásticos em solo de sistemas agroflorestais na Amazônia. Logo, o presente estudo teve como objetivo avaliar a ocorrência de microplásticos em solos de sistema agroflorestal e floresta, bem como caracterizar sua morfologia, coloração, tamanho e composição química. As amostras de solo foram coletadas na Estação de Recursos Genéticos José Haroldo (ERJOH), localizada em Marituba, Pará. Os microplásticos foram extraídos por separação densimétrica utilizando solução saturada de NaCl, submetidos à digestão com H₂O₂ e analisados por estereomicroscopia. A composição química das partículas foi determinada por espectroscopia Raman. Os resultados demonstraram a presença de microplásticos tanto na área de sistema agroflorestal com 2,80 partículas g⁻¹ por grama de solo, quanto na área de floresta com 2,33 partículas g⁻¹ por grama de solo, sem diferenças estatísticas significativas entre as áreas. As fibras constituíram o morfotipo predominante e as partículas de coloração azul e transparente as mais frequentes. A análise Raman permitiu identificar polímeros plásticos, além de partículas antropogênicas, corantes e pigmentos industriais. Os resultados evidenciam a presença de microplásticos em ambientes amazônicos com baixa intensidade de manejo, demonstrando a ampla dispersão desses contaminantes no ambiente terrestre, são através da deposição atmosférica, desgastes de materiais sintéticos e insumos, assim reforça-se a necessidade de ampliar as pesquisas sobre sua ocorrência e potenciais impactos em ecossistemas amazônicos.

Palavra-Chaves: Microplásticos; Sistemas agroflorestais; Amazonia; poluição do solo.

1- INTRODUÇÃO:

A poluição plástica é atualmente um problema de grande relevância sob o ponto de vista ambiental e socioeconômico, consequência principalmente da má gestão dos resíduos sólidos. Os plásticos são materiais poliméricos sintéticos leves, impermeáveis, duráveis e de baixo custo, características que favoreceram sua ampla utilização em diversos setores da sociedade (Montagner et al. 2021). Eles são formados por polimerização de matérias-primas orgânicas, principalmente derivada do petróleo e gás.

O plástico não desaparece no meio ambiente, sua decomposição consiste em um processo de sucessivas fragmentações (Gesamp, 2016; Lechthaler et al. 2020). Os plásticos se fragmentam, por meio de processos de degradação natural ou forças externas, como fotodegradação, abrasão mecânica e bioturbação (Hoang et al. 2024)

Os resíduos plásticos são comumente classificados de acordo com o tamanho das partículas de contaminantes plásticos pode ser macroplásticos (≥ 5 mm de diâmetro), mesoplásticos (5 mm–2 cm), microplásticos (< 5 mm de diâmetro) e nanopartículas ($< 1\mu\text{m}$) (Sa'adu & Farsang, 2023). Os microplásticos (MPs) possuem uma origem primária quando produzido para um determinado fim, como a indústria de cosméticos, e uma origem secundária decorrente da decomposição fotolítica, mecânica e degradação biológica (Cole et al. 2011).

A presença desses poluentes passou despercebida ao longo dos anos, e apesar de os impactos ainda não estarem completamente estabelecidos, principalmente em ambientes terrestres, de água doce e mesmo em regiões remotas (Pompêo, 2022). Recentemente, o ambiente terrestre foi reconhecido como a verdadeira fonte e sumidouro de plásticos, especialmente solos agrícolas (Pérez-Reverón et al. 2022).

Nos solos agrícolas, os microplásticos podem ser introduzidos por diferentes vias, incluindo a aplicação de lodo de esgoto, fertilizantes revestidos, irrigação com águas residuais, agroquímicos, deposição atmosférica e a degradação de materiais plásticos utilizados na agricultura, como filmes de cobertura e estufas (Sa'adu & Farsang, 2023). A presença desses contaminantes pode alterar propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, afetando a disponibilidade de nutrientes, a retenção de água, a estrutura do solo e os organismos edáficos.

Na Amazônia, a diversidade de solos é um reflexo dos fatores de formação como relevo, geologia, clima, bióticos e feições da paisagem (Do Vale Junior et al. 2011). Os solos mais representativos na Amazônia Oriental (Amapá, Pará e Tocantins) são os latossolos, argissolos,

gleissolos, plintossolos e o neossolos (Segovia, 2020). Os latossolos são solos em avançados estágio de intemperização, são normalmente muito profundos, fortemente ácidos e bem drenados. Os argissolos são constituídos por material mineral com argila de atividade baixa, são de profundidade variável, são imperfeitamente drenados, de cores avermelhados a amarelados. Os gleissolos são solos muito mal drenados, são formados principalmente a partir de sedimentos, estratificados ou não. Os neossolos são solos que compreendem material mineral ou por material orgânico. Os plintossolos compreendem solos minerais formados sob condições de restrição à percolação da água sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade e mal drenados (Santos et al. 2018).

No Estado do Pará, as principais classes de solos são argissolos, cambissolos, espodossolos, gleissolos, latossolos, neossolos, nitossolos e plintossolos. Porém são os Latossolos e os Argissolos, que cobrem mais de 80% da superfície do estado, nas quais estão assentadas as principais atividades agropecuárias. As principais limitações dessas duas classes de solos (Latosolos e Argilosos) são de natureza química e referem-se à elevada acidez, alta saturação por alumínio e baixa disponibilidade de nutrientes (Gama et al. 2020). Entretanto, já existem tecnologias suficientes no estado que permitem eliminar essas limitações, possibilitando a introdução desses solos no processo produtivo, dentro dos padrões de sustentabilidade (Cravo et al. 2010).

A agricultura desempenha papel fundamental na economia do estado do Pará, destacando-se tanto os sistemas intensivos de produção quanto os sistemas conduzidos por agricultores familiares. Entre estes, os sistemas agroflorestais merecem destaque por integrarem espécies agrícolas, florestais e, em alguns casos, componentes animais em uma mesma área, promovendo maior sustentabilidade ambiental e econômica. Além de contribuírem para a conservação do solo, manutenção da biodiversidade e sequestro de carbono, os sistemas agroflorestais são considerados alternativas de menor impacto ambiental quando comparados a sistemas agrícolas convencionais (CEPLAC, 2022).

Apesar dessas características, tanto os sistemas de produção intensivos quanto os sistemas agroflorestais estão sujeitos à introdução de microplásticos no ambiente, seja pelo uso de insumos agrícolas, irrigação, deposição atmosférica ou outras práticas de manejo. Entretanto, ainda existem poucas informações sobre a ocorrência desses contaminantes em solos amazônicos, especialmente em sistemas agroflorestais. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo de investigar a ocorrência de microplásticos em solos da Amazônia Oriental, comparando áreas de sistema agroflorestal e floresta nativa, bem como caracterizar sua distribuição, morfologia, coloração e composição polimérica.

2- Matérias e Métodos

2.1- Área de Estudo:

A área de estudo compreende a Estação de Recursos Genéticos José Haroldo (ERJOH), localizada nas coordenadas S 1°21'57,80" e W 48°18'10,13", no município de Marituba, a 17 km da BR-316, na Região Metropolitana de Belém (PA), é uma instituição pertencente à Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), Superintendência do Estado do Pará, e ao Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA).

A área de estudo da ERJOH possui 269 ha, adquiridos em 1978, correspondendo, à época, a três lotes de pastagens degradadas. No ano de 1979, deu-se início à implantação da infraestrutura e ao estabelecimento das primeiras atividades de campo, assumindo-se como prioridade o restabelecimento florístico de toda a área, o que foi realizado com sucesso. Atualmente, a Estação possui 200 ha de floresta restaurada, abrigando o maior banco de germoplasma de cacau de que se tem conhecimento.

A ERJOH está sob a influência climática do tipo Af, caracterizado como clima tropical de floresta constantemente úmida, segundo a classificação de Köppen, no qual a pluviosidade do mês mais seco é superior a 60 mm. A temperatura média anual é de 25,9 °C, com valores médios de temperatura máxima e mínima de 31,4 °C e 22,4 °C, respectivamente. A umidade relativa do ar apresenta média anual de 80%, enquanto a insolação anual é de 2.389,4 horas (CEPLAC, 2022).

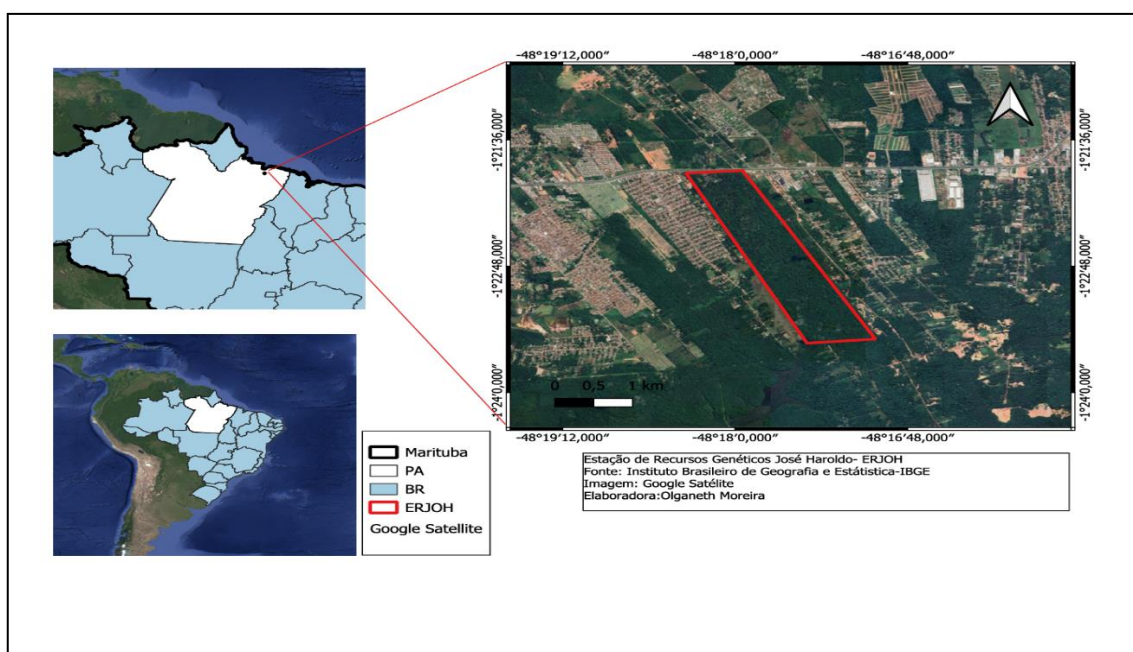


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Olganeth (2025)

2.2- Coleta das amostras:

As amostras de solos das áreas de Sistema Agroflorestal (SAF) e floresta (Figura 2), foram coletadas na Estação de Recursos Genéticos José Haroldo (ERJOH), de acordo com técnicas adaptadas de Wen et al. (2018).

As amostras de solo foram coletadas em duas parcelas de 100 × 100 m, localizadas nas áreas de Sistema Agroflorestal e floresta. Cada parcela foi amostrada por meio de três transectos de 100 m de comprimento, utilizando-se três pontos de amostragem em cada transecto, localizados a 0, 50 e 100 m da borda. Ao todo, foram coletadas dezoito (18) amostras de solo

Utilizou-se um trado sonda de aço inoxidável para a coleta das amostras de solo a 20 cm de profundidade e uma espátula de aço inoxidável para auxiliar na retirada do material. A profundidade de 20 cm foi selecionada por corresponder à camada superficial do solo, onde ocorre maior acúmulo de matéria orgânica e maior influência das atividades de manejo.

As amostras destinadas à análise de microplásticos foram acondicionadas em potes de vidro esterilizados e mantidas sob refrigeração para posterior análise. O material coletado para as análises físico-químicas do solo fora armazenado em saco de papel e identificados (data, hora e área da coleta).



Figura 2- Áreas de coleta. (A) Floresta. (B) Sistema Agroflorestal SAF. Fonte: Olganeth (2025)

2.3- Tratamento e separação das amostras:

Para análise de microplásticos seguiu o fluxograma adaptado de Hu et al. (2018). As amostras de solo foram acondicionadas em recipientes de alumínio tampados e secas em estufa a 40 °C por 72 horas. Após a secagem, as amostras foram peneiradas e pesadas em balança de precisão (Wombel, display LCD, precisão de 0,01 g).

Em seguida, uma solução saturada de 300ml de NaCl, foi adicionada para cada 100g de solo, em béqueres cobertos com papel alumínio, que permaneceram em repouso durante uma noite. Os sobrenadantes foram transferidos para béqueres contendo 30 ml de H₂O₂ a 30%, cobertos com papel-alumínio e mantidos por seis dias. Após esse período, as soluções foram filtradas, com uso de filtros de celulose (47mm x 0,22µm), em bomba a vácuo (Primatec, modelo 131, 2 cv), e os filtros contendo as partículas foram preservados em placas de Petri de vidro, cobertas com papel-alumínio e devidamente identificadas para análises posteriores.

2.4 – Identificação visual das amostras:

Os filtros resultantes da filtragem das amostras foram cuidadosamente examinados e registrados utilizando um estereomicroscópio Leica M205C equipado com uma câmera Leica 170 HD. As leituras dos filtros foram realizadas por meio da divisão destes em quadrantes, iniciando-se da esquerda para a direita e alternando o sentido ao final de cada quadrante, garantindo uma contagem mais precisa das partículas e evitando duplicidades. As partículas foram fotografadas e medidas, utilizando o software do estereomicroscópio o LAS X, considerando-se seus formatos e colorações.

2.5- Análise no espectro Raman

As análises dos espectros Raman foram realizadas pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Para a obtenção dos espectros Raman, foi utilizado o equipamento LabRAM HR Evolution (HORIBA), empregando lasers com diferentes comprimentos de onda (473 nm, 532 nm, 633 nm e 785 nm) e uma objetiva de longo alcance de 50× (NA = 0,7). A resistência de cada material foi testada sob diferentes níveis de potência de cada laser, com o objetivo de obter o melhor sinal espectral sem danificar as amostras.

Foi utilizada uma posição inicial no espectrômetro que permitia a observação dos picos da região de identificação dos polímeros (*fingerprint*), em torno de 1600 cm^{-1} . Para a aquisição final dos espectros, utilizou-se a região espectral de 200 cm^{-1} a 3200 cm^{-1} , permitindo a observação tanto da região característica de *fingerprint* dos polímeros quanto da região de estiramento C-H. A identificação dos compostos presentes nos espectros foi realizada utilizando a base de dados do software KnowItAll®.

2.6- Análises do Ph e Granulométrica:

As análises de pH e granulometria do solo foram realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental, seguindo os procedimentos descritos no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (2ª ed., Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2009) e no Manual de Métodos de Análise de Solo (3ª ed. revista e ampliada, Brasília, 2017).

2.7- Controle de contaminação:

Com o objetivo de reduzir eventuais contaminações cruzadas, foram adotadas e adaptadas as medidas recomendadas por Prata et al. (2021) e Grillo et al. (2022). Todas as precauções foram tomadas para evitar qualquer tipo de contaminação: (1) durante as análises, todos os materiais utilizados eram de aço inoxidável ou vidro; (2) antes e após cada etapa, todos os instrumentos eram lavados com água destilada bifiltrada e cobertos com papel-alumínio; (3) foi mantida a restrição de circulação de pessoas no laboratório; e (4) durante as atividades de campo e laboratório foram utilizadas vestimentas de algodão (jaleco e touca), além da utilização de amostras-controle (branco) para comprovar a ausência de contaminação das amostras.

2.8- Análise Estatística:

O teste estatístico utilizado foi o teste t de Student, empregado para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias das áreas de floresta e sistema agroflorestal quanto à prevalência de partículas de microplásticos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o ambiente de programação R (v.4.3.0).

3- Resultados e Discussão:

A abundância de microplásticos entre as áreas de floresta e sistema agroflorestal não apresentou diferença significativa na profundidade de 0–20 cm, conforme ilustrado na Figura 3. Dessa forma, a hipótese nula (H_0) foi aceita, indicando que não houve diferença estatística entre as áreas avaliadas quanto à ocorrência de microplásticos.

A área de floresta apresentou média de $0,23 \pm 2,33$ partículas g^{-1} de solo, enquanto a área de sistema agroflorestal apresentou média de $0,38 \pm 2,80$ partículas g^{-1} de solo.

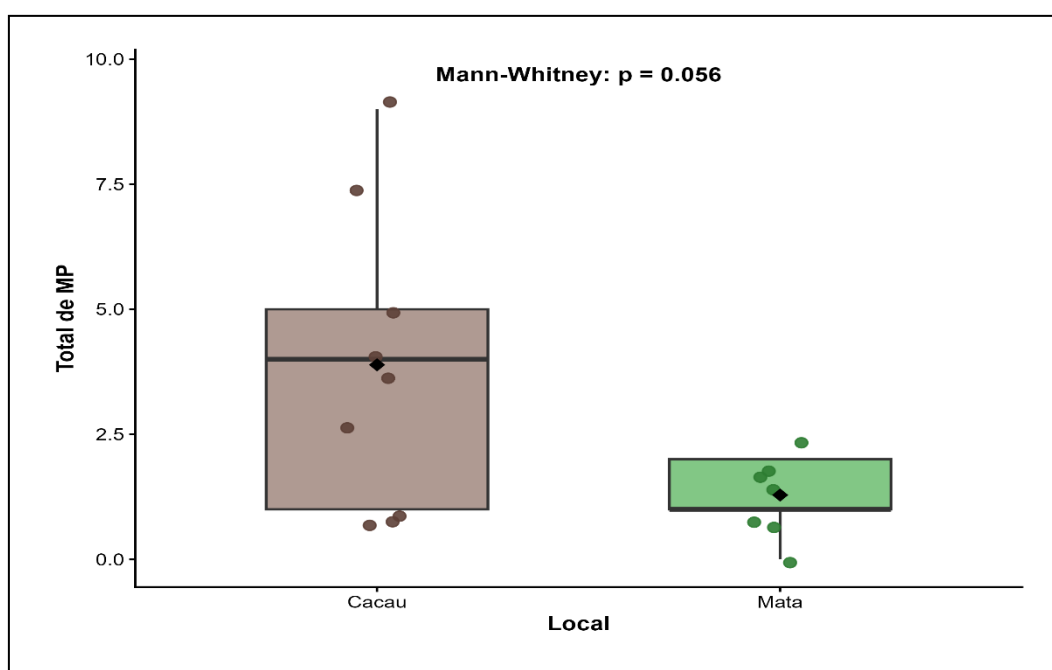


Figura 3- Presença de partículas de MPs nas áreas SAF e Floresta(mata).

Quanto à coloração das partículas, foram identificadas partículas pretas, azuis, verdes, vermelhas e transparentes (Figura 4), sendo as cores azul e transparente as mais representativas em ambas as áreas.

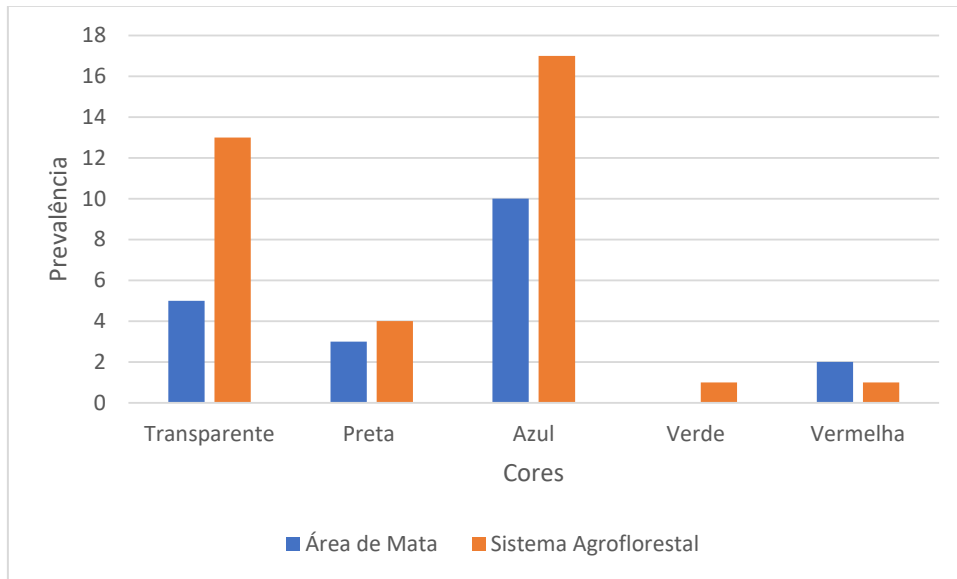


Figura 4- Cor das partículas encontradas nas áreas.

Em relação ao formato dos microplásticos, os tipos mais frequentes foram fibras e fragmentos (Figura 5). No entanto, a área de sistema agroflorestal apresentou maior concentração de fibras. Quanto aos fragmentos, ambas as áreas apresentaram concentrações semelhantes (Figura 6).

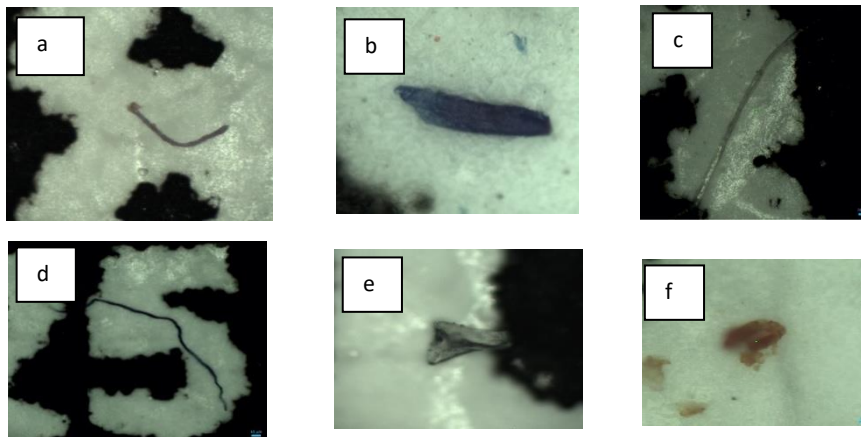


Figura 5- Formas das Partículas: (a,c,d)- fibras; (b,e,f) fragmentos. Fonte: IPEN (2026).

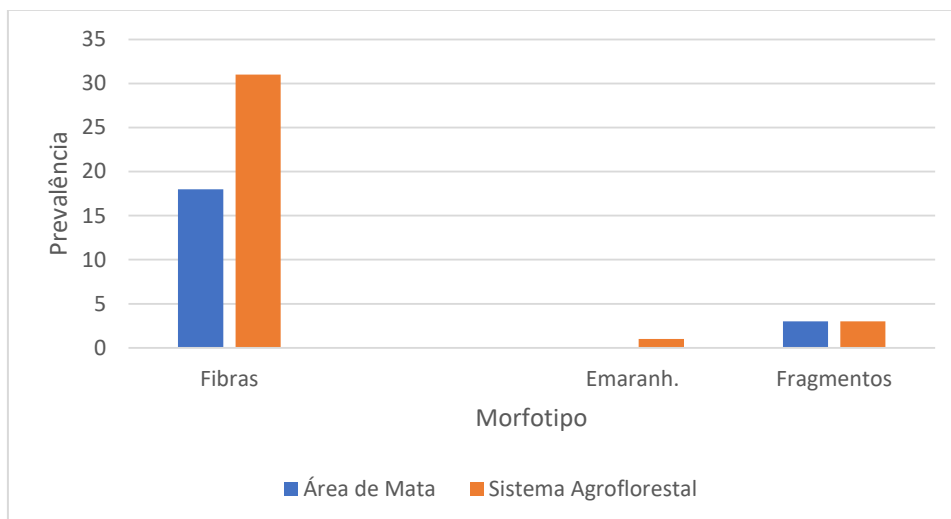


Figura 6- Morfotipos das partículas encontradas por área.

Quanto ao tamanho das partículas, estas foram categorizadas de acordo com o morfotipo, a cor e a quantidade, conforme ilustrado na Tabela 1. Para o morfotipo fibra, foram identificadas partículas nas cores verde, vermelha, preta, transparente e azul. A cor verde foi representada por apenas uma partícula, com tamanho de 1157,36 μm . Entre as demais cores, a azul apresentou a maior frequência, com 23 partículas, seguida do transparente, com 17 partículas, da preta, com 6 partículas, e da vermelha, com 3 partículas.

O menor tamanho observado para partículas do tipo fibra variou de 97,04 μm a 729,60 μm , enquanto os maiores tamanhos variaram de 1157,91 μm a 7043,95 μm . Para o morfotipo fragmento, observou-se maior ocorrência de partículas na cor azul, com 4 partículas, enquanto a cor preta foi representada por apenas uma partícula, com tamanho de 156,83 μm . Para os fragmentos azuis, o menor e o maior tamanho observados foram de 79,24 μm e 156,83 μm , respectivamente.

Por meio da análise Raman, os materiais presentes nas amostras foram identificados como polímeros plásticos, contaminantes, corantes e pigmentos industriais, frequentemente utilizados na fabricação de canudos, tubulações, papel, vestuário, acessórios, copos plásticos, esponjas, detergentes e outros produtos industriais. Não foi possível identificar alguns polímeros devido à presença de pigmentos, bem como ao reduzido tamanho e à qualidade de determinadas amostras.

Com base nos resultados obtidos, os materiais identificados foram categorizados em quatro grupos: plásticos, partículas antropogênicas (corantes, índigo-carmim e pigmentos orgânicos sintéticos), celulose e outros (minerais, compostos químicos e substâncias orgânicas), conforme apresentado na Figura 7.

Tabela 1- Caracterização das partículas encontrados nas áreas de estudos.

Morfortipo	Cor	Nº (partículas)	Menor tamanho (µm)	Maior tamanho (µm)	Tamanho médio (µm)	Desvio padrão
Fibra	verde	1	1157,36	1157,36	1157,36	
	Vermelho	3	344,25	2272,22	1015,77	639.74
	Preta	6	237,09	7043,95	1932,95	888.04
	Transparente	17	97,04	2569,65	1333,02	743.66
	Azul	23	729,6	1153,91	936,57	723.36
Fragmento	Preto	1	156,83	156,83	156,83	
	Azul	4	79,24	361,97	174,605	647.02

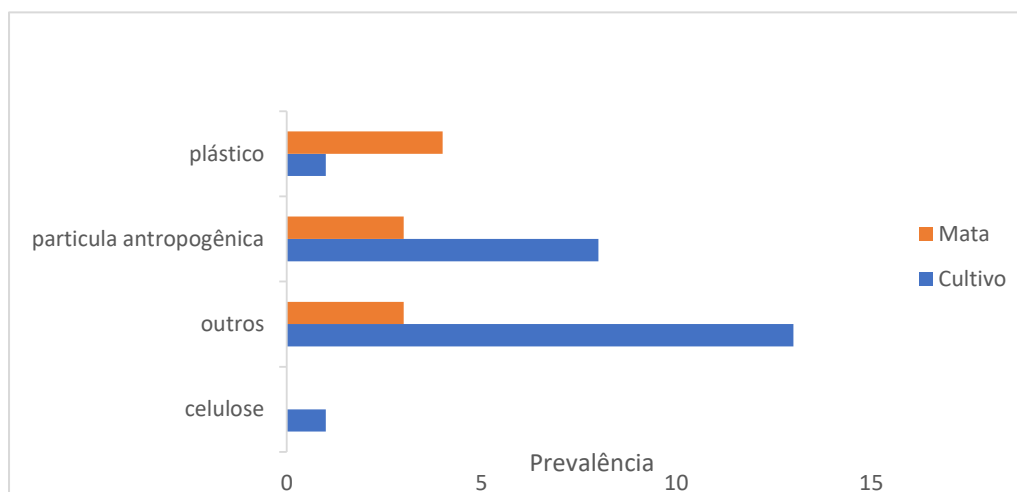


Figura 7 – Classificação das amostras pela espectroscopia Raman.

A concentração dos contaminantes no sistema agroflorestal (SAF) apresentou 57% de partículas classificadas como "outros", 35% de partículas antropogênicas e 4% de plásticos e celulose, conforme ilustrado na Figura 8. Na área de floresta, foram observados 40% de plásticos, 30% de partículas antropogênicas e 30% de partículas classificadas como "outros" (Figura 8). A maior parte dessas partículas corresponde a aditivos incorporados aos materiais plásticos, como corantes e pigmentos.

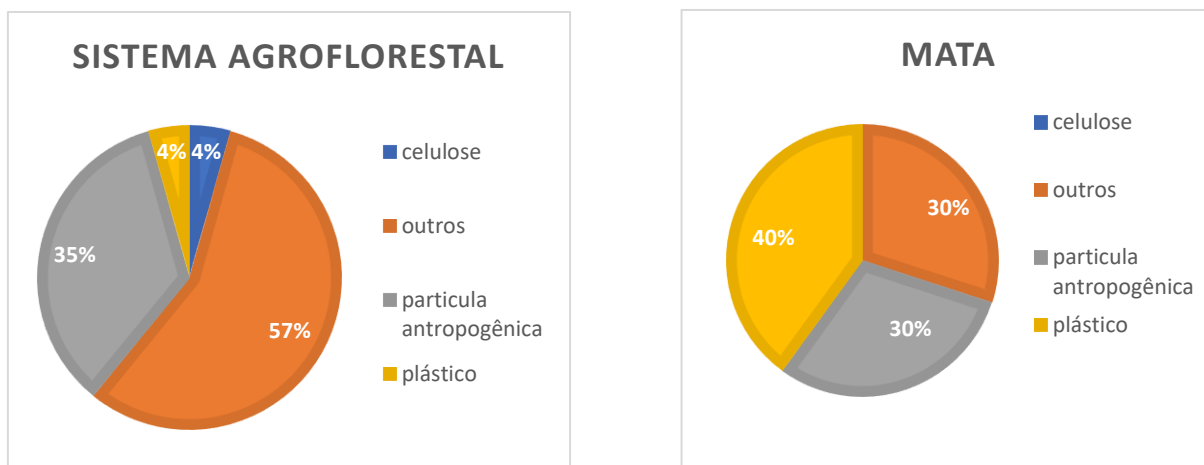


Figura 8- Concentração das Partículas no SAF e Mata.

Na análise granulométrica dos solos das áreas estudadas, a fração silte apresentou menor proporção no sistema agroflorestal em comparação à área de floresta (Figura 9). Em relação ao pH, ambas as áreas apresentaram valores ligeiramente ácidos, com médias de 5,1 para a floresta e 5,6 para o sistema agroflorestal, características compatíveis com solos ácidos, como os Latossolos Amarelos (Figura 10).

Quando avaliada a relação entre a presença de microplásticos e as características físicas e químicas do solo, não foram observadas diferenças significativas entre as áreas estudadas.

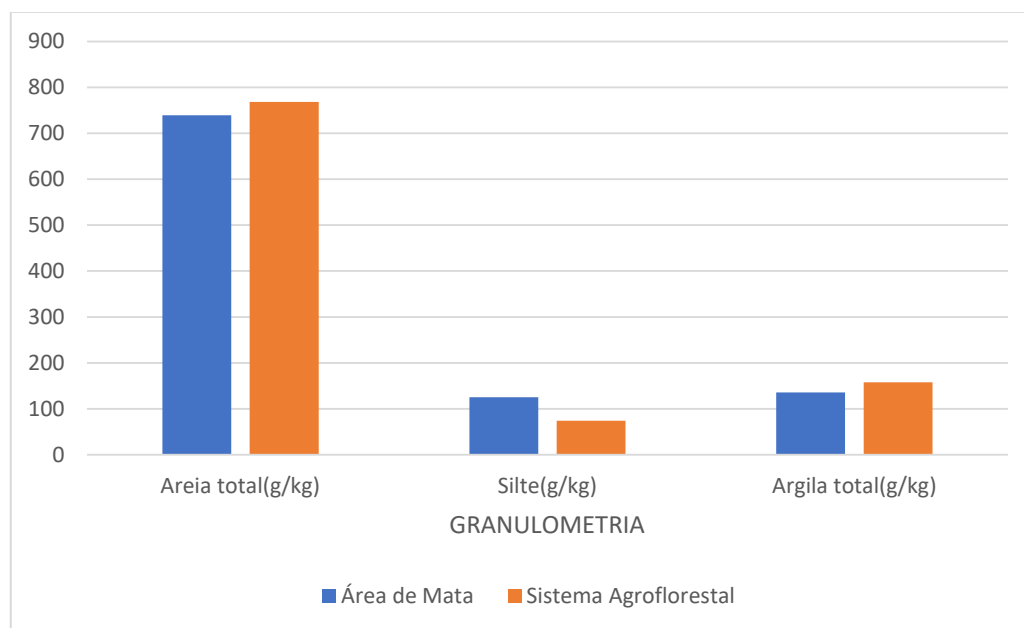


Figura 9- Granulométrica do solo entre as áreas de mata e SAF

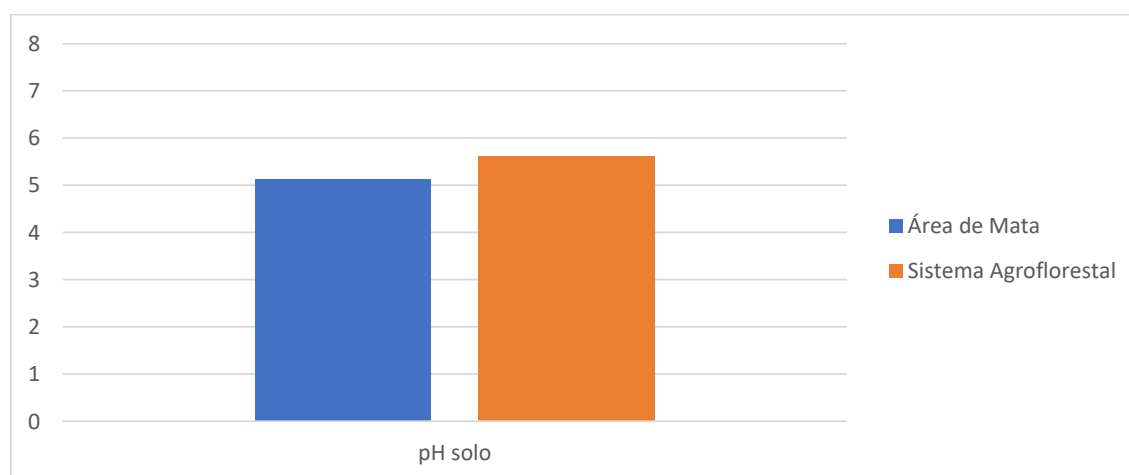


Figura 10- pH do solo nas áreas de estudo.

A análise realizada revelou que a quantidade de microplásticos encontrada nas áreas estudadas foi inferior à reportada em grande parte da literatura. Xu et al. (2022), ao compararem áreas florestais e agrícolas, observaram concentrações mais elevadas de microplásticos em florestas primárias e secundárias, registrando valores médios de 0,63 partículas g^{-1} de solo. Em contrapartida, os autores verificaram um aumento superior a cem vezes na abundância desses contaminantes em áreas submetidas ao cultivo intensivo de banana e seringueira. Segundo os autores, esse aumento expressivo está diretamente relacionado às práticas de manejo adotadas e à intensidade do sistema produtivo.

Outros resultados foram observados por Huang et al. (2021), que encontraram concentrações variando entre 9,8 e 40,8 partículas g^{-1} em solos cultivados com milho, batata, tabaco e hortaliças. Da mesma forma, Zhang e Liu (2018) registraram concentrações médias de 18,8 partículas kg^{-1} em solos agrícolas e florestais. O acúmulo de partículas plásticas nesses ambientes está frequentemente associado ao manejo agrícola, uma vez que a introdução de microplásticos pode ocorrer por meio da aplicação de fertilizantes, irrigação, deposição atmosférica e degradação de resíduos plásticos utilizados durante as atividades agrícolas (Zhang e Liu, 2018; Xu et al. 2022).

Nos sistemas de produção intensivos e extensivos, diversos materiais plásticos são utilizados ao longo do ciclo produtivo, incluindo coberturas agrícolas, embalagens, estufas, bandejas para mudas e tubulações de irrigação (He et al. 2018; Zhang e Liu, 2018; Hayes, 2019). Frequentemente, parte desses materiais permanece no ambiente após o uso, sofrendo processos de degradação física, química e biológica que resultam na formação de microplásticos. A presença dessas partículas pode provocar alterações em atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Lian et al. 2020; Qi et al. 2020).

Os sistemas agroflorestais (SAFs), por sua vez, constituem sistemas de uso da terra que integram culturas agrícolas e espécies arbóreas em uma mesma área de produção, promovendo maior sustentabilidade ambiental e produtiva. Em geral, esses sistemas tendem a demandar menores quantidades de fertilizantes químicos, defensivos agrícolas e materiais plásticos quando comparados aos sistemas agrícolas convencionais (MAPA, 2020). Esse padrão de manejo pode contribuir para explicar as menores concentrações de microplásticos observadas neste estudo. Portanto, a menor concentração de microplásticos observada também pode estar associada ao histórico de restauração ambiental da área estudada e ao predomínio de cobertura vegetal permanente, características que reduzem a necessidade de práticas agrícolas intensivas e do uso recorrente de materiais plásticos.

As formas mais comuns de microplásticos incluem grânulos, esferas, fibras e partículas (Lusher et al. 2020), além de filmes, espumas e fragmentos (Lozano et al. 2021). No presente estudo, as fibras constituíram o morfotipo predominante, corroborando os resultados observados em outros trabalhos desenvolvidos em solos agrícolas e florestais (Zhang e Liu, 2018; Xu et al. 2022; Kato et al. 2026).

A predominância de fibras em ambientes terrestres pode estar relacionada à deposição atmosférica, ao desgaste de materiais sintéticos e à degradação de resíduos plásticos presentes no ambiente. Essas partículas apresentam elevada capacidade de dispersão, podendo ser

transportadas por longas distâncias e depositadas mesmo em áreas com baixa interferência antrópica (Weber e Bigalke, 2025).

A distribuição das cores dos microplásticos também pode fornecer informações importantes sobre suas possíveis fontes de origem (Yu et al. 2021). Neste estudo, os microplásticos de coloração azul foram os mais frequentes, seguidos pelos transparentes, pretos e vermelhos. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Xu et al. (2022), que registraram a ocorrência de partículas azuis, amarelas e verde-azuladas em diferentes tipos de solo.

Os microplásticos coloridos podem ser originados de diversos materiais, incluindo fibras têxteis sintéticas, embalagens plásticas, cordas e outros produtos de consumo (Zhang et al., 2020). Além disso, a presença de partículas com diferentes colorações sugere a ocorrência de diversos tipos de corantes e pigmentos associados aos materiais plásticos, o que pode representar uma fonte adicional de contaminantes para o solo (Xu et al. 2022).

O tamanho é uma característica importante dos microplásticos, influenciando diretamente seu transporte no ambiente e sua interação com a biota (Revel et al. 2018). Em geral, quanto menor o tamanho das partículas, maior sua capacidade de penetrar nos poros do solo e maior o potencial de interação com os organismos do solo (Zhang e Liu, 2018).

No presente estudo, a maior parte dos microplásticos apresentou tamanho inferior a 2 mm e superior a 150 μm . Elevadas concentrações de partículas de menor tamanho podem aumentar sua disponibilidade para os organismos do solo por meio da ingestão, além de ampliar seu potencial como vetores de contaminantes e patógenos em ambientes terrestres (Zhang e Liu, 2018).

O acúmulo de microplásticos em solos agrícolas pode comprometer importantes funções ecossistêmicas (Jia et al. 2022), promovendo alterações nas propriedades físicas e químicas do solo. Estudos demonstram que essas partículas podem influenciar o pH (Yang et al. 2021) e modificar a estrutura do solo (Zhao et al. 2021). Ao se incorporarem à matriz edáfica, os microplásticos podem interferir na composição e nas propriedades naturais do solo, afetando processos essenciais ao funcionamento do ecossistema (Sajjad et al. 2022).

Entretanto, neste estudo não foram observadas relações significativas entre a ocorrência de microplásticos e os atributos físicos e químicos avaliados, como granulometria e pH do solo. Esse resultado pode estar relacionado às baixas concentrações de partículas encontradas nas áreas estudadas, possivelmente insuficientes para promover alterações detectáveis nas características físico-químicas dos solos avaliados.

Os microplásticos são constituídos por diferentes polímeros produzidos por meio de reações de polimerização de monômeros, podendo conter aditivos potencialmente tóxicos e monômeros não reagidos. Entre os principais aditivos utilizados na fabricação desses materiais destacam-se retardantes de chama, corantes, plastificantes e estabilizantes (Kumar et al., 2020). Após a exposição prolongada às condições ambientais, esses compostos podem ser gradualmente liberados no solo, contribuindo para efeitos negativos sobre suas funções ecológicas e sobre a diversidade microbiana (Yu et al. 2022).

Os resultados obtidos neste estudo corroboram essa perspectiva, uma vez que a análise Raman permitiu identificar, além de partículas plásticas, a presença de corantes e pigmentos industriais associados a materiais de origem antropogênica. A ocorrência desses compostos evidencia que a contaminação do solo não está restrita apenas aos polímeros plásticos, mas também aos aditivos incorporados durante os processos de fabricação, os quais podem aumentar a complexidade dos impactos ambientais associados aos microplásticos (Kato et al. 2026).

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que, mesmo em ambientes com baixa intensidade de manejo, como sistemas agroflorestais e áreas de floresta, a presença de microplásticos e de compostos antropogênicos associados evidencia a ampla dispersão desses contaminantes no ambiente terrestre, reforçando a necessidade de ampliar os estudos sobre sua ocorrência e potenciais impactos em ecossistemas amazônicos.

4- Conclusão:

O presente estudo confirmou a presença de microplásticos tanto na área de floresta quanto no sistema agroflorestal da ERJOH. Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas entre as áreas avaliadas, os resultados demonstraram a presença predominante de fibras e fragmentos, com destaque para as partículas de coloração azul e transparente. As concentrações de microplásticos encontradas foram inferiores às reportadas em estudos realizados em sistemas agrícolas intensivos, sugerindo que práticas de manejo menos intensivas podem contribuir para uma menor introdução e acúmulo de microplásticos no solo.

A análise Raman permitiu identificar não apenas polímeros plásticos, mas também partículas antropogênicas, corantes e pigmentos industriais, demonstrando que a contaminação ambiental associada aos microplásticos vai além dos próprios polímeros. Além disso, não foram observadas relações significativas entre a ocorrência de microplásticos e os atributos físicos e químicos do solo avaliados. Dessa forma demonstram que, mesmo em ambientes com baixa intensidade de manejo, como sistemas agroflorestais e áreas de floresta, a presença de microplásticos e de compostos antropogênicos associados evidencia a ampla dispersão desses contaminantes no ambiente terrestre, seja pela deposição atmosférica, pelo fluxo intenso de carros na rodovia, poeira doméstica e ao desgaste de materiais sintéticos. Logo, reforça-se a necessidade de ampliar novos estudos sobre sua ocorrência e potenciais impactos em solos agrícolas e em diferentes classes de solos na Amazônia.

5- Referências:

Amato-Lourenço, L. F.; Galvão, L. S.; Weger, L. A.; Hiemstra, P. S.; Vijiver, M. G.; Mauad, T. An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *Science of the Total Environment*, v. 749, n. 20, 2020. Disponível em: . doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141676

Beaurepaire, M.; Dris, R.; Gasperi, J.; Tassin, B. Microplastics in the atmospheric compartment: a comprehensive review on methods, results on their occurrence and determining factors. *Current Opinion in Food Science*, v. 41, p. 159-168, 2021. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.010>>. doi: 10.1016/j.cofs.2021.04.010

Brandon, J., Goldstein, M., Ohman, M.D. Aging and long-term degradation of microplastic particles: comparison of in situ and experimental ocean weathering patterns. *Mar Pollut Bull* (2016).110(1):299–308. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.048>

Canevarolo Jr., Sebastião V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros -- São Paulo: Artliber Editora, 2013.

Chen, G.; Feng, Q.; Wang, J. (a). Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans. *Science of the Total Environment*, v. 703, n. 10, 2020a. Disponível em:. 10.1016/j.scitotenv.2019.135504

Choi, Y.R.; Kim, Y.N.; Yoon, J.H.; Dickinson, N.; Kim, K.H. Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of the city of Yeosu, Republic of Korea. *J. Soils Sediments* **2021**, 21, 1962–1973.

Cole, M.; et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**. Volume 62, Issue 12, 2011.

De'Armitt e Cestari. O paradoxo dos plásticos - fatos para um futuro melhor. Veja discussões, estatísticas e perfis dos autores desta publicação: (2022) <https://www.researchgate.net/publication/359230136>

Cravo, M. S.; Viégas, I. J. M.; Brasil, E. C. (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado Pará. 1. ed. rev. e atual. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010. 262 p.

Da Silva, F.H.B.B., Silva, M.S.L., Cavalcanti, A. C. Descrição das principais classes de solos. Ministério da agricultura, pecuária e do abastecimento – Mapa- Empresa brasileira de

pesquisa agropecuária – EMBRAPA- Centro nacional de pesquisa de solos – CNPS-Unidade de execução de pesquisa e desenvolvimento de recife - UEP/Recife- setembro/2005.

Gama et al. Solos do estado do Pará. Embrapa (2020) <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127233>

Gesamp, Joint group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection. Sources, fate and effects of microplastic in the marine environment: part 2 of a global assessment. Disponível em: Kershaw, P.J. (Ed), **Rep. Stud. GESAMP No. 90 (96 pp)**, 2016.

Guo et al. Organic fertilizer and irrigation water are the primary sources of microplastics in the facility soil, Beijing. *Science of the Total Environment* 895 (2023) 165005.

Hayes, D. Micro e nanoplásticos no solo: devemos nos preocupar? *Biodegrad. Mulch Perform. Adopt.* **2019**, *Relatório nº PA-2019-01*, 1–6.

He, D.; Luo, Y.; Lu, S.; Liu, M.; Song, Y.; Lei, L. Microplastics in Soils: Analytical Methods, Pollution Characteristics and Ecological Risks. *TrAC Trends Anal. Chem.* **2018**, 109, 163–172.

Hoang et al. Sources, environmental fate, and impacts of microplastic contamination in agricultural soils: A comprehensive review. *Science of the Total Environment* 950 (2024) 175276

Huang, B. Abundance and distribution characteristics of microplastic in plateau cultivated land of Yunnan Province, China. *Environmental Science and Pollution Research* (2021) 28:1675–1688

Jia et al. Automated identification and quantification of invisible microplastics in agricultural soils. *Science of the Total Environment* 844 (2022). <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156853>

Junior, C.R.P. et al. Solos do Brasil: gênese, classificação e limitações ao uso. *Ciências Exatas e da Terra: Conhecimentos Estratégicos para o Desenvolvimento do País* (2020).

Kato, E.; Zainab Katima, Rahul Dandautiya, Rwaichi Minja, Ecological risk assessment of microplastics in urban farmland soils. A case of Mabibo Bonde la Mchicha Farm, Dar es Salaam, Tanzania. *Scientific African*. Volume 32. (2026). <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2026.e03293>.

Kumar, M;X. Xiong, M. He, D.C.W. Tsang, J. Gupta, E. Khan, S. Harrad, D. Hou, Y.S. Ok, N.S. Bolan Microplastics as pollutants in agricultural soils Environ. Pollut., 265 (2020), Article 114980, [10.1016/j.envpol.2020.114980](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980)

Lechthaler, S. et al. The way of macroplastic through the environment. **Environments** – MDPI, 7 (10), 1-30, 2020

Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., Su, L., & Liu, W. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.).*Journal of Hazardous Materials*(2020), 385. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620>

Liboiron. M. et al. Abundance and types of plastic pollution in surface waters in the Eastern Arctic (Inuit Nunangat) and the need for a science of reconciliation. *Science of the Total Environment*, 782, (2021), 146809.

Liu, M et al. Microplastic and mesoplastic pollution in agricultural soils in the suburbs of Shanghai, China. *Poluição Ambiental*, (2018).242, 855–862.

Manual técnico do cacauzeiro para a Amazônia Brasileira. Reimpressão. Belém-PA, CEPLAC/SUEPA,2022.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cartilha de boas práticas na lavoura cacauzeira no estado do Pará / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. – Belém: Mapa/CEPLAC, 2020. 64 p.: il.

Montagner et al. Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. **Química Nova**, [s. l.], v. 44, p. 1328–1352, 2021.

Montenegro, M.; Vianna, M.; Teles, B. D.; Atlas do Plástico: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos/-- 1. ed. -- Rio de Janeiro: Fundação Heirich Böll, 2020.

Moreira, F. M.S. et al. O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal. Lavras: Ed. UFLA,2013. 352p.

Napper, I.E., Thompson, R.C. Environmental deterioration of biodegradable, oxo-biodegradable, compostable and conventional plastic bags in the sea, soil and outdoors over a period of 3 years. *Environ Sci Technol*(2019). 53(9):4775–4783. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06984>

O'Connor, D., Pan, S., Shen, Z., Song, Y., Jin, Y., Wu, W., Hou, D. (2019) Microplastics undergo accelerated vertical migration in sandy soil due to their small size and cycles of wetting and drying. *Environ Pollut* (2019) 249:527–534

Pérez-Reverón et al. Recycled wastewater as a potential source of microplastics in irrigated soils from an arid-insular territory (Fuerteventura, Spain). *Science of the Total Environment* 817 (2022) 152830.

Pompêo, M.; *Microplásticos nos ecossistemas*: São Paulo, SP: Instituto de Biociências, 2022.

Prata, J.C., Reis, V., da Costa, J.P., Mouneyrac, C., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T., 2021. Contamination issues as a challenge in quality control and quality assurance in microplastics analytics. *J. Hazard. Mater.* 403 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.12366>

Qi. R., Jones. D. L., Li. Z., Liu. Q., Yan. C. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review. n *Science of the Total Environment* (Vol. 703). 2020. Elsevier BV <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134722>

Radford et al. Agricultural soils and microplastics: Are biosolids the problem? *Frontiers in Soil Science* (2023). DOI 10.3389/fsoil.2022.941837

Revel, M.; A. Châtel , C. Mouneyrac Micro(nano)plastics: a threat to human health? *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, 1 (2018), pp. 17-23

Rezaei, M., Riksen, M.J.P.M., Sirjani, E., Sameni, A., Geissen, V. Wind erosion as a transport factor for low-density microplastics. (2019). *Sci Total Environ* 669:273–281

Rodrigues, R.A.S., *Ciência do solo: Morfologia e gênese*- Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A.2018. 264p.

Sajjad, M., Huang, Q., Khan. S., Khan, M.A., Liu, Y., Wang, J., Lian, F., Wang, Q., Guo, G. Microplastics in the soil environment: a critical review. *Environ Technol Innov* (2022) 27:102408. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Sa'adu and Farsang. Plastic contamination in agricultural soils: a review. *Environmental Sciences Europe* (2023) 35:13 <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00720-9>

Santos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos** / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.356 p.: il. color.; 16 cm x 23 cm. ISBN 978-85-7035-800-4

Segovia, J.F.O., **Floricultura Tropical: Técnicas e inovações para negócios sustentáveis na Amazônia**. – Brasília, DF: Embrapa, 2020.PDF (211 p.). ISBN 978-85-7035-890-5.

Serra, W. S. e Sodré, G. A. 2021. Manual do cacauicultor: perguntas e respostas. Brasil. Ilhéus, BA, CEPLAC/CEPEC. Boletim Técnico, nº 221. 190p.

Shidharan, S.; Kumar, M.; Singh, L.; Bolon, N.S.; Saha, M. Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 418, 2021. Disponível em: doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126245

Shinzato, E., Teixiera, W.G., Mendes, A.M. Geodiversidade do Estado de Rondônia. Parte 4: Solos- Repositório Alice 2010- Embrapa- <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/945258>

Wang, J et al. Distinct distributions of microplastics in soils of different land use types: a case study of Chinese agricultural lands. *Poluição Ambiental*, (2021).269 , 116199.

Weber, C.J., Bigalke, M. Forest soils accumulate microplastics through atmospheric deposition. *Commun Earth Environ* **6**, 702 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02712-4>

Xiang, Y., Jiang, L., Zhou, Y., Luo, Z., Zhi, D., Yang, J., & Lam, S.S. Microplastics and environmental pollutants: key interaction and toxicology in aquatic and soil environments. *Journal of Hazardous Materials*,(2022) 422 , 126843.

Xu, G.; Lei Yang, Li Xu, Jie Yang. Soil microplastic pollution under different land uses in tropics, southwestern China. *Chemosphere*. Volume 289, (2022) <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133176>.

Yang et al. Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment* 780 (2021) 146546.

Yang, W et al. Effects of Microplastics on Plant Growth and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in a Soil Spiked with ZnO Nanoparticles. *Soil Biol. Biochem.*155(2021b), 108179. 10.1016/j.soilbio.2021.108179

Yang, X et al. Pollution Characteristics and Risk of Microplastics in Soils Related with Land-Use Type. *Water Air Soil Pollut* (2025) 236:388 <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08015-w>

- Yu, H., Zhang Y., Tan, W., Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci* (2022). 10:855292. doi: 10.3389/fenvs.2022.855292
- Yu, L.; J.D. Zhang, Y. Liu, L.Y. Chen, S. Tao, W.X. Liu Distribution characteristics of microplastics in agricultural soils from the largest vegetable production base in China. *Sci. Total Environ.*, 756 (2021), p. 143860
- Zhang. G.S.; Liu. Y. F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwest China. *Sci. Total Environ.* **2018**, 642, 12–20.
- Zhang, S.; Yang, X.; Gertsen, H.; Peters, P.; Salánki, T. Geissen, V. A simple method for extracting and identifying low-density microplastics from soil. *Sci. Total Environ.* **2017**, 616–617.
- Zhang, S. L.; X. Liu, X.H. Hao, J.Q. Wang, Y. Zhang. Distribution of low-density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China. *Sci. Total Environ.*, 708 (2020), p. 135091
- Zhao, X.; Liu. Z.; Zuo. J.; Cai. L.; Liu. Y.; Han. J.; Zhang. M. Comparison of Oil Extraction and Density Extraction Method to Extract Microplastics for Typical Agricultural Soils in China. *Agronomy* 2024, 14, 1193. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061193>

ANEXOS

Microplastics in terrestrial ecosystems: a Microplastics in Terrestrial Ecosystems: A Scientometric Analysis of Their Occurrence and Impacts in Agricultural Soils

Olganeth Moreira Oliveira¹, Maria Luiza Souza-Ferreira^{1, 2}, Fabrielle Barbosa

Araujo¹, Adrian Oliveira Reis¹, Fernando Antônio Teixeira Mendes³, José

Eduardo Martinelli⁴ e Veronica R. L. Oliveira-Bahia^{1*}

1. Institute of Biological Sciences. Multidisciplinary Laboratory of Morphophysiology Animal. Federal University of Pará. Pará. Brazil
2. Institute of Biological Sciences. Ecotoxicology Laboratory. Federal University of Pará. Pará. Brazil
3. Executive Committee for the Cocoa Farming Plan – CEPLAC. Pará. Brazil.
4. Laboratory of Biological Oceanography. Center for Advanced Studies of Biodiversity. Federal University of Pará. Pará. Brazil.

* Corresponding author vrlo@ufpa.br

Abstract

Microplastic pollution has reached alarming levels across all ecosystems. The terrestrial environment, particularly agricultural soils, deserves special attention due to its importance for food production and the intensive use of plastic materials in agricultural activities. In this context, we collected scientometric data related to different indicators, evaluating temporal trends in publications and citations, the origin of articles and authors, the journals and publishers that concentrate the largest number of publications in this field, as well as the most frequently used keywords. Furthermore, we identified key research aspects, such as land-use types, the most studied crops, production systems, management practices, impacts on plants, soil, and soil microfauna, as well as the characterization of microplastics according to polymer type, shape, and color in

agricultural soils. The results demonstrated a significant increase in research on this topic in recent years, highlighting the growing scientific concern regarding the environmental risks associated with plastic pollution in terrestrial ecosystems. Therefore, these findings contribute to future studies on microplastic pollution in agricultural soils by identifying major research gaps and knowledge needs.

Keywords Microplastics; Agricultural soils; Bibliometric analysis; Soil pollution.

1. INTRODUCTION:

Society has evolved and so has plastic. It has become an integral part of daily life, providing greater practicality, convenience, safety, and protection in activities that have become easier using different types of plastic materials. However, the increasing demand for and production of plastics, associated with inadequate waste management practices, has contributed to the persistent accumulation of plastic waste in the environment (De Sousa et al., 2021; Sun et al., 2022).

Plastic materials that remain in the environment gradually fragment into smaller particles known as microplastics (MPs), with sizes ranging from 1 μm to 5 mm, through physical, chemical, and biological processes (Zhao et al., 2024). These particles accumulate in the environment and can cause various adverse effects on biota. Most studies on microplastics have focused on marine environments, whereas terrestrial ecosystems remain relatively understudied, despite being recognized as important sources and reservoirs of these contaminants (Qi et al., 2020).

Among the components of terrestrial ecosystems, soil is recognized as one of accumulation and retention of microplastics, and their presence may pose a threat to soil

health and ecosystem functioning (Boots, Russell & Green, 2019). Once present in the soil environment, microplastics can alter physicochemical properties such as bulk density, water retention capacity, and nutrient cycling (Boots, Russell & Green, 2019; Yang et al., 2021). In addition, they may affect soil microorganisms by modifying patterns of microbial community structure, differentiation, and succession (Mao et al., 2020; Feng et al., 2022).

Studies indicate that the main sources of microplastics in soils include domestic wastewater, agricultural activities, tire wear, urban waste, and household refuse (Nizzetto, Futter & Langaas, 2016). Agricultural areas can represent important reservoirs of microplastics, as these contaminants may enter the soil through various pathways, including plastic mulching, the application of organic fertilizers, irrigation practices, and atmospheric deposition (Jia et al., 2022). Furthermore, microplastics have been shown to influence soil pH, apparent density, microbial communities, and water retention capacity, consequently affecting plant growth and development (de Souza Machado et al., 2019; Shafea et al., 2023).

Worldwide, researchers have sought to identify and understand the potential effects associated with the presence of microplastics in agricultural soils (Jamil et al., 2024). In this context, scientometric analysis has emerged as an important tool for evaluating the development of scientific research activities (Chae et al., 2018; Viçosi et al., 2018; Qi et al., 2020). According to Ruiz et al. (2009), scientometrics consists of the quantitative analysis of scientific and technological production, aiming to measure and understand scientific activity. This approach is useful for evaluating the state of the art, identifying trends and patterns, and assessing the development of scientific literature, thereby providing valuable insights for future research. Thus, scientometric studies are essential for evaluating scientific production through numerical indicators and statistical

analyses, increasing the robustness and reliability of the information obtained (Razera, 2016).

In the present study, scientometric analysis was used to explore the global scientific literature on microplastics in agricultural soils, with the aim of identifying publication growth and the main research trends in this field. This approach enabled the systematization of information regarding the number of publications, leading journals, most influential authors, keyword clusters, the most frequently studied agricultural crops, soil types, and the effects of microplastics on plants, soils, and soil-dwelling organisms. In addition, the most commonly reported polymers were evaluated according to their type, shape, and color. This study is expected to contribute to a broader understanding of the occurrence of microplastics in agricultural soils and their associated environmental impacts.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Search Strategy and Review Methodology

To ensure a comprehensive bibliographic survey, searches were conducted in the Scopus and Web of Science (Core Collection) databases, which are recognized as two of the most comprehensive sources of scientific literature in the environmental field. The systematic review was carried out following the guidelines of the PRISMA protocol (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Panic et al., 2013).

The searches were performed using specific terms related to the study topic, combined through Boolean operators. The search strategy adopted in both databases was as

follows: ("agricultural soil*" OR "agricultural ecosystem*" OR "cultivated soil*" OR "cropland soil*") AND (microplastic* OR "plastic polymer" OR plastic*)

Regarding the time frame, articles published between January 2010 and July 2025 were considered. The following inclusion criteria were applied: (i) studies addressing microplastic contamination in agricultural soils; (ii) original research articles based on field-collected soil samples; and (iii) full-length articles published in international scientific journals. Additionally, the following exclusion criteria were defined: (i) editorial letters, book chapters, technical reports, theses, dissertations, and conference abstracts; (ii) articles with unavailable full text; and (iii) studies published in languages other than English.

The selection process was based on the evaluation of titles and abstracts, as illustrated in the flowchart shown in Figure 1. Bibliographic data management, duplicate removal, and the extraction and organization of the selected references were performed using the RefManageR package (v. 1.4.0) in the R statistical environment (v. 4.3.0).

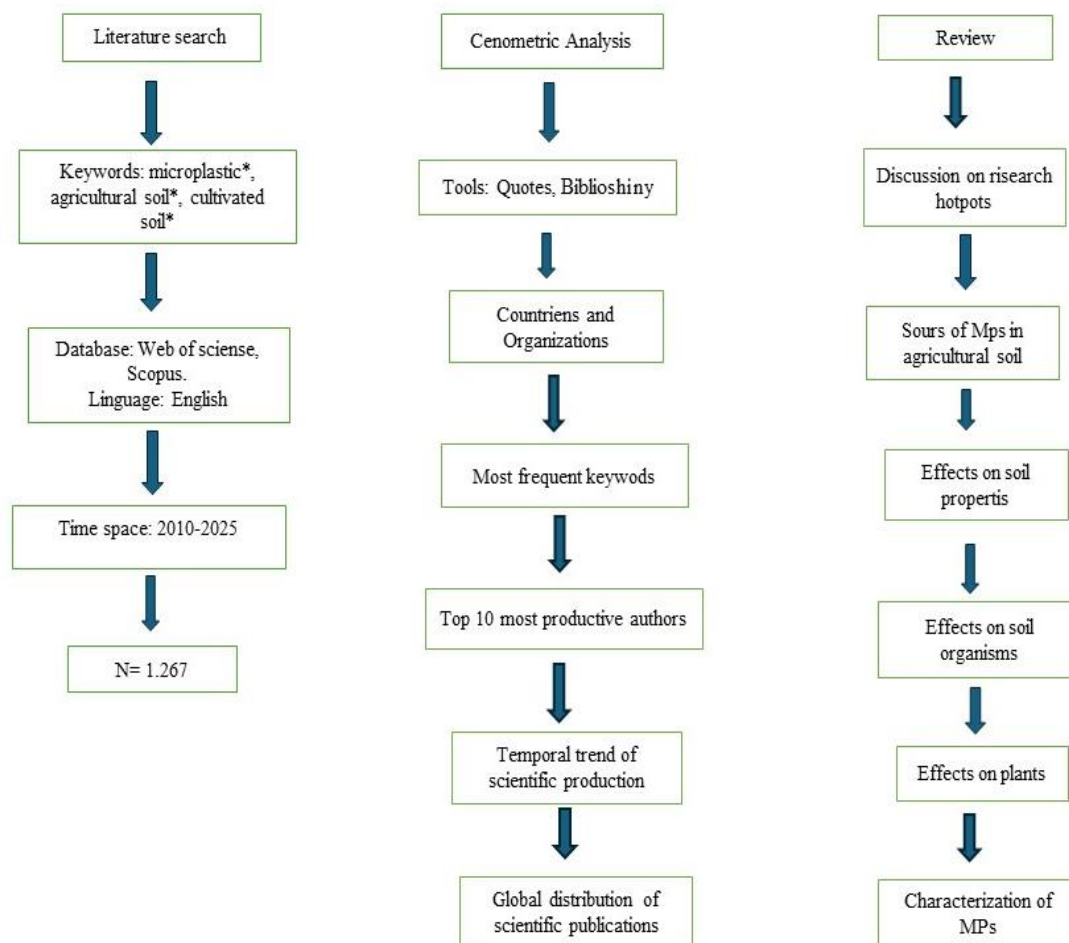


Fig. 1 Flowchart illustrating the study selection process, adapted from Jamil et al.

(2024)

2.2. Scientometric and Systematic Data Analysis

With a focus on microplastics, this study aimed to comprehensively review the scientific literature addressing the presence of these contaminants in agricultural soils, as well as their effects on soil, plants, and the main polymers identified in cultivated areas.

After article selection, bibliographic data were extracted from the databases for scientometric analysis, which was conducted based on the criteria proposed by Vinkler (2010), with adaptations. The following aspects were evaluated: (1) temporal evolution of publications; (2) most frequent keywords; (3) authors' productivity; (4) global distribution of publications; and (5) leading journals. All analyses were performed using the Bibliometrix package in the R statistical environment (v. 4.3.0).

For the systematic review, the selected articles were analyzed according to the following aspects: (1) land-use type; (2) crop type; (3) production system; (4) management system; (5) soil type; (6) effects of microplastics on soil; (7) effects of microplastics on soil organisms; (8) effects of microplastics on plants; and (9) polymer characterization, including type, shape, and color. The remaining information was organized into spreadsheets for qualitative analysis (Supplementary Material).

3. RESULTS AND DISCUSSION

After searching the bibliographic databases, 1,324 documents were retrieved from the Web of Science (WoS) and 1,591 from Scopus. Following the removal of duplicate records, 1,267 documents remained eligible for analysis. However, after the complete screening process, 170 articles met the inclusion and exclusion criteria established in this review and addressed microplastics in agricultural soils and their effects on the soil ecosystem.

The scientometric analysis of the selected articles highlighted the growing relevance of this topic within environmental research. In 2016, the number of publications began to increase more noticeably; however, a substantial rise was observed in 2019, when publication output exhibited exponential growth. This marked increase in scientific production reflects the growing interest of researchers in this field

(Jamil et al. 2024). In subsequent years, up to 2024, the number of publications continued to increase, demonstrating the sustained scientific interest in the complexity and global implications of this topic. Although a slowdown in publication growth was observed in 2023 and 2024, this does not necessarily indicate a decline in scientific interest. For 2025, the analysis included only studies published up to July. Even so, the number of publications had already approached the levels recorded in 2023 and 2024, further emphasizing the increasing concern regarding microplastic contamination in terrestrial environments (Figure 2).

Agricultural and urban soils represent important environmental reservoirs of microplastics, comparable in significance to marine ecosystems (Hurley and Nizzetto, 2018; Li et al., 2021; Jamil et al., 2024). In agricultural systems, a wide variety of plastic materials are used during production, including plastic mulches, packaging materials, greenhouse coverings, seedling trays, and irrigation pipes, many of which are frequently discarded in the field after use (Zhang and Liu, 2018; de Souza Machado et al., 2018; Hayes, 2019).

The presence of microplastics in agricultural soils has attracted increasing attention from both the scientific community and society due to the still poorly understood risks associated with their persistence in soil environments and their potential transfer through the food chain (Medyńska-Juraszek & Szczepańska, 2023).

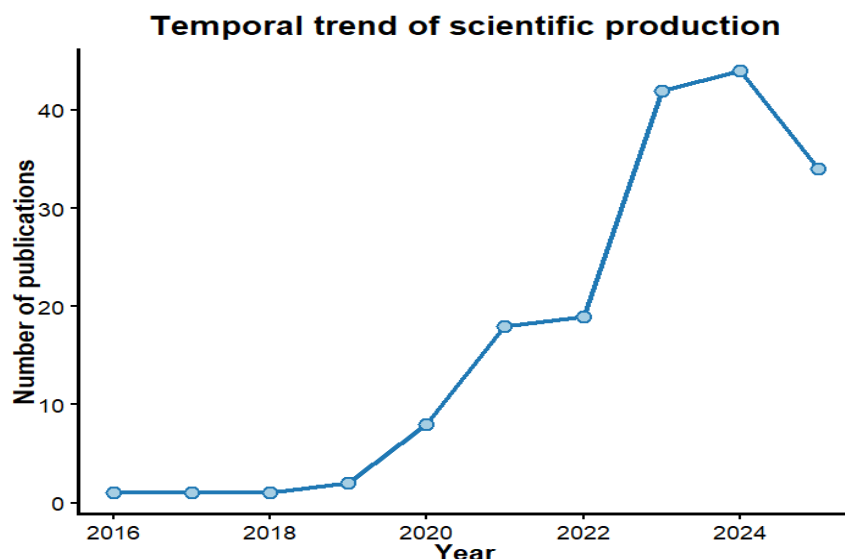


Fig. 2 Annual trend of publications on microplastics and agricultural soil

Of the 170 articles selected, the most frequently used keywords and the main research topics explored over the last fifteen years were identified. Among the keywords, "microplastics" showed the highest frequency of occurrence, highlighting its role as the central focus of research in this field. Other frequently occurring terms included "pollution," "agricultural soil," "water," "plastic," and "degradation."

The high frequency of the keyword "microplastics" is directly related to the increasing global concern regarding contamination by these particles, which has been reported even in remote regions worldwide (Li et al., 2021). Despite the growing number of studies, the occurrence of microplastics in soils remains poorly understood, particularly with respect to their environmental fate, behavior, and toxicity within terrestrial ecosystems (Li et al., 2021).

Another important aspect of the analysis was the geographical distribution of scientific publications. The results showed that Asia and Europe are the regions with the highest concentration of scientific studies related to this topic. Among the countries, China stood out with the highest average number of citations per article (5,910),

followed by the Czech Republic (1,154), South Korea (526), and the United States (524).

In addition, the analysis identified the ten countries with the highest scientific output in this field over the fifteen-year study period. China ranked first, followed by India and Germany. The United States and Australia occupied the fourth and fifth positions, respectively. Brazil ranked sixth, ahead of countries such as Spain, South Korea, the Netherlands, and Austria.

The analysis also highlighted the leading authors in terms of scientific productivity on this topic worldwide. Among the ten most productive researchers, Chinese authors occupied the top positions, further demonstrating China's prominent role in advancing research on microplastics in agricultural soils (Figure 3).

China's predominance in scientific publications related to microplastics in agricultural soils may be associated with both environmental concerns arising from high levels of microplastic pollution and substantial investments in scientific research (Moeck et al., 2023). As one of the world's largest producers and consumers of plastic materials, effective management of plastic pollution has become a major environmental challenge.

Studies have demonstrated that microplastic contamination affects a wide range of ecosystems in China, including freshwater systems and marine environments such as estuaries and lakes (Zhang et al., 2018; Li et al., 2019). Investments in research are therefore essential to improve the understanding of the extent of this contamination and its ecological and health-related impacts. Furthermore, such efforts contribute to the development of public policies and technological solutions aimed at mitigating the

environmental risks associated with microplastic pollution (Zhang et al., 2018; Li et al., 2019; Moeck et al., 2023).

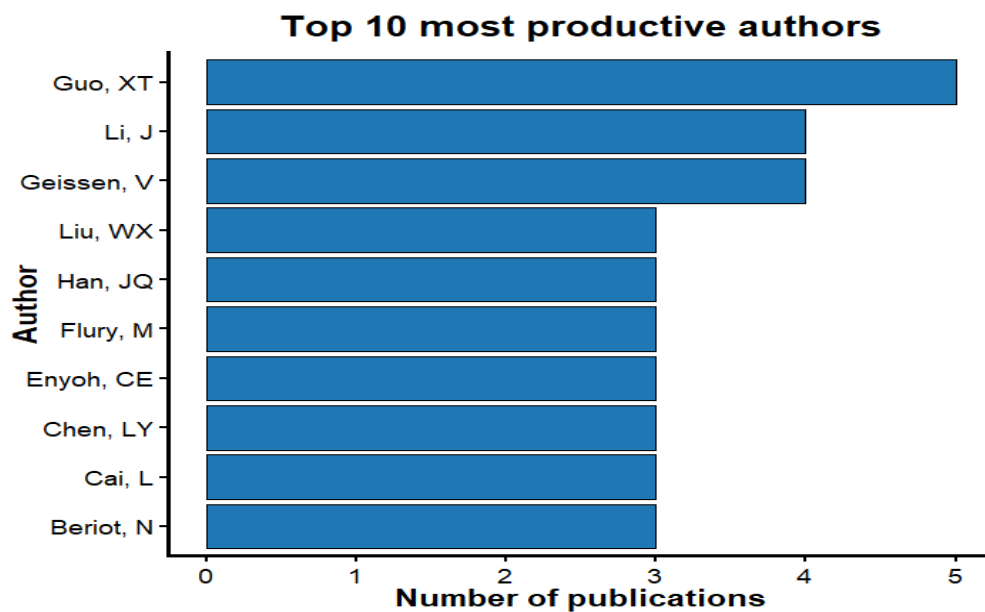


Fig. 3 Authors with the highest number of articles published in international journals

Another relevant point refers to scientific journals with the highest number of publications on microplastics in agricultural soils. The ten leading journals in terms of publication output are presented in Figure 4. Most of these journals have high impact factors and are widely indexed in international databases, such as Web of Science and Scopus, which contribute to greater visibility and dissemination of research findings.

Among the journals with the highest number of publications, *Science of the Total Environment*, *Environmental Pollution*, and *Journal of Hazardous Materials* stand out. All three journals are published by Elsevier, highlighting a strong concentration of

scientific output within major international publishing groups. In addition to Elsevier, publishers such as Springer Nature, MDPI, and the American Chemical Society also play a significant role in the dissemination of research on this topic.

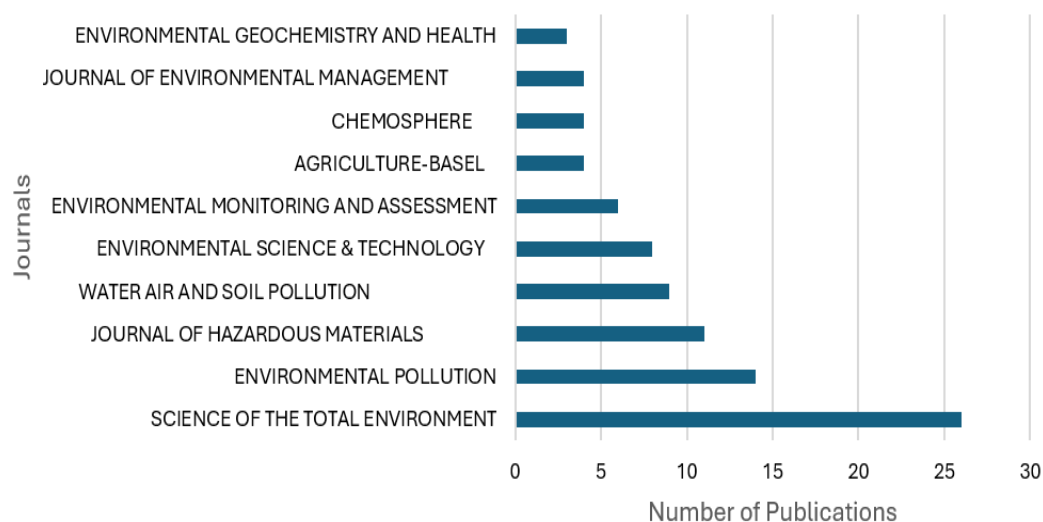


Fig. 4 Journals with the highest number of publications on microplastics in agricultural soils

Among the crops most frequently reported in the publications, *Oryza sativa* (rice) was the most common, with 13 occurrences, followed by vegetables in general, with 12 records, and *Triticum* sp. (wheat), with 11 occurrences (Figure 5).

The prominence of rice and wheat cultivation in the literature may be related to the importance of these cereals in the global food supply, particularly in Asian countries such as China, where both crops constitute staple foods for a large proportion of the population (FAO, 2023). Furthermore, these crops have relatively short production cycles, generally completed within one year, requiring frequent soil preparation, fertilization, sowing, irrigation, and other agricultural management practices. Such activities often involve the use of plastic materials, contributing significantly to the

generation and accumulation of microplastics in agricultural environments (Pedrosa, 2014).

In areas traditionally devoted to intensive agriculture, the use of plastic products has become a common practice (He et al., 2018; Zhang and Liu, 2018; de Souza Machado et al., 2019; Hayes, 2019). Continuous management of these areas increases the likelihood of microplastic transfer from soil to agricultural crops, thereby raising the potential for human exposure to these contaminants through the food chain (Gao et al., 2022). Indeed, agricultural activities are among the most important sources of plastic inputs into soils, although their contribution is often underestimated due to the difficulty of quantifying these residues in terrestrial environments (Mongil-Manso et al., 2023).

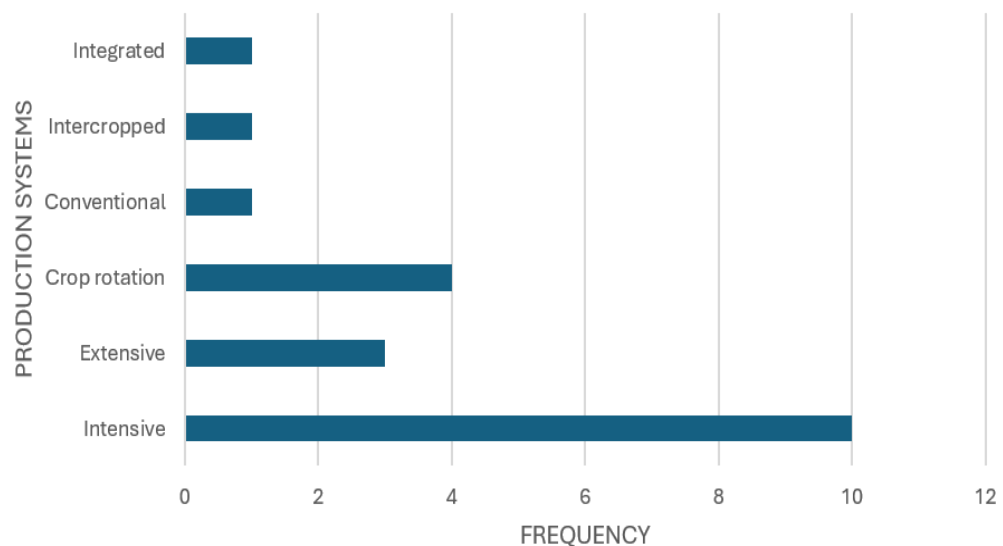
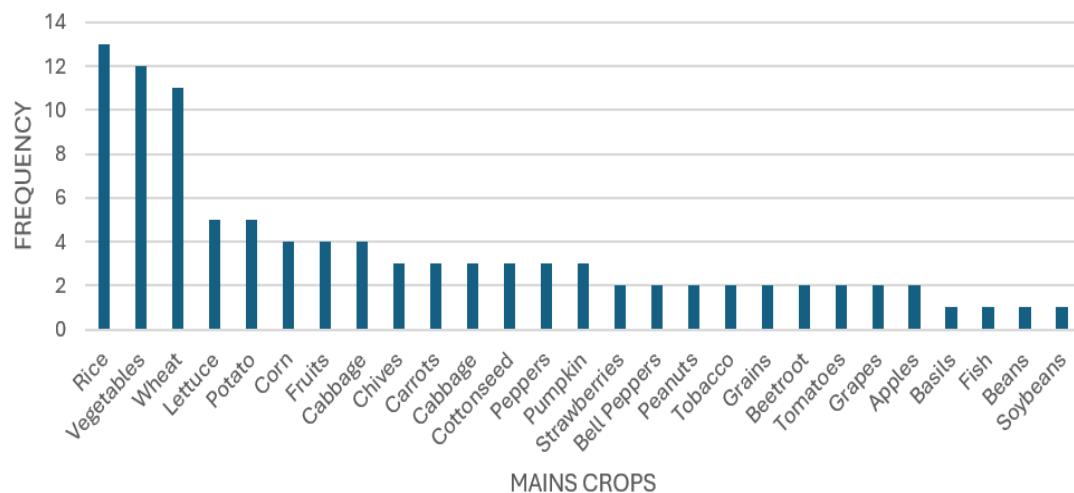


Fig. 5 Frequency of the main crops and production systems reported in the selected publications

The agricultural production system was another aspect highlighted in our analysis (Figure 5). Among the studies reviewed, intensive farming systems were the most frequently reported. These systems are characterized by the use of advanced technologies in relatively small areas, aiming to maximize productivity through the increased use of agricultural inputs for pest and disease control. In contrast, extensive farming systems were the second most frequently reported, typically occurring over large land areas and characterized by lower technological investment and varying levels of labor utilization (Krajewski et al., 2003). Crop rotation ranked third among the agricultural production systems identified in the selected studies. This sustainable agricultural practice is based on the regular and planned alternation of different crop species within the same area over time (Duarte Junior and Coelho, 2010).

Conventional, intercropping, and integrated systems ranked fourth, fifth, and sixth, respectively. Conventional systems involve traditional soil management practices, such as plowing and harrowing (Embrapa, 2010). Intercropping systems are characterized by the simultaneous cultivation of two or more plant species within the same agricultural area during the same growing period (Hirakuri et al., 2012). In turn, integrated systems, widely known as Integrated Crop–Livestock–Forestry Systems (ICLF), consist of a production strategy that combines agricultural, livestock, and forestry activities within the same area (Costa et al., 2022).

Different agricultural production systems favor distinct management practices and, consequently, contribute to the introduction of plastic contaminants with different characteristics and compositions into the soil. Among the main sources associated with microplastic generation are plastic mulching, the application of soil amendments and

fertilizers, agricultural packaging waste, plastic films, wastewater irrigation, and surface runoff processes (He et al., 2019; Lu et al., 2019; Chen et al., 2020; Zhou et al., 2020; Han et al., 2021; Meng et al., 2020; Okeke et al., 2022; Sa'adu and Farsang, 2022).

Our research clearly highlighted this scenario, identifying irrigation, plastic mulching, sewage sludge, wastewater, plastic films, and organic fertilizers as the main management practices associated with the introduction and accumulation of microplastics in agricultural systems (Figure 6). Huang et al. (2020) found that soils exposed to plastic mulch films for extended periods contained higher concentrations of microplastics, reaching 1075.6 ± 346.8 particles kg^{-1} of soil. Similarly, Dahl et al. (2021) reported an increase in microplastic accumulation in surface soil layers following the intensification of agricultural activities in the study area, with an average concentration of 3819 particles kg^{-1} of soil.

The use of agricultural tools, equipment, and materials made from plastic has become virtually unavoidable in modern agriculture. Over time, these materials undergo weathering and degradation, releasing microplastics into agricultural soils (Gao et al. 2022).

Microplastics can enter agricultural soils through various pathways, including the degradation of plastic films, irrigation with wastewater, atmospheric deposition, and tire wear resulting from friction with road surfaces. In addition, these particles may be transported by wind and deposited in agricultural environments (Zhao et al. 2024). Once introduced into terrestrial ecosystems, microplastics can migrate through the soil via different processes, including leaching, bioturbation, and mechanical disturbances (Li et al., 2020).

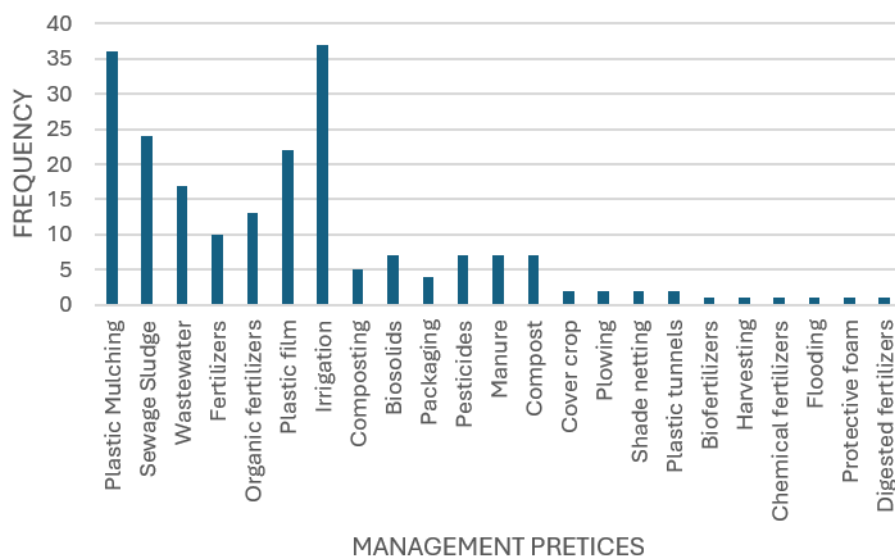


Fig. 6 Most frequently reported management practices in the selected publications

Regarding the most frequently reported soil classes in the selected studies, sandy, clayey, clay loam, and sandy loam soils were the most prominent, as shown in Figure 7. The distribution of microplastics (MPs) in soils is closely related to soil texture. Sandy soils generally exhibit lower concentrations of microplastics compared with finer-textured soils, such as clayey and clay loam soils (Yu et al., 2021).

This evidence suggests that soils with higher clay contents and more stable aggregates tend to retain microplastics more effectively, making them less susceptible to leaching processes. In contrast, sandy soils, characterized by a greater proportion of macropores (> 0.08 mm), facilitate the movement of microplastic particles, promoting their rapid vertical transport to deeper soil layers (Rillig et al., 2017).

The accumulation of large quantities of microplastics in agricultural soils may compromise important ecosystem functions (Jia et al., 2022). These contaminants can directly affect soil health and functionality by altering soil pH, physical structure, and nutrient availability, thereby impacting plant growth and development. Furthermore, microplastics may be transferred through the food chain, posing potential risks to human health and well-being (Yang et al., 2021).

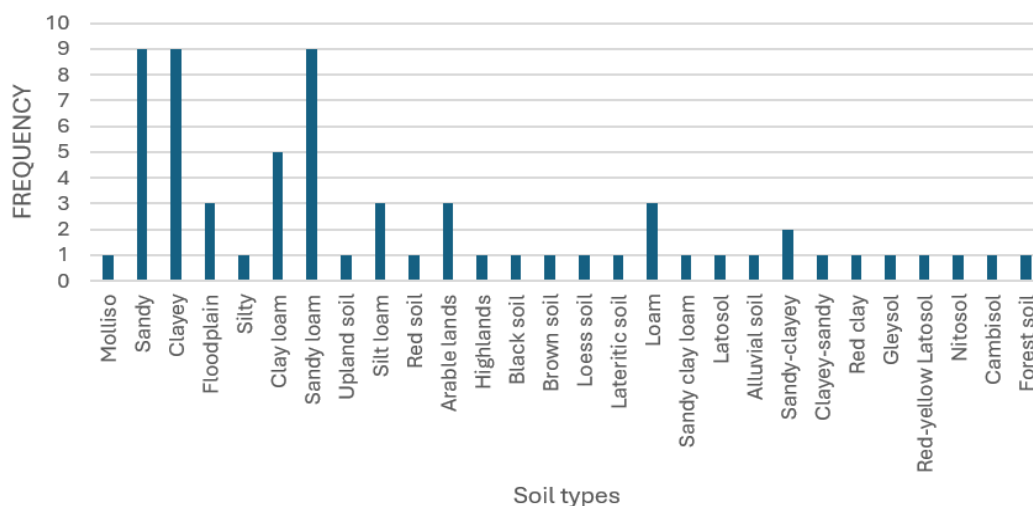


Fig. 7 Frequency of soil types reported in the selected publications

The analysis also made it possible to identify the main effects associated with the presence of microplastics (MPs) in agricultural soils on plants, soil organisms, and the soil itself. Regarding plants, the most frequently investigated effects were related to plant growth, root development, photosynthetic activity, and biomass production. However, other effects have also been reported, including alterations in germination, reduced productivity, and the occurrence of leaf chlorosis.

For soils, the analysis revealed that the impacts of microplastics may be both physical and chemical. Among the most evident physical effects, changes in water retention capacity were frequently reported, which may be reduced as a result of microplastic accumulation in the soil. Other affected properties include soil bulk density, porosity, and fertility (Figure 8).

Regarding chemical effects, changes in soil pH were identified as the most frequently investigated parameter in the analyzed studies. Nevertheless, other chemical alterations have also been reported, as illustrated in Figure 8.

For soil biota, studies have shown that microplastics primarily affect the reproduction of soil-dwelling organisms. Other frequently reported effects include delayed growth, physiological alterations, and disruptions to biological functions, which may ultimately compromise the ecological roles performed by these organisms within the soil ecosystem.

Microplastics can induce toxic effects by altering various physiological and biochemical processes in plants, including delayed or reduced seed germination, inhibition of plant growth, changes in root system development, reductions in biomass production and fruit yield, interference with photosynthetic activity, oxidative damage, and genotoxic effects (Qi et al., 2018; Boots et al., 2019; Bosker et al., 2019; Yu et al., 2021; Hernandez-Arenas et al., 2021).

In soils, these contaminants can alter important physicochemical properties including increasing porosity and water retention capacity, reducing bulk density, and modifying water permeability (de Souza Machado et al., 2018, 2019; Zhang et al., 2020). Furthermore, they may compromise soil structural integrity (Huerta Lwanga et al., 2017; Wan et al., 2019), alter soil physical structure (Zhao et al., 2021), and promote changes in soil pH (Yang et al., 2021). MPs may also reduce the levels of soil organic matter (SOM), available phosphorus, alkaline nitrogen, and available potassium (Zhang et al., 2020; Dong et al., 2021; Wang et al., 2022), thereby directly compromising soil health and fertility.

In addition, microplastics can be ingested by a wide range of terrestrial organisms, including ciliates, amoebae, flagellates, collembolans, and earthworms. Their ingestion may result in reduced survival and growth rates, intestinal damage, immune disorders, oxidative stress, neurotoxicity, DNA damage, and alterations in gene expression (Wang et al., 2020; Sarker et al., 2020; Wang et al., 2021).

Moreover, MPs can alter the diversity and richness of the gut microbiota of soil organisms, interfering with essential ecosystem processes such as nutrient cycling and organic matter decomposition (Lu et al., 2018; Zhu et al., 2018).

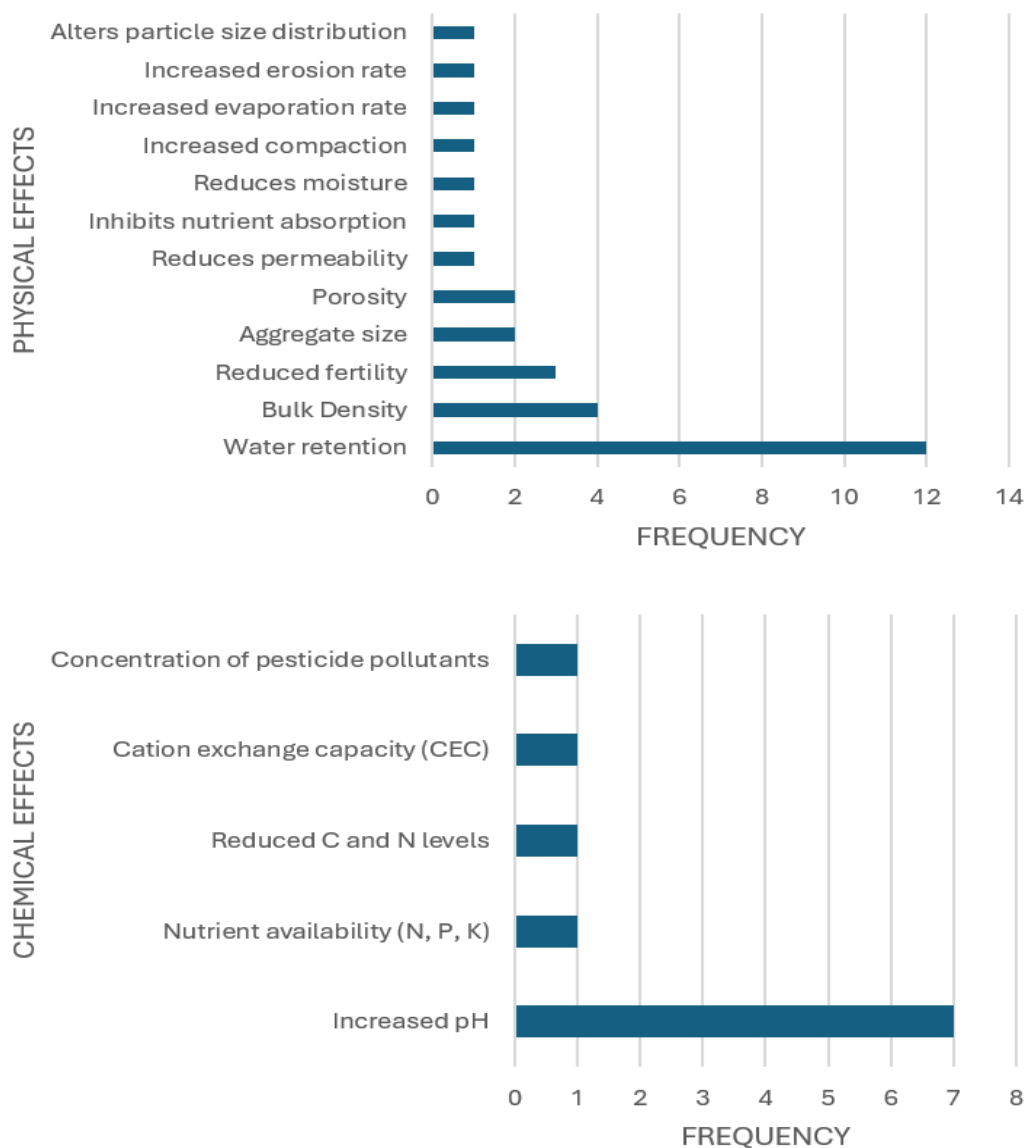


Fig. 8 Most frequently reported physical and chemical effects on soil in the selected publications

Regarding the characteristics of the polymers reported in the analyzed studies, differences were observed in terms of the type, shape, and color of the identified microplastics. Among the most frequently reported polymers were polyethylene terephthalate (PET), polypropylene (PP), polyethylene (PE), low-density polyethylene

(LDPE), polyvinyl chloride (PVC), polystyrene (PS), polyamide (PA), high-density polyethylene (HDPE), polyurethane (PU), polytetrafluoroethylene (PTFE), polyethersulfone (PES), polyvinyl fluoride (PVF), polyvinyl alcohol (PVA), acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS), polycarbonate (PC), polymethyl methacrylate (PMMA), ethylene-vinyl acetate (EVA), poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), rayon/viscose (CV), polyethylene-co-vinyl acetate (PEVA), and synthetic rubber.

However, polyethylene (PE) and polypropylene (PP) were identified as the most frequently reported polymers in the analyzed studies, followed by polystyrene (PS) and polyethylene terephthalate (PET) (Figure 9).

Regarding microplastic morphology, fourteen different shape categories were identified, including films, fibers, spheres, granules, fragments, foams, blocks, linear particles, pellets, flakes, particles, sheets, microspheres, and irregularly shaped particles. However, fragments, fibers, and films were the most frequently reported forms, respectively (Figure 9).

With respect to color, thirteen distinct categories were observed, including yellow, transparent, black, green, purple, red, blue, white, orange, brown, gray, pink, and other shades. Transparent, black, white, blue, red, and yellow were the most frequently reported colors, in descending order of occurrence (Figure 9).

Qi et al. (2020) reported that the predominant microplastics found in agricultural soils mainly consist of polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), and polyvinyl chloride (PVC). The predominance of these polymers is associated with their high resistance to environmental degradation, often resulting from the incorporation of plasticizers, antioxidants, and flame retardants

during plastic manufacturing. These additives can slow degradation processes under environmental conditions (Rawtani et al., 2023).

The most common microplastic forms include granules, spheres, fibers, and particles (Lusher et al., 2020), as well as films, foams, and fragments (Lozano et al., 2021). Plastic fragments are frequently detected in agricultural soils and may originate from the degradation of various materials used in agricultural activities, such as nets, plastic mulch coverings, irrigation pipes, containers, and seedling trays (Shanmugam et al., 2024).

Microplastics in film form are likely derived from plastic mulches and protective films used during crop cultivation. These materials, which are widely employed for soil moisture conservation and weed control, undergo gradual degradation over time, generating thin plastic films that accumulate in agricultural environments (Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture, 2021; Mansoor et al., 2022).

The different colors observed in microplastics reflect the wide diversity of pollution sources present in soils. Light-colored microplastics tend to predominate due to fading processes caused by prolonged exposure to ultraviolet (UV) radiation. In contrast, darker-colored microplastics, such as red and black particles, are generally less susceptible to discoloration because of the lower penetration and absorption of UV radiation, which may favor their persistence in the environment (Liboiron et al., 2021).

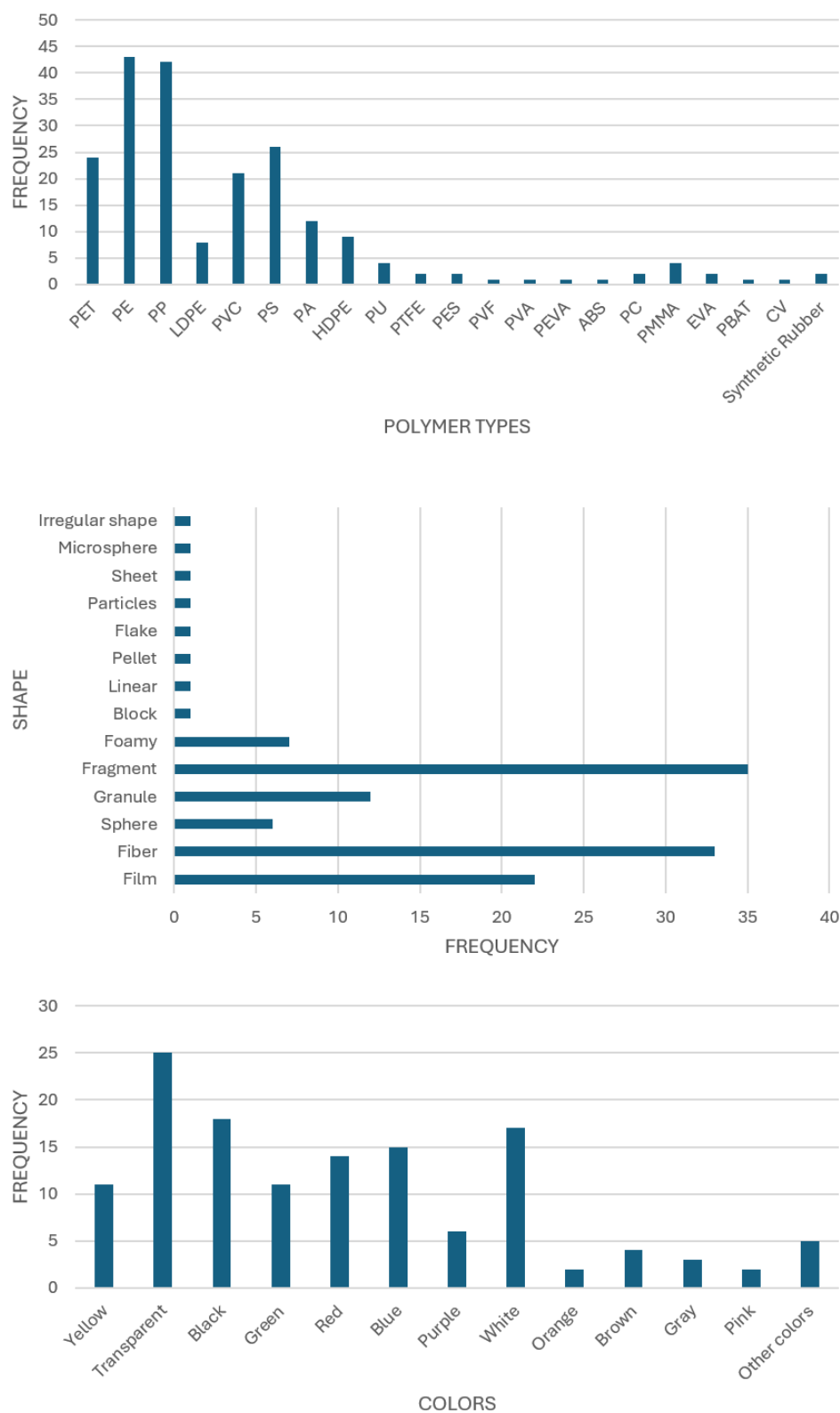


Fig. 9 Main polymer types, shapes, and colors of microplastics reported in the selected publications

Despite the growing interest in microplastic contamination of agricultural soils, important knowledge gaps remain insufficiently explored in the scientific literature, particularly regarding the relationship between contamination and agricultural production systems. Most studies have focused on intensive and extensive farming systems, whereas alternative production models, such as integrated and intercropping systems, remain underrepresented. Furthermore, agroforestry systems are virtually absent from the available literature.

Considering that different management practices directly influence the use of plastic materials in agricultural activities, expanding research on more sustainable production systems is essential. Such studies may contribute to a better understanding of the mechanisms driving microplastic contamination and help identify management strategies capable of reducing the introduction and accumulation of these contaminants in soils.

4. CONCLUSION

The present scientometric review demonstrated that microplastic contamination in agricultural soils has become an increasingly important research topic due to its potential environmental implications. The scientometric analysis revealed a marked increase in scientific publications after 2019, with research concentrated mainly in China and predominantly focused on intensive and extensive agricultural systems.

The available evidence indicates that microplastics can affect soil quality by altering physicochemical properties, including water retention capacity, pH, and nutrient availability, thereby compromising soil fertility and ecosystem functioning.

In addition, microplastics may negatively affect plant development by inhibiting growth, reducing productivity, and interfering with important physiological processes. Their impacts also extend to soil biota, affecting terrestrial organisms such as ciliates, amoebae, flagellates, collembolans, and earthworms, with consequences for growth, survival, and reproduction. These effects may ultimately compromise biodiversity and the ecological balance of terrestrial ecosystems.

Despite the growing body of research, important knowledge gaps remain, particularly regarding the occurrence and impacts of microplastics in alternative agricultural production systems. Future studies should prioritize more sustainable production models, including integrated and agroforestry systems, which remain underrepresented in the scientific literature.

Expanding scientific knowledge on the occurrence, behavior, and effects of microplastics in agricultural soils is essential for developing effective mitigation strategies. Key measures include reducing the excessive use of plastic materials in agriculture, promoting biodegradable alternatives, strengthening environmental management practices, increasing environmental awareness, and encouraging research aimed at addressing the multiple challenges associated with microplastic pollution in terrestrial ecosystems.

5.REFERENCE:

- Bosker. T., Bouwman. L. J., Brun, N. R., Behrens. P., Vijver. M. G. Microplastics Accumulate on Pores in Seed Capsule and Delay Germination and Root Growth of the Terrestrial Vascular Plant *Lepidium Sativum* (2019). *Chemosphere*226, 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Chae. Y., An. Y. J. Current Research Trends on Plastic Pollution and Ecological Impacts on the Soil Ecosystem: A Review. *Environ. Pollut.*(2018).240, 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>
- Chen, Y.; Leng, Y.; Liu, X.; Wang, J. Microplastic pollution in vegetable gardens in the suburbs of Wuhan, Central China. *Environ. Pollut.* **2020**, 257, 113449. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449>
- Cheng. W. L. et al. Quantity and Distribution of Microplastics in Film Mulching farmland Soil of Northwest China. *J. Agro-Environment Sci.* (2020) 39 (11), 2561–2568. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140439>
- Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture. European Union, july 2021, pg 334. Access: [European Commission Environment Archive](#)
- Costa et al. Sistemas Agroecológicos: Escolas da Linha Agroecológica. – Campina Grande: Embrapa Algodão, 2022. PDF (45 p.): il. color. – (Documentos / Embrapa Algodão, ISSN 0103-0205, 287).
- De Souza, A. A; Lau. C. W; Till, J.; Kloas. W.; Lehmann. A.; Becker. R.; Rillig. M.C. Impactos dos microplásticos no ambiente biofísico do solo. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, 52, 9656–9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Sousa, F. D. B. Plastic waste management: a mapping and bibliometric analysis. *Waste Management & Research* 2021, Vol. 39(5) 664–678. <https://doi.org/10.1177/0734242X21992422>

- De Souza Machado et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environ. Sci. Technol.* 53(2019) (10), 6044–6052. 10.1021/acs.est.9b01339. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., Song, Z., 2021. Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicol Environ Saf* 211, 1. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111899>
- Gao et al. Macro- and microplastics Meta-analysis Random forest analysis Crop growth Soil health. *Environ. Sci. Technol.* 53 (19) (2019), 11496–11506. 10.1021/acs.est.9b03304. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- Resources, Conservation & Recycling 186 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106549>
- Han.L. H., Xu.L., Li.Q. L., Lu.A. X., Yin.J. W., Tian.J. Y. Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River basin. *Environ. Sci.* 42 (04) (2021), 1781–1790. DOI: [10.13227/j.hjlx.202006186](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202006186)
- Hayes, D. Micro- and Nanoplastics in Soil: Should We Be Concerned? Biodegrad. Mulch Perform. Adopt. **2019**, Relatório nº PA-2019-01, 1–6. [PDF Oficial da Universidade do Tennessee](#).
- He. D.; Luo, Y.; Lu, S.; Liu, M.; Song, Y.; Lei, L. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends Anal. Chem.* **2018**, 109, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006>Obtenha direitos e conteúdo.
- He. P., Chen. L., Shao.L., Zhang.H., Lü. F. Municipal Solid Waste (MSW) Landfill: A Source of Microplastics? -Evidence of Microplastics in Landfill Leachate. *Water Res.* 159(2019), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.060>
- Hernández-Arenas.R.; Beltrán-Sanahuja. A., Navarro-Quirant. P., Sanz-Lazaro. C. The Effect of Sewage Sludge Containing Microplastics on Growth and Fruit Development of Tomato Plants. *Environ. Pollut.* 268 (Pt B) (2021), 115779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115779>
- Horton. A. A., Walton. A., Spurgeon. D. J., Lahive. E., Svendsen. C. Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities. *Sci. Total Environ.* 586(2017), 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>

- Huerta et al. Incorporation of Microplastics from Litter into Burrows of *Lumbricus Terrestris*. *Environ. Pollut.* 220(2017) (Pt A), 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.096>
- Hurley, R.R and Nizzetto, L. Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2018, 1:6–11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>
- Iqbal.B, Li.G, Alabbosh. K.F, Hussain.H, Khan. I, Tariq. M, Javed. Q, Naeem. M, Ahmad. N. Advancing environmental sustainability through microbial reprogramming in growth improvement, stress alleviation, and phytoremediation. *Plant Stress*(2023b) 10:100283. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100283>
- Jamil, A et al. Global microplastics pollution: a bibliometric analysis and review on research trends and hotspots in agroecosystems. *Environ Geochem Health* (2024) 46:486
<https://doi.org/10.1007/s10653-024-02274-y>
- Jia et al. Automated identification and quantification of invisible microplastics in agricultural soils. *Science of the Total Environment* 844 (2022). <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156853>
- Li, D.; Peng, G.; Zhu, L. Progress and prospects of research on marine microplastics in China. *Anthr. Coasts* **2019**, 2, 330–339. Doi: [10.1139/anc-2018-0014](https://doi.org/10.1139/anc-2018-0014)
- Li et al. Microplastics Soil pollution Analytical method Transport Ecological risks. *Environmental Pollution* 257 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113570>
[0269](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113570)
- Li. Q. et al. Microplastic Phthalate ester LDIR Plastic films Greenhouse Soil. *Journal of Hazardous Materials* 412 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125164>.
- Liboiron. M. et al .Abundance and types of plastic pollution in surface waters in the Eastern Arctic (Inuit Nunangat) and the need for a science of reconciliation. *Science of the Total Environment*, 782, (2021), 146809.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146809>
- Lozano.Y. M. et al. Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology: Volume 58, Issue 5* (2021). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13839>
- Lu, S et al. Impact of water chemistry on surface charge and aggregation of polystyrene microspheres suspensions. *Science of the Total Environment* 630 (2018) 951–959.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.296>[Get rights and content](#)

- Lu. X., Vogt. R. D., Li. H., Han. S., Mo. X., Zhang.Y. China's Ineffective Plastic Solution to Haze. *Science* 364(2019), 1145. [Doi: 10.1126/science.aax5674](https://doi.org/10.1126/science.aax5674)
- Lusher. A. L et al. Is it or isn't it: The importance of visual classification in the characterization of microplastics. *Applied Spectroscopy* 2020, Vol. 74(9) 1139–1153 <https://doi.org/10.1177/0003702820930733>
- Mansoor et al. Increased frequency of forest fires in relation to climate change. *Journal of Environmental Management*. Volume 301, January 1, 2022, 113769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>
- Medyńska-Juraszek, A.; Szczepańska, A. Microplastic Pollution in EU Farmland Soils: Preliminary Findings from Agricultural Soils (Southwestern Poland). *Agriculture* 2023, 13, 1733. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091733>
- Meng. F., Fan. T., Yang. X., Riksen. M., Xu. M., Geissen. V. Effects of plastic cover on the accumulation and distribution of macro and microplastics in soils of two agricultural systems in northwest China. 2020. *PeerJ* 8:e10375. Doi: [10.7717/peerj.10375](https://doi.org/10.7717/peerj.10375)
- Moeck, C., Davies, G., Krause, S. *et al.* Microplastics and nanoplastics in agriculture—A potential source of soil and groundwater contamination?. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* **28**, 23–35 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00533-2>
- Mongil-Manso, J.; Jiménez-Ballesta, R.; Trujillo-González, J.M.; San José Wery, A.; Díez Méndez, A. A Comprehensive Review of Plastics in Agricultural Soils: A Case Study of Castilla y León (Spain) Farmlands. *Land* 2023, 12, 1888. <https://doi.org/10.3390/land12101888>
- Okeke, E. S., Okoye. C. O., Atakpa. E. O., Ita. R. E., Nyaruaba. R., Mgbechidinma. C. L. Microplastics in Agroecosystems-Impacts on Ecosystem Functions and Food Chain. *Resour.ConservationRecycling* 177(2022), 105961. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105961>
- Pedrosa. M. G. *Culturas Anuais*. / NT Editora. -- Brasília: 2014. 161p.: il.; 21,0 X 29,7 cm. ISBN. 1. Culturas Anuais. Soja. Milho. Arroz. Feijão. Sorgo. Trigo. Algodão ...
- Pérez-Reverón, r.; Álvarez-Méndez, S.J.; Kropp, R. M.; Perdomo-González, A.; Hernández-Borges, J.; Díaz-Peña, F.J. Microplastics in Agricultural Systems: Analytical Methodologies and Effects on Soil Quality and Crop Yield. *Agriculture* 2022, 12, 1162. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081162>
- Qi. R., Jones. D. L., Li. Z., Liu. Q., Yan. C. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review. *Science of the Total*

- Environment* (Vol. 703). 2020. Elsevier BV <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134722>
- Qi. Y. et al. Macro- and Micro- Plastics in Soil-Plant System: Effects of Plastic Mulch Film Residues on Wheat (*Triticum aestivum*) Growth. *Sci. Total Environ.* 645, (2018). 1048–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229>
- Ragoobur. D.; Huerta-Lwanga. E.; Somaroo. G.D. Microplásticos em solos agrícolas, efluentes de águas residuais e lodo de esgoto em Maurício. *Sci. Total Environ.* **2021**, 798, 149326.
- Rawtani. D., Satish. S., Rao. P. Flame retardancy of nanocomposites with emphasis on halloysite nanotubes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 125(2023), 113. Doi: [10.1016/j.jiec.2023.04.036](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.04.036)
- Razera. J.C.C. Contribuições da cienciometria para a área brasileira de Educação em Ciências. *Ciência & Educação* 2016. 22 (3): 557-560. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-731320160030001>
- Rillig. M.C., Ingraffia. R. and de Souza Machado AA (2017) Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8:1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
- Ruiz, M.A.; Greco, O.T.; Braile, D.M. Fator de impacto: importância e influência no meio editorial, acadêmico e científico. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular* 2009. 24 (3): 273-27. <https://doi.org/10.1590/S0102-76382009000400004>
- Saadu I, Farsang. A. Greenhouse cultivation as a source of macroplastic and microplastic contamination in agricultural soils: a case study from southeastern Hungary. *Agrochem Soil Sci* 71(1). 2022:43–57. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00120>;
- Sarker, A et al. A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: A global and Bangladesh perspective. *Science of the Total Environment* 733 (2020) 139296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139296>
- Shanmugam.D.S., Praveena. S.M., Wahid. S.A., Liew. J.Y.C. Occurrence and characteristics of microplastics pollution in tropical agricultural soils in Klang Valley, Malaysia. *Environ Monit Assess* (2024) 196:144. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12330-w>.
- [Shafea](#), L.; [Yap](#), J.; [Beriot](#), N; [Felde](#), V. J. M. N. L.; [Okoffo](#), E. D.; [Enyoh](#), C. E; [Peth](#), S. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil

- functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 186 (1) 2023. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>
- Souza Machado. A. A. et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- Viçosi et al. Cienciometria: Análise qualitativa e quantitativa da literature científica global sobre estresse abióticos em *Jatropha curca L.* *Revista Agri. Environmental Sciences*, Palmas-TO, v 4 n 2, 2018. **Doi:** <https://doi.org/10.36725/agries.v4i2.530>
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q., & Hui, X. (2019). Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Total Environmental Science*, 654, 576–582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123> **Obtenha direitos e conteúdo.**
- Wang, F., Wang, Q., Adams, C.A., Sun, Y., Zhang, S. (2022). Effects of microplastics on soil properties: current knowledge and future perspectives. *J Hazard Mater* 424:127531. Doi: [10.1016/j.jhazmat.2021.127531](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531)
- Wang, Q.; Adams, C. A.; Wang, F.; Sun, Y.; Zhang, S. (2021b). Interactions between Microplastics and Soil Fauna: A Critical Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 1–33. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1915035>
- Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. (2020). Fate and environmental impacts of microplastics in soil ecosystems: progress and perspectives. *Total Environment Science*, 708, 134841 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841>
- Yang et al. Microplastics Soil Analytical methodology Sources Risk. *Science of the Total Environment* 780 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.14656>
- Yang, W et al (2021b). Effects of Microplastics on Plant Growth and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in a Soil Spiked with ZnO Nanoparticles. *Soil Biol. Biochem.* 155, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179>
- Yu. H. et al. Microplastic Residues in Wetland Ecosystems: Do They Truly Threaten the Plant-Microbe-Soil System? *Environ. Int.* 156, (2021d). 106708. Doi: [10.1016/j.envint.2021.106708](https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106708)
- Zhang, D et al (2020a). Plastic Pollution in Croplands Threatens Long-term Food Security. *Glob. Change Biol.* 26 (6), 3356–3367. <https://doi.org/10.1111/gcb.15043> **Identificador de Objeto Digital (DOI)**
- Zhang, G.S.; Liu, Y. F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwest China. *Sci. Total Environ.* 2018, 642, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>

Zhang, K.; Shi, H.; Peng, J.; Wang, Y.; Xiong, X.; Wu, C.; Lam, PKS. Microplastic pollution in China's inland water systems: a review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *Sci. Total Environ.* **2018**, 630, 1641–

1653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300>

Zhao et al. Fate of plastic film waste in agroecosystems and its effects on soil carbon and nitrogen stocks associated with aggregates. *Journal of Hazardous Materials* , **416** , 125954.(2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125954>.

Zhao, X.; Liu. Z.; Zuo. J.; Cai. L.; Liu. Y.; Han. J.; Zhang. M. Comparison of Oil Extraction and Density Extraction Method to Extract Microplastics for Typical Agricultural Soils in China. *Agronomy* 2024, 14, 1193. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061193>.

Zhou. B. et al. Microplastics in Agricultural Soils on the Coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple Sources Other Than Plastic Mulching Film. *J. Hazard. Mater.*(2020)388, 121814.<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>

Zhu, D et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition. *Soil Biology and Biochemistry* 116 (2018) 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.027>.