

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA GERAL

TANDARA KETLYN DEGOBI XAVIER

**DESLOCAMENTO DE MICROPLÁSTICOS DE POLIESTIRENO
FLUORESCENTE EM FORRAGEIRAS DE *Partamona helleri*
(HYMENOPTERA: APIDAE: MELIPONINI) APÓS INGESTÃO**

Viçosa

Minas Gerais – Brasil 2025

TANDARA KETLYN DEGOBI XAVIER

**DESLOCAMENTO DE MICROPLÁSTICOS DE POLIESTIRENO
FLUORESCENTE EM FORRAGEIRAS DE *Partamona helleri*
(HYMENOPTERA: APIDAE: MELIPONINI) APÓS INGESTÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Federal de Viçosa
como parte das exigências da disciplina BIO
499 – Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Gustavo Ferreira Martins.

Viçosa


Minas Gerais – Brasil 2025

TANDARA KETLYN DEGOBI XAVIER


**DESLOCAMENTO DE MICROPLÁSTICOS DE POLIESTIRENO
FLUORESCENTE EM FORRAGEIRAS DE *Partamona helleri*
(HYMENOPTERA: APIDAE: MELIPONINI) APÓS INGESTÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Federal de Viçosa
como parte das exigências da disciplina BIO
499 – Trabalho de Conclusão de Curso.

APROVADA: 02 de julho de 2025.

 Documento assinado digitalmente
TANDARA KETLYN DEGOBI XAVIER
Data: 09/07/2025 11:09:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tandara Ketlyn Degobi Xavier (Estudante)

 Documento assinado digitalmente
GUSTAVO FERREIRA MARTINS
Data: 09/07/2025 11:20:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gustavo Ferreira Martins (Orientador / UFV)

Dedico este trabalho a todos os filhos que vêm de longe.
Que o nosso medo de voltar de mãos vazias não seja
maior que nossa coragem de ter o coração cheio.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Viçosa e aos Cursos de Licenciatura e Bacharelado em Ciências Biológicas, pela oportunidade de estudar usufruindo de educação pública, gratuita e de qualidade.

Ao Laboratório de Biologia Molecular de Insetos, coordenado pelo professor Gustavo Martins, a quem também devo meus mais sinceros agradecimentos por toda estrutura, respeito e apoio. Também extendo minha gratidão aos Laboratórios de Microbiologia Ambiental Aplicada, Sistemática Molecular, Anatomia Vegetal e de Citogenética e Genômica Animal, que foram cruciais para a realização deste trabalho.

Agradeço, ainda, às agências de fomento CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro e incentivo à pesquisa, bem como ao Programa de Educação Tutorial (PET BIO/UFV) coordenado pela professora Mara Tavares, pelo papel fundamental na minha formação. Ademais, agradeço ao Departamento de Biologia Geral e a todos os professores que compartilharam seus conhecimentos para a minha construção profissional e pessoal.

Faço um agradecimento especial para a Thaís Andrade Viana, por me guiar pelo caminho da pesquisa. Para os meus pais, pelo apoio. Ao meu bem, Thamires, e toda a família Emídio, pela presença em minha vida. E por fim, aos meus amigos, que são o mais grato presente que levo dessa caminhada.

RESUMO

A poluição por microplásticos (MPs) representa uma ameaça emergente aos seres vivos, incluindo importantes polinizadores com as abelhas nativas. O presente trabalho investigou o deslocamento de MPs de poliestireno (PS) fluorescentes no intestino médio e gânglio cerebral (cérebro) em forrageiras da abelha sem ferrão *Partamona helleri* após a exposição oral. Os indivíduos foram coletados nas dependências da Universidade Federal de Viçosa e alimentados por 24h com solução de sacarose 50% (p/p) contaminada com MPs em duas concentrações, 6,5 ng/μL e 13 ng/μL, ambas ambientalmente relevantes. Após exposição, as abelhas foram alimentadas apenas com sacarose 50% (p/p) e avaliadas por até 144h após o início da exposição. A cada 24h, cinco indivíduos tiveram o intestino e o cérebro dissecados e fixados (n = 120). A presença das MPs foi analisada por microscopia de fluorescência em seções intestinais e cerebrais. Além disso, foi realizada análise histológica qualitativa para identificar possíveis alterações morfológicas nos tecidos. Os resultados demonstraram acúmulo de MPs no intestino entre 24h e 72h após a exposição, e presença de partículas solitárias no trato digestivo, na hemolinfa e no cérebro (lobos antenais e córtex cerebral) após 72h, indicando deslocamento de partículas. Nas análises histológicas, observou-se pontos de alterações morfológicas, mas não foi possível estabelecer uma relação de causa e efeito entre as alterações observadas e a ingestão de partículas de PS. A exposição a MPs, mesmo em concentrações ambientalmente realistas, pode desencadear um acúmulo e deslocamento de partículas pelo organismo das abelhas, atingindo regiões importantes do sistema nervoso central dos indivíduos. Este estudo reforça a necessidade de ampliar estudos ecotoxicológicos com polinizadores nativos frente à crescente contaminação ambiental por microplásticos.

Palavras-chave: Cérebro, Intestino médio, Microscopia de fluorescência, Polinizadores; Ecotoxicologia

ABSTRACT

Microplastic (MP) pollution represents an emerging threat to living organisms, including key pollinators such as native bees. This study investigated the translocation of fluorescent polystyrene (PS) MPs within the midgut and cerebral ganglion (brain) of forager workers of the stingless bee *Partamona helleri* following oral exposure. Individuals were collected from the campus of the Federal University of Viçosa and fed for 24 hours with a 50% (w/w) sucrose solution contaminated with MPs at two environmentally relevant concentrations: 6.5 ng/μL and 13 ng/μL. After exposure, bees were fed exclusively with a 50% (w/w) sucrose solution and monitored for up to 144 hours post-exposure. Every 24 hours, five individuals had their midgut and brain dissected and fixed (n = 120). The presence of particles was analyzed by fluorescence microscopy in gut and brain sections. Additionally, qualitative histological analysis was performed to identify possible morphological alterations in the tissues. Results showed MP accumulation in the midgut between 24 and 72 hours after exposure, and the presence of isolated particles in the digestive tract, hemolymph and brain (antennal lobes and cerebral cortex) after 72 hours, indicating particle deslocation. Some points of morphological alterations were observed in the histological analyses; however, it was not possible to establish a cause- and-effect relationship between these alterations and the ingestion of PS particles. Exposure to MPs, even at environmentally realistic concentrations, can trigger particle accumulation and translocation throughout the bee's body, reaching important regions of the central nervous system. This study highlights the urgent need to expand ecotoxicological research on native pollinators in the face of increasing environmental contamination by microplastics.

Keywords: Brain; Midgut; Fluorescence microscopy; Polinators; Ecotoxicology.

SUMÁRIO

1. Introdução	9
2. Objetivos	10
2.1. Objetivo geral.....	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. Revisão bibliográfica	11
3.1. Efeitos subletais da exposição a microplásticos.....	11
3.2. Deslocamento de microplásticos nos órgãos das abelhas	12
3.3. <i>Partamona helleri</i> e a exposição aos microplásticos	13
4. Materiais e Métodos	14
4.1. Abelhas.....	14
4.2. Exposição	14
4.3. Dissecção e análises histológicas.....	15
4.4. Microscopia	15
4.5. Caracterização das partículas.....	16
5. Resultados	16
6. Discussão	24
7. Conclusão	26
8. Referências	27

1. Introdução

Nas últimas décadas, a poluição por microplásticos (MPs) tornou-se um problema ambiental relevante. Esses detritos são persistentes, móveis e onipresentes, sendo encontrados em ambientes terrestres e aquáticos - incluindo áreas urbanas, rurais e remotas (Hartmann et al., 2019; Zhang et al., 2020). Esses fragmentos (<5 mm) são originados da degradação de plásticos maiores ou são produzidos para fins industriais e comerciais (Järnskog et al., 2020). Devido ao seu elevado potencial de dispersão na água, no solo e no ar, os MPs representam contaminantes capazes de impactar organismos em diversos níveis tróficos (Wright et al., 2013).

Evidências recentes indicam que os MPs interagem com organismos essenciais para a manutenção de serviços e funções ecossistêmicas, desde fungos até diversos invertebrados – incluindo insetos polinizadores, entre os quais as abelhas se destacam (de Souza Machado et al. 2018). Esses organismos podem entrar em contato com os MPs por meio da coleta de água, néctar e pólen contaminados (Herrero-Latorre et al., 2017), o que levanta preocupações quanto aos possíveis efeitos adversos em sua fisiologia e comportamento.

Os MPs podem afetar negativamente diversos aspectos da biologia das abelhas, incluindo a capacidade cognitiva, a saúde da microbiota intestinal, a susceptibilidade a infecções virais, bem como o comportamento e as respostas imunológicas (Pasquini et al., 2024; Wang et al., 2022; Deng et al., 2021; Viana et al., 2023). Tais alterações podem comprometer diretamente a saúde e a funcionalidade das colônias, com potenciais impactos sobre os serviços ecossistêmicos prestados por esses insetos.

As abelhas nativas sem ferrão desempenham um papel ecológico fundamental na polinização de plantas nativas e cultivadas no Brasil. Entre elas, destaca-se *Partamona helleri* (Friese, 1900), uma espécie amplamente distribuída no território brasileiro e altamente adaptável a ambientes antropizados (Camargo e Pedro, 2003; Pedro, 2014). Conhecida pela construção de ninhos elaborados com argila, pequenos galhos e outros materiais coletados no ambiente (Pedro, 2014), essa espécie pode apresentar vulnerabilidade à contaminação por MPs (Viana et al. 2023).

Apesar das contribuições relevantes dos estudos mencionados acima, ainda existem lacunas no conhecimento sobre a interação entre abelhas e MPs, especialmente em relação às consequências subletais e à distribuição dessas partículas no organismo. Além disso, há uma escassez de dados sobre os efeitos em espécies que não pertencem ao gênero *Apis* (Rodrigues et al., 2025), incluindo as abelhas nativas sem ferrão. Diante desse cenário, O presente estudo investigou se MPs ingeridos por abelhas forrageiras *Partamona helleri* poderiam se deslocar do trato intestinal para os tecidos do sistema nervoso central (cérebro), após uma exposição aguda contínua de 24 horas, com monitoramento a cada 24 horas até completar 144 horas. Essa investigação contribuiu para a compreensão dos riscos ecológicos associados à poluição por MPs.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Avaliar o deslocamento de microplásticos de poliestireno (PS) no corpo de forrageiras de *Partamona helleri* após ingestão.

2.2. Objetivos específicos

Verificar a presença de microplásticos de poliestireno no trato intestinal das operárias de *Partamona helleri* por meio de microscopia de fluorescência;

Investigar o deslocamento dos microplásticos do trato intestinal para os tecidos do sistema nervoso central (cérebro) das operárias tratadas por meio de microscopia de fluorescência;

Avaliar possíveis danos celulares no intestino e cérebro das abelhas expostas, utilizando técnicas de histologia.

3. Revisão bibliográfica

A poluição por microplásticos (MPs) configura-se como um dos principais desafios ambientais da atualidade, com impactos negativos na saúde de diversos organismos, incluindo os polinizadores (de Souza Machado et al. 2018). Esses fragmentos de plástico, com menos de 5 mm de diâmetro, estão amplamente distribuídos no ambiente e alcançam distintos nichos ecológicos, como solos, corpos d'água e o ar. Com o crescimento da produção e o descarte inadequado de resíduos plásticos, a contaminação por MPs tem se intensificado, afetando diferentes ecossistemas (Hartmann et al., 2019; Zhang et al., 2020). Recentemente, os impactos desses poluentes sobre insetos, especialmente as abelhas, têm recebido maior atenção, dado o papel fundamental que esses organismos exercem na polinização de plantas (Gianinni et al. 2014), na manutenção da biodiversidade, e na segurança alimentar humana (Al Naggar et al. 2024). Estudos demonstrando a presença de microplásticos em produtos derivados das abelhas, como o mel, o pólen e a cera, além de dentro das próprias colônias, levanta preocupação sobre a ameaça dos MPs à saúde destes insetos, bem como os potenciais riscos à saúde humana decorrentes do consumo de produtos contaminados (Buteler et al. 2023; Alma et al. 2023).

3.1. Efeitos subletais da exposição a microplásticos

A exposição a MPs tem sido associada a diversos efeitos subletais em abelhas, com impactos negativos sobre a sua fisiologia. Embora baixas concentrações de MPs de Polietileno (PE) não interfiram diretamente na taxa de sobrevivência, já foram observadas alterações no comportamento alimentar e na sensibilidade à sacarose, principal fonte energética desses insetos, indicando prejuízos na capacidade de detecção e ingestão de alimento (Balzani et al., 2022). No caso da exposição a MPs de poliestireno (PS), há relatos de redução da massa corporal, uma vez que as partículas ingeridas ocupam um espaço no trato intestinal sem fornecer valor nutricional, levando à diminuição do consumo alimentar e, potencialmente, à mortalidade (Al Naggar et al. 2024), o que pode resultar em consequências negativas para os serviços ecossistêmicos que esses insetos prestam a longo prazo. O PS, amplamente utilizado em embalagens, isolamento de alimentos e na indústria da construção civil, é um dos cinco tipos de plásticos mais produzidos no mundo, representando cerca de 90% do volume total da demanda por plástico, e por esse motivo, o

PS é o tipo de microplástico mais utilizado em experimentos em laboratório (Alimba e Faggio, 2019).

Outra problemática da ingestão de MPs de PS está relacionada à alteração da microbiota intestinal das abelhas. Essa microbiota é composta por espécies altamente especializadas, adquiridas por meio de interações sociais de coevolução com o hospedeiro, sendo essencial para digestão, imunidade e proteção contra patógenos (Engel e Moran, 2013; Moran et al., 2012; Martinson et al., 2011). A ingestão de MPs de PS pode causar disbiose, diminuindo a diversidade da microbiota e alterando a expressão de genes ligados ao sistema imunológico das abelhas (Wang et al., 2021). Essa disbiose pode comprometer a saúde dos indivíduos, tornando-os mais suscetíveis a infecções virais (Deng et al., 2021).

Além de alterações comportamentais e na microbiota, a ingestão de MPs de PS também pode induzir alterações histológicas significativas. Dentre os efeitos observados estão a redução da espessura das paredes intestinais, aumento na vacuolização e ocorrência de lise celular, comprometendo a digestão e a absorção de nutrientes. Essas alterações podem levar à perda de peso progressiva e ao aumento das taxas de mortalidade a longo prazo (Wang et al., 2022).

3.2. Deslocamento de microplásticos nos órgãos das abelhas

As abelhas podem ingerir MPs ao coletar néctar e pólen de flores contaminadas, ou ao ingerir água (Herrero-Latorre et al., 2017). A ingestão de MPs representa uma via importante de exposição, mas o destino dessas MPs no organismo ainda é uma área pouco explorada. Análises histológicas demonstram que os MPs de PS podem danificar os tecidos do intestino médio e, subsequentemente, ser deslocados para a hemolinfa, traqueia e túbulos de Malpighi das abelhas (Deng et al., 2021).

O intestino médio das abelhas é um órgão tubular com epitélio de camada única contendo células digestivas, endócrinas e regenerativas além de borda estriada bem desenvolvida (Oliveira et al., 2019), este é um órgão fundamental na absorção dos nutrientes oriundos da dieta, além de ter importante destaque na saúde imunológica dos indivíduos, por abrigar vastas populações de microorganismos importantes para as abelhas. No cérebro é possível visualizar o gânglio cerebral, estrutura mediana do cérebro, duas

projeções bilaterais em forma de leque que caracterizam os lobos ópticos, na porção anterior se instalam os lobos antenais ou olfativos, duas estruturas contendo esferas bem delimitadas, os glomérulos, e posteriormente ao gânglio se encontram o par de corpos cogumelares, dispostos de forma bilateral no cérebro das abelhas, estes, junto com o gânglio cerebral constituem os centros mais importantes para o comportamento e instintos das abelhas (Ribi et al., 2008).

Já se sabe que esferas de MPs de aminoformaldeído termofixo de até 5 µm podem ultrapassar o intestino médio, penetrar a barreira hematoencefálica e alcançar o cérebro após apenas 72h de exposição oral (Pasquini et al., 2024). Embora os mecanismos pelos quais as partículas atravessam barreiras celulares ainda não estejam completamente compreendidos, assim como a influência da composição química dos MPs nesse processo, o PS tem se mostrado um composto mais prejudicial para as abelhas do que outros MPs, mesmo em concentrações semelhantes (Balzani et al., 2022). Os efeitos do PS sobre o sistema nervoso central, como prejuízos à aprendizagem e à memória em médio e longo prazo das abelhas (Pasquini et al., 2024), levantam preocupações acerca dos danos mecânicos, bioquímicos e fisiológicos que os MPs, principalmente o PS, podem causar nestes organismos. Apesar da abundância desse material no ambiente, as pesquisas envolvendo seus efeitos subletais em organismos terrestres ainda estão em estágio inicial (Pasquini et al., 2024), sendo escassas as análises de imagem que investigam o destino dessas partículas dentro do organismo.

3.3. *Partamona helleri* e a exposição aos microplásticos

A abelha *Partamona helleri* (Apidae, Meliponini) é uma espécie de abelha sem ferrão amplamente distribuída no Brasil, com papel importante na polinização de plantas tropicais, abrangendo tanto espécies de importância ecológica quanto cultivares agrícolas (Giannini et al., 2015). Reconhecida pela construção de ninhos complexos utilizando materiais disponíveis no ambiente, como argila, galhos e resinas (Pedro, 2014), *P. helleri* destaca-se como um modelo promissor para estudos sobre contaminação ambiental por MPs, já que seu comportamento de coleta pode expor os indivíduos à contaminação presente no solo e na água.

Durante o forrageamento, as abelhas podem entrar em contato com os MPs por diferentes vias ambientais e comportamentais. Uma das principais formas é a ingestão direta de partículas presentes em água contaminada, néctar, pólen ou outros recursos coletados no ambiente. Além disso, a exposição pode ocorrer por contato dérmico durante a manipulação de materiais contaminados, como partículas presentes no solo, folhas ou na construção do ninho, onde os MPs podem se aderir à cutícula ou às corbículas dos indivíduos, sendo posteriormente levados à colônia. A contaminação dos alimentos e dos materiais utilizados na construção do ninho pode levar à exposição da progênie, contribuindo para a transferência de microplásticos entre gerações, inclusive para as larvas (Alma et al., 2023). Estudos recentes demonstram que, embora a ingestão de 12,5 ng/μL de PS por imaturos de *P. helleri* não afetem diretamente a taxa de sobrevivência, ela pode desencadear alterações comportamentais e imunológicas em indivíduos recém emergidos (Viana et al., 2023). Tais evidências indicam que níveis considerados subletais de exposição já são suficientes para comprometer o comportamento das abelhas e a saúde individual e coletiva das colônias. Esses dados, levam à suposição de que a contaminação por MPs represente um risco aos serviços ecossistêmicos prestados por esses insetos (Viana et al., 2023).

4. Materiais e Métodos

4.1. Abelhas

Forrageadoras de *P. helleri* foram coletadas no campus Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais (20° 45' 14" S e 42° 52' 55" O). Frascos de Erlenmeyer foram posicionados na entrada dos ninhos, permitindo a captura dos indivíduos de quatro colônias utilizadas neste estudo. Os frascos foram vedados com tecido organza e elástico e transportadas até o insetário do Departamento de Biologia Geral da UFV. As abelhas foram anestesiadas com CO₂ e transferidas para potes plásticos de 500 ml, contendo 20 indivíduos por pote.

4.2. Exposição

As abelhas foram mantidas em incubadora, sob condições controladas de umidade (70 ± 5 % UR), temperatura (28 ± 1 °C) e ausência de luz, de modo a simular o interior do ninho e

garantir a estabilidade fisiológica durante o ensaio. Cada pote continha um microtubo de 2 mL para acondicionar as diferentes dietas. As abelhas foram expostas a MPs fluorescentes de PS por 24h em duas concentrações: 6,5 ng/ μ L ou 13 ng/ μ L. Esses valores foram escolhidos com base em níveis ambientalmente relevantes para ambientes terrestres (Harley-Nyang et al., 2023). Os MPs foram diluídos em uma solução de sacarose a 50% (p/p), utilizada como meio para a exposição oral. Um grupo controle foi mantido nas mesmas condições, recebendo apenas a solução de sacarose 50% (p/p). Após o período inicial de exposição (24 h), as abelhas de todos os grupos (tratado e controle) foram alimentadas apenas com a solução de sacarose 50% (p/p) por até 144 horas.

4.3. Dissecção e análises histológicas

Para avaliar o acúmulo das MPs nos tecidos das abelhas, cinco cérebros e cinco intestinos de indivíduos de cada tratamento foram dissecados a cada 24 horas, até às 144 horas após o início da exposição (n = 120). As amostras foram imediatamente fixadas em solução de Zamboni, lavadas em solução salina tamponada com fosfato (PBS 0,1% pH 7,4) e submetidas a desidratação em série crescente de etanol com concentrações crescentes (70%, 80%, 85%, 90%, 95% e 100%), após a desidratação, os tecidos foram incluídos em Historesina (Leica ®) e seccionados em cortes de 5 μ m com auxílio de um micrótomo (Leica Reichert-Jung 2050 SuperCut) (Viana et al., 2025). As secções foram fixadas em lâminas de vidro, aquelas destinadas à análise de fluorescência não receberam coloração, enquanto aquelas utilizadas para análise histológica foram coradas com Hematoxilina e Eosina. Para coletar hemolinfa, injetou-se 10 μ L de solução anticoagulante (0,098 M NaOH, 0,145 M NaCl, 0,017 M EDTA e 0,041 M ácido cítrico , pH 4,5) no primeiro segmento do abdômen dos indivíduos imobilizados a frio (± 4 °C) usando uma seringa de insulina, o extravasado foi coletado usando uma micropipeta e pontas siliconizadas (preparadas com Sigmacote® da Sigma, Saint Louis, MO, EUA) (Viana et al., 2025) e dispensado em lâmina de vidro. Todas as lâminas foram cobertas com lamínulas de vidro.

4.4. Microscopia

As lâminas foram analisadas e fotografadas utilizando um microscópio de fluorescência (Thermo EVOS M5000) e fotomicroscópio óptico colorido (Olympus BX53 e Zeiss - Scope A1 com sistema AxioCam 105 color). A análise foi realizada em diferentes tempos de exposição (24h, 48h, 72h, 96h, 120h e 144h), com o objetivo de investigar o

deslocamento das MPs nos tecidos intestinais e cerebrais, bem como possíveis alterações nas estruturas celulares.

4.5. Caracterização das partículas

A análise do diâmetro das partículas de PS foi realizada utilizando o software ImageJ (versão 1.54p). Inicialmente, foram medidas as partículas puras previamente caracterizadas e, posteriormente, as partículas localizadas nos tecidos das abelhas, incluindo o intestino médio e o cérebro ($n = 10$). Os diâmetros obtidos foram utilizados para verificar a distribuição dos dados, por meio do teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Após a confirmação da normalidade dos dados, foi aplicado um teste de ANOVA de fator único para comparar os diâmetros médios entre os diferentes grupos (partículas puras, partículas visualizadas no intestino e visualizadas no cérebro). O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$), utilizando o software PAST.

5. Resultados

Os MPs foram detectados nas secções de intestino e cérebro. Na Figura 1, observa-se um acúmulo de partículas na região apical das células intestinais entre 24h e 72h após a exposição, indicando que a ingestão do alimento contaminado ocorreu com sucesso e que os MPs foram deslocados do lúmen para o interior celular neste período. No tratamento com 6,5 ng/ μ L, a presença de MPs foi detectada apenas a partir de 48h. Em ambos os tratamentos, após 72h de exposição, observou-se apenas a presença de partículas isoladas, distribuídas pontualmente entre as células. A figura 2 evidencia MPs no cérebro entre 72h e 144h após o início dos ensaios. Os MPs podem alcançar diferentes regiões do sistema nervoso central, com maior frequência no córtex cerebral e nos lobos antenais (ou lobos olfativos). Na figura 3, evidenciam-se as partículas em detalhes nas secções de intestino e cérebros de indivíduos expostos ao tratamento de 6,5 ng/ μ L.

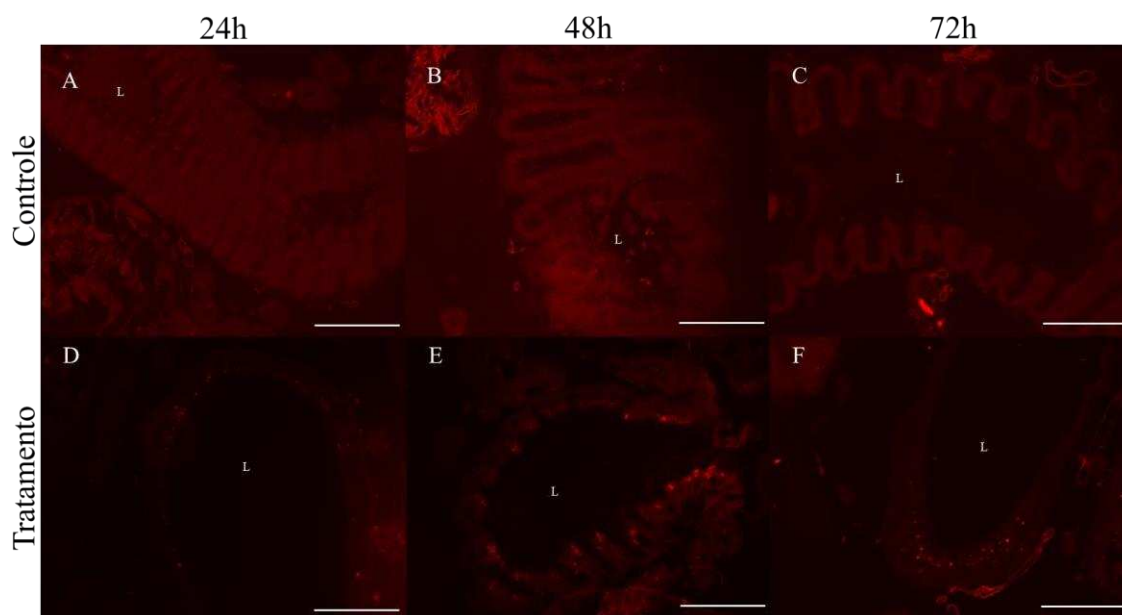


Figura 1. Secções histológicas do intestino médio de *Partamona helleri* avaliadas em diferentes tempos após exposição oral a dietas contendo micropartículas de poliestireno. A-C: Intestinos de indivíduos do grupo controle. D e F: Intestinos de indivíduos expostos a 13 ng/ μ L de micropartículas. E: Intestino de indivíduo exposto a 6,5 ng/ μ L de micropartículas. L: Lúmen. Barra = 150 μ m.

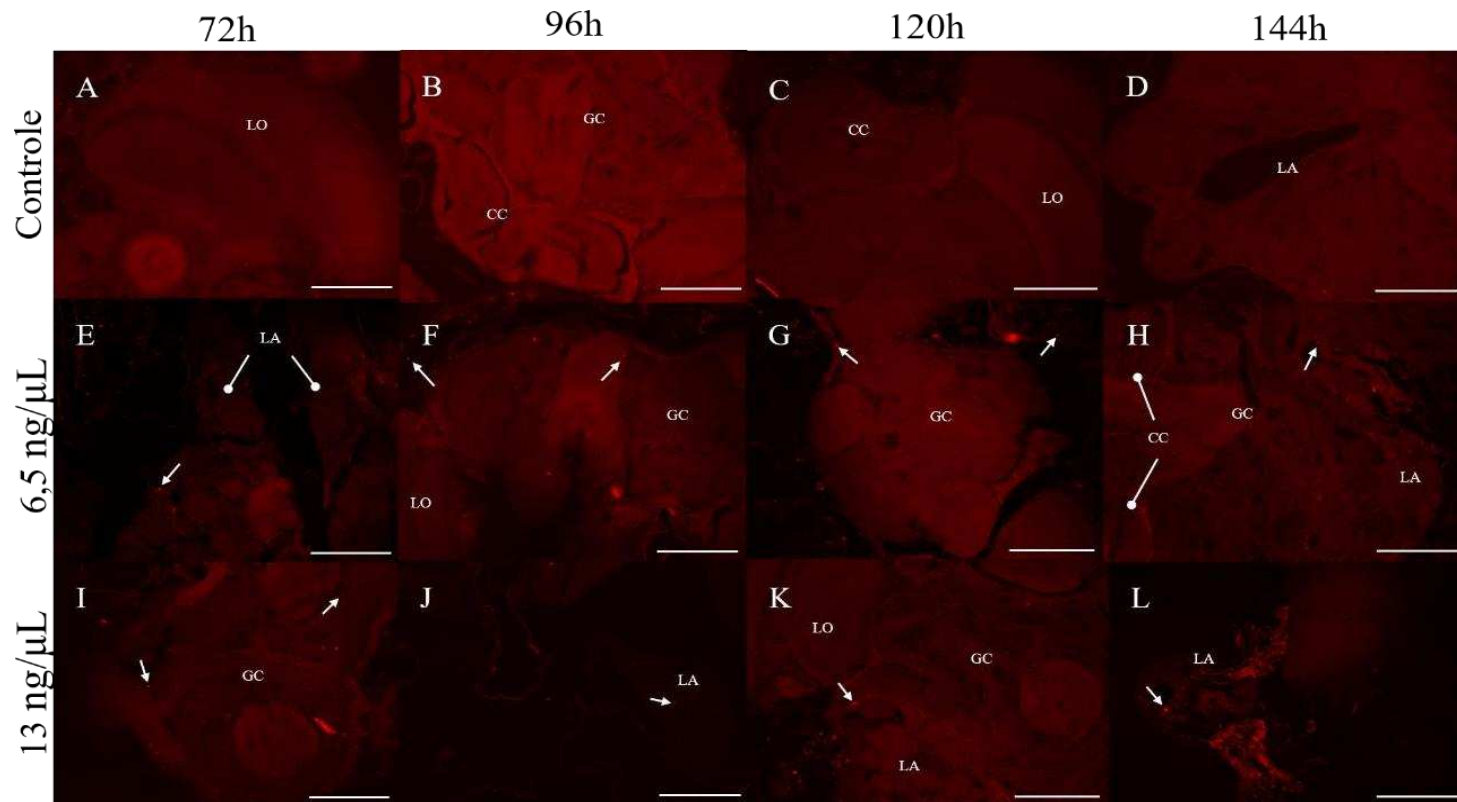


Figura 2. Secções histológicas do cérebro de *Partamona helleri* avaliadas em diferentes tempos após exposição oral a dietas contendo micropartículas de poliestireno. A-D: Cérebros de indivíduos do grupo controle. E-H: Cérebro de indivíduos expostos a 6,5 ng/μL de micropartículas. I-L: Cérebro de indivíduos expostos a 13 ng/μL de micropartículas. LO: Lobo óptico. GC: Gânglio cerebral. LA: Lobo antenal/olfativo. CC: Corpos cogumelares. Setas indicam as micropartículas de poliestireno. Barra = 150 μm.

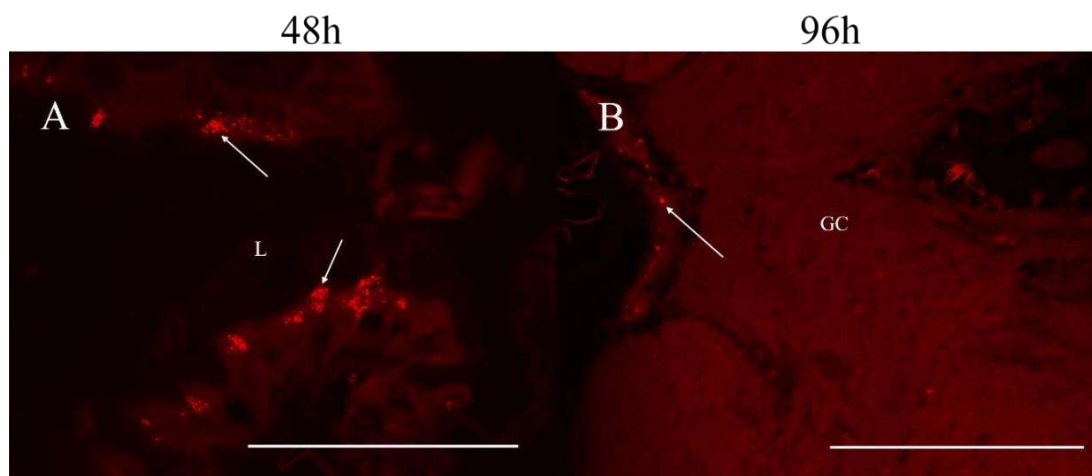


Figura 3. Detalhes das secções histológicas do intestino médio e cérebro de *Partamona helleri*, respectivamente, após exposição oral a dieta contendo $6,5 \text{ ng}/\mu\text{L}$ de micropartículas de poliestireno. A: Intestino médio com acúmulo de partículas de PS após 48h da ingestão. B: Cérebro contendo partículas de PS após 96h da ingestão. L: Lúmen. GC: Gânglio cerebral. Setas indicam as micropartículas de poliestireno. Barra = $150 \mu\text{m}$.

As figuras anteriores indicam que MPs de PS conseguem atravessar a barreira intestinal das abelhas, circulando pela cavidade corpórea e se instalando no cérebro. O PS ingerido pode causar danos ao intestino médio e, conseqüentemente, acessar a hemolinfa, como é possível verificar na Figura 4. As partículas puras de PS (Figura 5) apresentaram diâmetro médio de $4,89 \pm 0,31 \mu\text{m}$, já as partículas visualizadas no intestino médio e cérebro apresentaram diâmetro médio de $4,40 \pm 0,64 \mu\text{m}$ e $4,51 \pm 0,64 \mu\text{m}$, respectivamente, não havendo diferença significativa entre as partículas ($p = 0,13$). A partícula visualizada na hemolinfa mede $4,28 \mu\text{m}$, o que está dentro da faixa dos diâmetros médios das partículas encontradas nos tecidos analisados.

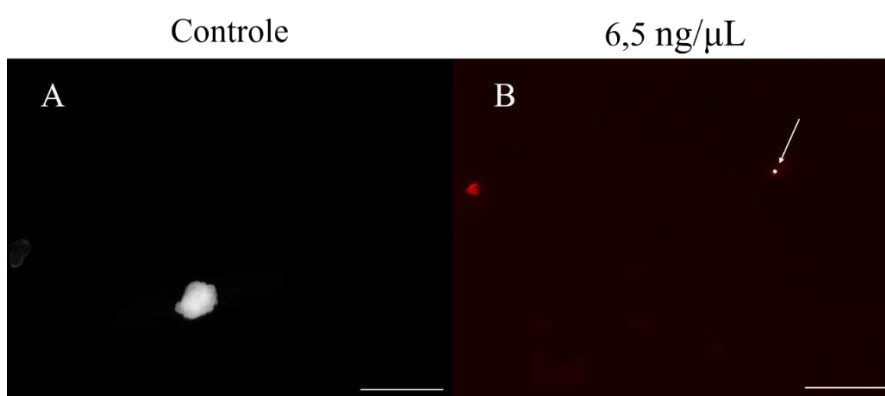


Figura 4. Hemolinfa de *Partamona helleri* após 72h de exposição oral a dieta contendo $6,5 \text{ ng}/\mu\text{L}$ de micropartículas de poliestireno. A: Hemolinfa do grupo controle. B: Hemolinfa do grupo tratado. Seta indica a micropartícula de poliestireno. Barra = $100 \mu\text{m}$.

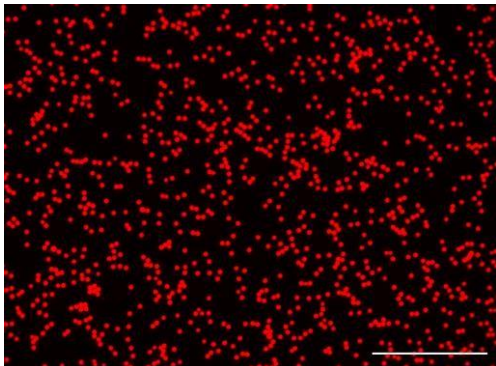


Figura 5. Imagem de microscopia de fluorescência de lâmina contendo solução de micropartículas puras de PS fluorescente. Barra = 150 μm .

Para avaliar a integridade dos tecidos fez-se secções do intestino médio (Figura 6) e cérebro das abelhas (Figura 7), a análise qualitativa, apenas por observação das fotografias das secções dos tecidos anteriormente citados, não foi suficiente para indicar destruição celular ou formação de vacúolos atribuídos aos tratamentos. Todavia nas secções de intestino médio é possível identificar áreas isoladas de possível desorganização celular e vacúolos pontuais entre 96h e 144h (Figura 8), e nas secções de cérebro o mesmo se observa após 144h da ingestão (Figura 9).

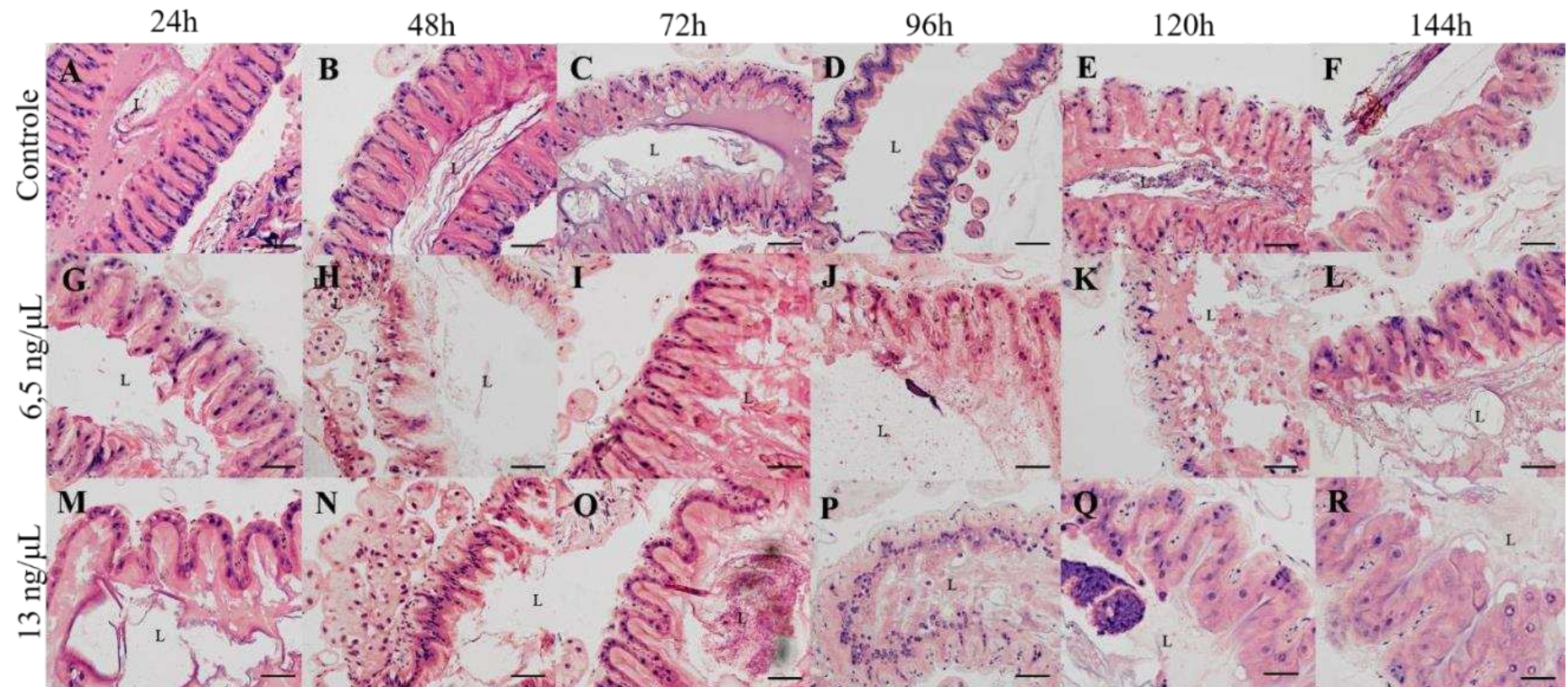


Figura 6. Secções histológicas do intestino médio de *Partamona helleri* em diferentes tempos após exposição oral à dieta contaminada com micropartículas de PS. A-F: Intestinos de indivíduos do grupo controle. G-L: Intestinos de indivíduos tratados com dieta contendo 6,5 ng/μL de micropartículas. M-R: Intestinos de indivíduos tratados com dieta contendo 13 ng/μL de micropartículas. L: Lúmen. Barra = 100.

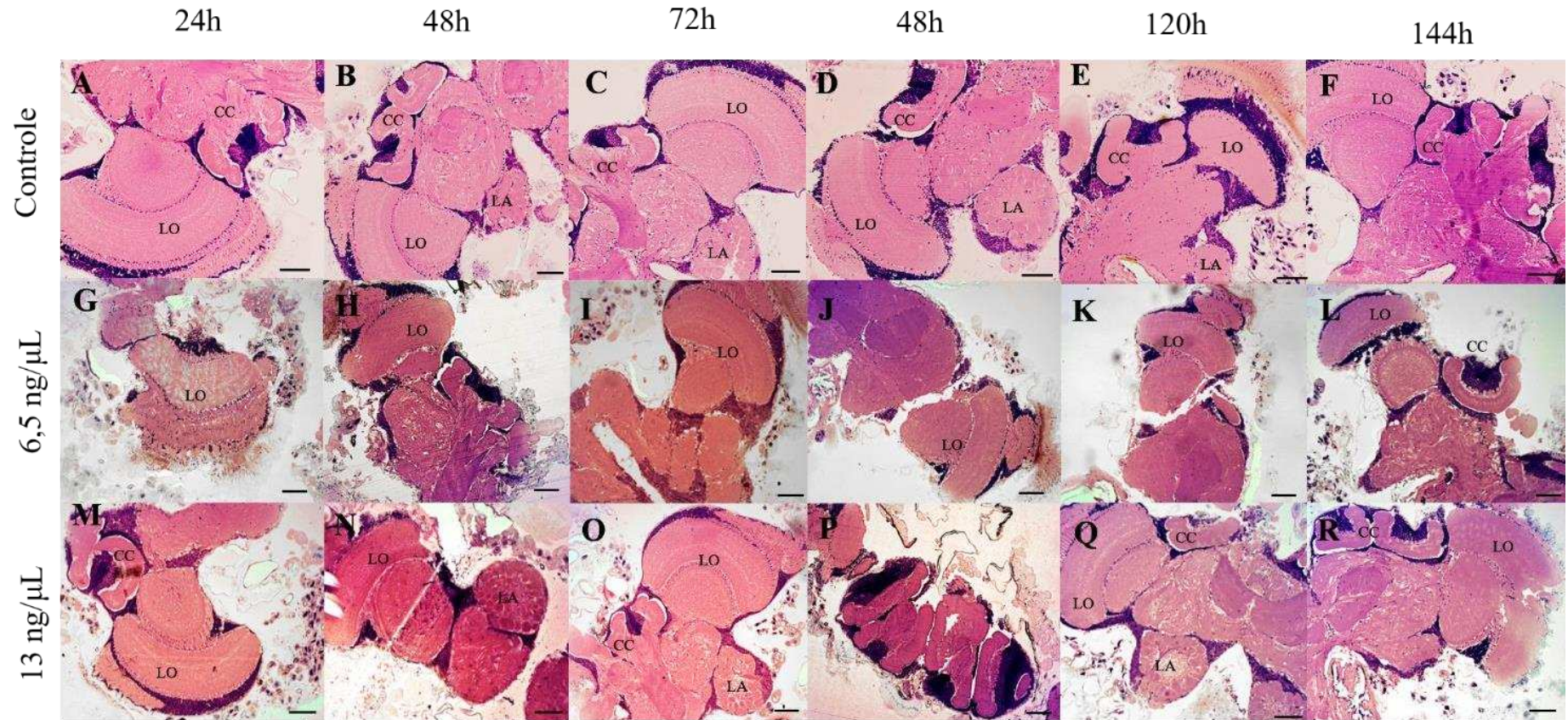


Figura 7. Secções histológicas do cérebro de *Partamona helleri* em diferentes tempos após exposição oral à dieta contaminada com micropartículas de PS. A-F: Cérebros de indivíduos do grupo controle. G-L: Cérebros de indivíduos tratados com dieta contendo 6,5 ng/μL de micropartículas. M-R: Cérebros de indivíduos tratados com dieta contendo 13 ng/μL de micropartículas. LO: Lobo óptico. LA: Lobo antenal/olfativo. CC: Corpos cogumelares. Barra = 100 μm.

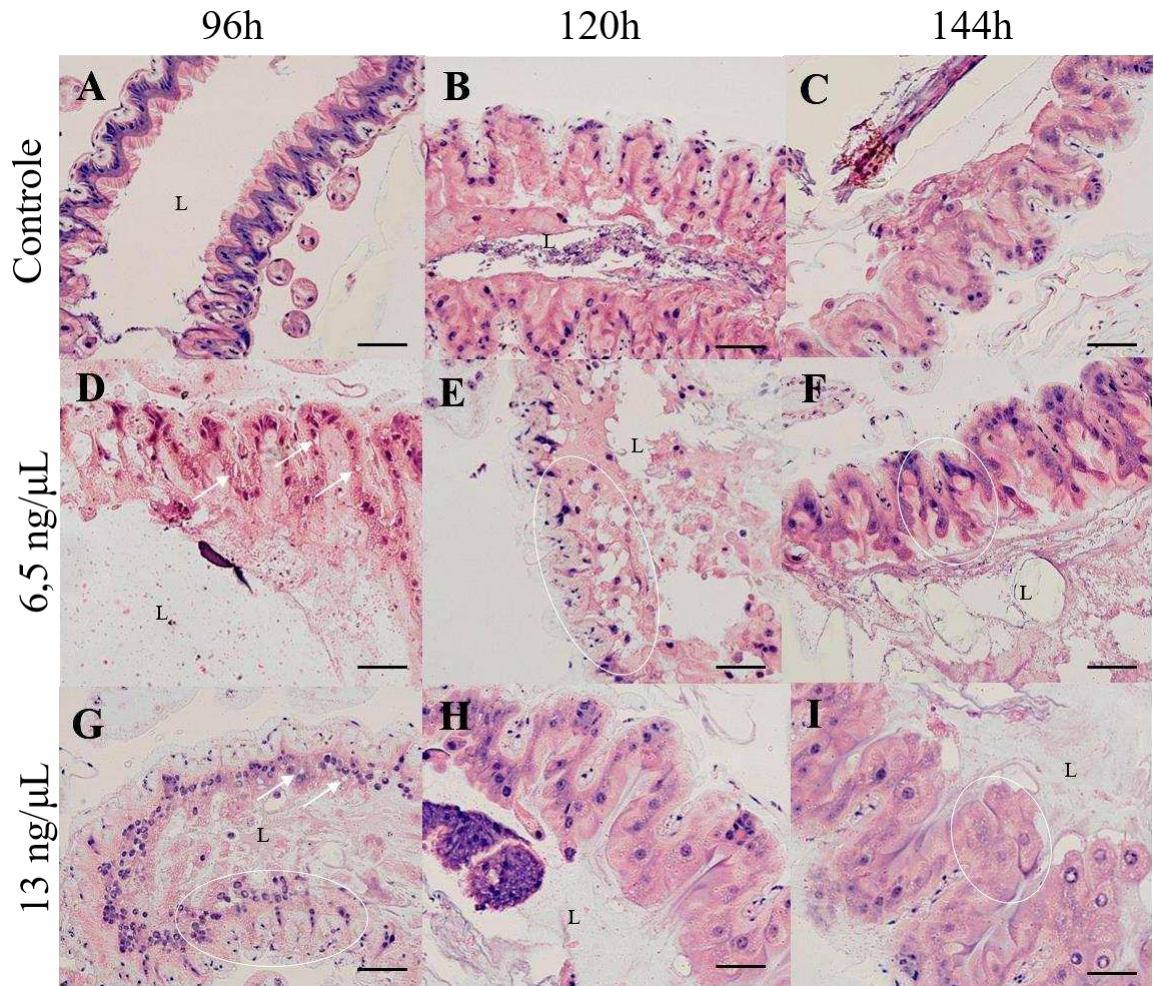


Figura 8. Detalhes das secções histológicas do intestino médio de *Partamona helleri*. A-C: Cérebros de indivíduos do grupo controle. D-F: Intestinos de indivíduos tratados com dieta contendo 6,5 ng/μL de micropartículas. G- I: Intestinos de indivíduos tratados com dieta contendo 13 ng/μL de micropartículas. Barra = 150 μm. L = Lúmen. Círculos indicam áreas com indícios de desorganização celular. Setas indicam os possíveis vacúolos.

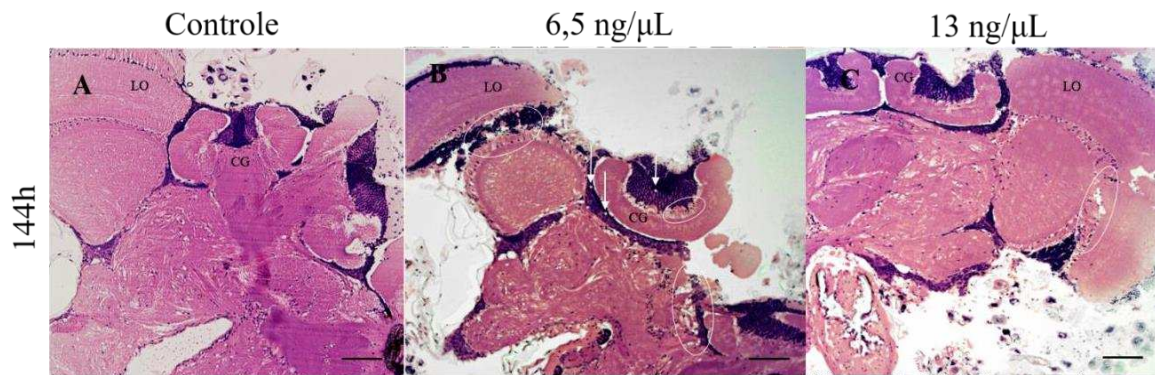


Figura 9. Detalhes das secções histológicas do cérebro de *Partamona helleri* após 144h da ingestão de dieta contaminada com micropartículas de PS. A: Cérebro de indivíduo do grupo controle. B: Cérebro de indivíduos tratado com dieta contendo 6,5 ng/μL de micropartículas. C: Cérebro de indivíduo tratado com dieta contendo 13 ng/μL de micropartículas. Barra = 100 μm. Círculos indicam áreas com indícios desorganização celular do neuropilo. Setas indicam os possíveis vacúolos.

6. Discussão

Verificou-se a presença de MPs de PS no intestino médio de operárias forrageiras de *Partamona helleri* após 24 horas de exposição. Essas partículas migraram para a região distal do intestino até 72 horas após o início da exposição, e após isso apenas partículas solitárias foram detectadas no tecido, o que sugere o deslocamento dessas partículas e/ou eliminação por meio da fezes dos indivíduos. Após atravessarem a barreira intestinal, os MPs foram detectados na hemolinfa às 72 horas, evidência de que essa via pode permitir o transporte das partículas até o cérebro. Esse resultado está de acordo com estudos anteriores em *Apis mellifera*, nos quais partículas com tamanho entre 0,5 e 5 μm foram capazes de atravessar o tecido intestinal e alcançar a hemolinfa (Deng et al., 2021). Nossos resultados indicam que, com a menor concentração testada (6,5 ng/μL), foi possível detectar MPs tanto no intestino quanto na hemolinfa. No entanto, com a maior concentração (13 ng/μL), os MPs não foram detectados com a mesma frequência, sugerindo uma possível resposta fisiológica ou mecanismo de eliminação em concentrações mais elevadas. O acúmulo dessas partículas no trato digestivo pode causar diminuição da taxa de consumo alimentar e da absorção de nutrientes pelas abelhas (Al Nagggar et al., 2024), além disso, é um fator de aumento da susceptibilidade das abelhas à

infecção viral por IAPV e infecções bacterianas (Deng et al., 2021; Wang et al., 2024) o que pode comprometer a sobrevivência dos indivíduos a longo prazo.

Partículas menores, de 0,5 μm , são mais agressivas ao epitélio e se agregarem em maior quantidade na hemolinfa (Deng et al. 2021), todavia a detecção de partículas de 5 μm na hemolinfa das abelhas, sugere que essas partículas também podem chegar a outros tecidos, mesmo que em menor escala. O diâmetro médio das partículas presentes na dieta oferecida aos indivíduos do presente estudo foi de $4,89 \pm 0,31 \mu\text{m}$, ao passo que as partículas visualizadas no intestino médio e cérebro apresentaram diâmetro médio de $4,40 \pm 0,64 \mu\text{m}$ e $4,51 \pm 0,64 \mu\text{m}$, respectivamente. A partícula encontrada na hemolinfa também segue a mesma faixa de tamanho: 4,28 μm , o que demonstra que o PS ofertado foi ingerido e deslocado dentro do organismo das abelhas até se alocar no cérebro.

Ainda existem lacunas quanto ao destino que os MPs podem ter após a sua ingestão, bem como os mecanismos celulares envolvidos na degradação tecidual na movimentação dessas partículas nos seres vivos. Nosso estudo identificou que as partículas de PS se deslocaram para o cérebro de *P. helleri* a partir de 72h após a ingestão, e foram observadas predominantemente nos lobos antenais e córtex cerebral, o que pode culminar em prejuízos na percepção do olfato desses indivíduos e no processamento dos diversos estímulos, visto que a atividade do neurônio VUMmx1, que inerva os glomérulos dos lobos antenais, está envolvida com a memória e aprendizagem em associação ao olfato das abelhas (Menzel e Giurfa, 2001), bem como outros estudos apontam que o córtex cerebral exerce papel importante na orientação espacial guiada pelo céu em abelhas (Held et al., 2016; Stone et al., 2017).

Esses achados corroboram os resultados de Pasquini et al. (2024), que identificaram acúmulo de MPs nos lobos ópticos de *A. mellifera* após 72h de ingestão de esferas de MPs de aminoformaldeído termofixo com concentração de 50 mg/L^{-1} . A análise, realizada por meio de reconstrução 3D, identificou aglomerações de MPs em diferentes profundidades do tecido (Pasquini et al., 2024). O diferencial do presente estudo é a utilização de concentrações relativamente baixas de MPs, escolhidas com base em valores plausíveis de ocorrência ambiental descritos na literatura (Fuller e Gautam, 2016; Harley-Nyang et al., 2023). Nossos resultados demonstram que, mesmo em níveis de exposição realistas, os MPs podem se acumular e se espalhar pelo organismo das abelhas.

As fotografias histológicas revelaram pontos de possível desorganização celular e formação de vacúolos nos tecidos do intestino e cérebro das abelhas expostas ao PS, mas apenas através das análises qualitativas não foi possível traçar relação de causa e efeito entre a ingestão das micropartículas e os danos celulares. Alterações na estrutura do intestino médio, como formação de vacúolos e diminuição da espessura do epitélio de abelhas *P. helleri*, já foram observadas após a exposição oral a nanopartículas (NPs) de dióxido de titânio, sugerindo um possível potencial de bioacumulação das NPs (Viana et al., 2025). Ressalta-se, porém, que as partículas utilizadas por esses autores tinham tamanho médio de $0,18 \pm 0,33 \mu\text{m}$, consideravelmente menores do que as partículas de PS utilizadas neste estudo, o que pode favorecer maior mobilidade e penetração nos tecidos.

Apesar de os microplásticos serem capazes de induzir estresse oxidativo e afetar a homeostase celular ao danificar macromoléculas como DNA, lipídios e proteínas (Alimba e Faggio, 2019), é necessário cautela na interpretação das alterações morfológicas visualizadas. Isso porque, neste estudo, foram utilizadas abelhas forrageiras, que são indivíduos mais velhos e, portanto, naturalmente mais suscetíveis a alterações teciduais decorrentes do envelhecimento. Ainda, danos mecânicos oriundos da manipulação dos tecidos durante o processamento histológico, assim como processos de regeneração celular, especialmente em tecidos com maior plasticidade, também podem contribuir para as alterações observadas. Nesse sentido, é importante o desenvolvimento de mais pesquisas que investiguem os mecanismos de deslocamento dos MPs nos tecidos, bem como os possíveis danos celulares decorrentes desse processo.

7. Conclusão

Diante dos resultados obtidos, fica evidente que as partículas de poliestireno (PS) ofertadas na dieta contaminada foram efetivamente ingeridas pelas abelhas *P. helleri* e deslocadas do trato digestivo para outros tecidos, incluindo a hemolinfa e o cérebro. A presença dessas partículas em regiões neurais, mesmo em concentrações ambientalmente realistas, demonstra o potencial dos MPs em atravessar barreiras fisiológicas e atingir outros tecidos, como observado nos lobos antenais e no córtex cerebral dos indivíduos. Com a medição e comparação das partículas ofertadas na dieta e aquelas encontradas no

intestino médio, hemolinfa e cérebro dos indivíduos, fica claro o potencial de deslocamento do PS após ingestão. Embora as análises histológicas revelem indícios de possíveis danos celulares, não foi possível, a partir deste estudo, estabelecer uma relação de causa e efeito definitiva entre a presença de MPs e as alterações morfológicas observadas. Esses achados reforçam a necessidade de aprofundar as investigações sobre os efeitos subletais dos MPs, especialmente em organismos polinizadores, uma vez que os impactos celulares e fisiológicos decorrentes da bioacumulação dessas partículas podem comprometer não apenas a saúde individual, mas também a sobrevivência das colônias.

8. Referências

AL NAGGAR, Y. et al. Exploring the risk of microplastics to pollinators: focusing on honeybees. *Environ Sci Pollut Res*. Vol. 31, pp. 46898-46909, jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34184-y>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ALIMBA, C. G. e FAGGIO, C. Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. Vol. 68, pp. 61-74, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.001>. Acesso em: 12 maio 2025.

ALMA, A. M.; GROOT, G. S. e BUTELER, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environ Pollut*. Vol. 320, p. 121078, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BALZANI, P. et al. Acute and chronic ingestion of polyethylene (PE) microplastics has mild effects on honeybee health and cognition. *Environ Pollut* vol. 305, p. 119318, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119318>. Acesso em 25 mar. 2025.

BUTELER, M. et al. Management practice for small hive beetle as a source of microplastic contamination in honey and honeybee colonies. *Environmental Pollution*. Vol. 334, p. 122151, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122151>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CAMARGO, J. M. F. e PEDRO, S. R. M. Meliponini Neotropicais: O Gênero *Partamona*

Schwarz, 1939 (Hymenoptera, Apidae, Apinae) - *Bionomia E Biogeografia*. Revista Brasileira de Entomologia, vol. 47, n. 3, pp. 311–372, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0085-56262003000300001>. Acesso em: 01 jul. 2025.

de SOUZA MACHADO, A. A. et al. Microplastics as an Emerging Threat to Terrestrial Ecosystems. *Global Change Biology*. Vol. 24, n. 4, pp. 1405–1416, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>. Acesso em: 01 abr. 2025.

DENG, Y. Microplastic polystyrene ingestion promotes the susceptibility of honeybee to viral infection. *Environ Sci Technol*. Vol. 55, pp. 11680-11692, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01619>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ENGEL, P. e MORAN, N. A. The gut microbiota of insects - diversity in structure and function. *FEMS Microbiology Reviews*. Vol. 37, pp. 699–735, set. 2013. Disponível em: <https://academic.oup.com/femsre/article-abstract/37/5/699/542120>. Acesso em: 01 maio 2025.

FULLER, S. e GAUTAM, A. Procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction. *Environ. Sci. Technol*. Vol. 50, pp. 5774-5780, maio 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00816>. Acesso em: 05 abr. 2025.

GIANNINI, T. C. et al. Polinizadores de culturas no Brasil: uma revisão das interações relatadas. *Apidologia*. Vol. 46, pp. 209–223, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13592-014-0316-z>. Acesso em: 02 maio 2025.

HARLEY-NYANG, D. et al. Variation in microplastic concentration, characteristics and distribution in sewage sludge & biosolids around the world. *Science of The Total Environment*. Vol. 891, p. 164068, set. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972302689X>. Acesso em: 20 maio 2025.

HARTMANN, N. B. et al. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*. Vol. 53, n. 3, pp. 1039–1047, jan. 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.8b05297>. Acesso em: 10 abr. 2025.

HELD, M. et al. Microglomerular Synaptic Complexes in the Sky-Compass Network of the Honeybee Connect Parallel Pathways from the Anterior Optic Tubercle to the Central

Complex. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol. 10, n. 7, out. 2016. Disponível em: www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5053983/https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00186. Acesso em: 01 jul. 2025.

HERRERO-LATORRE, C. et al. The Use of Honeybees and Honey as Environmental Bioindicators for Metals and Radionuclides: A Review. *Environmental Reviews*. Vol. 25, n. 4, pp. 463–480, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/er-2017-0029>. Acesso em: 14 abr. 2025.

JÄRLSKOG, I. et al. Occurrence of Tire and Bitumen Wear Microplastics on Urban Streets and in Sweepsand and Washwater. *Science of the Total Environment*. Vol. 729, p. 138950, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138950>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MARTINSON, V. G. et al. A simple and distinctive microbiota associated with honey bees and bumble bees. *Molecular Ecology*. Vol. 20, pp. 619–628, fev, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2010.04959.x>. Acesso em: 01 maio 2025.

MENZEL, R. e GIURFA, M. Cognitive Architecture of a Mini-Brain: The Honeybee. *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 5, n. 2, pp. 62–71, fev. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01601-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01601-6). Acesso em: 01 jul. 2025.

MORAN, N. A. et al. Distinctive gut microbiota of honey bees assessed using deep sampling from individual worker bees. *PLoS ONE*. Vol. 7, p. 36393, abr. 2012. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0036393>. Acesso em 01 maio 2025.

OLIVEIRA, A. H. et al. Morphology and Morphometry of the Midgut in the Stingless Bee *Friesella schorotkyi* (Hymenoptera: Apidae). *Insects*. Vol. 10, p. 73. Mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/insects10030073>. Acesso em: 16 jun. 2025.

PASQUINI, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey-bee cognition. *Sci Total Environ*. Vol. 912, p. 169362, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>. Acesso em 22 abr. 2025.

PEDRO, S. R. M. The Stingless Bee Fauna in Brazil (Hymenoptera: Apidae). *Sociobiology*, vol. 61, n. 4, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.348-354>. Acesso em: 01 jul. 2025.

RIBI, W. et al. Imaging Honey Bee Brain Anatomy with Micro-X-Ray-Computed Tomography. *Journal of Neuroscience Methods*. Vol. 171, n. 1, pp. 93–97, jun. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2008.02.010>. Acesso em: 09 maio 2025.

RODRIGUES, K. F. S. et al. Bees and Microplastic Studies: A Systematic Review. *Neotropical Entomology*. Vol. 54, n. 1, p. 56, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13744-025-01268-4>. Acesso em 22 abr. 2025.

STONE, T. et al. An Anatomically Constrained Model for Path Integration in the Bee Brain. *Current Biology*, vol. 27, n. 20, pp. 3069-3085, out. 2017. Disponível em: e11, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.08.052>. Acesso em: 01 jul. 2025.

VIANA, T. A. et al. Ingesting microplastics or nanometals during development harms the tropical pollinator *Partamona helleri* (Apinae: Meliponini). *Sci Total Environ*. Vol. 893, p.164790, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164790>. Acesso em: 01 maio 2025.

VIANA, T. A. et al. Physiological and behavioral effects of titanium dioxide nanoparticle exposure on stingless bee foragers. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 488, p. 1373315, maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137315>. Acesso em: 01 jun. 2025.

WANG, K. et al. Gut microbiota protects honeybees (*Apis mellifera* L.) against polystyrene microplastics exposure risks. *J Hazard Mater*. Vol. 402, pp. 123828, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123828>. Acesso em: 10 abr. 2025.

WANG, K. et al. Nano- and micro-polystyrene plastics disturb gut micro-biota and intestinal immune system in honeybee. *Sci Total Environ*. Vol. 842, p. 156819, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156819>. Acesso em: 10 abr. 2025.

WRIGHT, S. L. et al. The Physical Impacts of Microplastics on Marine Organisms: A Review. *Environmental Pollution*, Vol. 178, pp. 483–492, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>. Acesso em: 2 abr. 2025.

ZHANG, Y. et al. Atmospheric Microplastics: A Review on Current Status and Perspectives. *Earth-Science Reviews*. Vol. 203, p. 103118, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>. Acesso em: 10 abr. 2025.