



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
BACHARELADO EM GEOGRAFIA

MARINA KUNCEVICIUS PEREIRA

**FAUNA DE SOLO COMO BIOINDICADOR DE CONTAMINAÇÃO POR METAIS
PESADOS NO CAMPUS BUTANTÃ DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**
*Soil fauna as bioindicator of heavy metal contamination in the Butantã Campus of the
Universidade de São Paulo*

São Paulo - SP
2024

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
BACHARELADO EM GEOGRAFIA**

**FAUNA DE SOLO COMO BIOINDICADOR DE CONTAMINAÇÃO POR METAIS
PESADOS NO CAMPUS BUTANTÃ DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

*Soil fauna as bioindicator of heavy metal contamination in the Butantã Campus of the
Universidade de São Paulo*

MARINA KUNCEVICIUS PEREIRA

Trabalho de Graduação Individual apresentado à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Área de Concentração: Geografia Física - Pedologia

Orientadora: Prof^a Dr^a Déborah de Oliveira

**SÃO PAULO - SP
2024**

MARINA KUNCEVICIUS PEREIRA

**FAUNA DE SOLO COMO BIOINDICADOR DE CONTAMINAÇÃO POR METAIS
PESADOS NO CAMPUS BUTANTÃ DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Trabalho de Graduação Individual apresentado à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

BANCA EXAMINADORA

Profª Drª Déborah de Oliveira
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH)
Universidade de São Paulo (USP)

Profª Drª Natália Nunes Patucci
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH)
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Rubens Cesar Lopes Figueira
Instituto Oceanográfico (IO)
Universidade de São Paulo (USP)

SÃO PAULO
2024

AGRADECIMENTOS

À Prof^a Dr^a **Déborah de Oliveira**, pela inspiração e pelas inúmeras oportunidades, orientações, apoios e experiências ao longo da graduação.

À Prof^a Dr^a **Natália Nunes Patucci**, cuja Dissertação de Mestrado inspirou o presente trabalho e cujas aulas de Estágio Supervisionado em Análise de Solos proporcionaram os conhecimentos necessários para a elaboração desta dissertação. Também, pela co-orientação, apoio, conselhos, dicas e imensurável companheirismo ao longo deste último ano de graduação.

Ao Prof. Dr. **Rubens Cesar Lopes Figueira**, por todo apoio, oportunidades, experiências, ensinamentos e pela confiança e permissão para utilizar as dependências, equipamentos, métodos e materiais do Laboratório de Química Inorgânica Marinha (LaQIMar - IOUSP), sem os quais as análises deste trabalho não seriam possíveis.

Ao pesquisador **Paulo Alves de Lima Ferreira**, pela imensurável paciência e ajuda durante a elaboração das análises físico-químicas e tabelas apresentadas neste trabalho.

Aos meus **amigos**, por todo o apoio durante a graduação e pela companhia, risadas, passeios e momentos de descontração.

Ao meu namorado, **Gabriel**, por sempre acreditar em mim, por estar do meu lado nos momentos bons e ruins, e por sempre me lembrar do meu potencial.

Aos meus pais, **Tereza e Fábio**, pelo imensurável apoio, cuidado e carinho de sempre, por confiarem e acreditarem em mim e por me incentivarem a não desistir dos meus sonhos.

RESUMO

O solo é um recurso natural essencial para a vida, sendo fonte de alimentos, substrato sob o qual a humanidade constrói suas estruturas e habitat para 25% da biodiversidade terrestre (FAO-UN, 2020). Portanto, quaisquer ameaças a esse recurso são ameaças à vida que dele depende. A contaminação do solo por metais pesados diante de atividades de construção civil, mineração e descarte de rejeitos tem, como principal consequência, alteração e morte da fauna. Assim, este trabalho busca utilizar a fauna de solo como bioindicador da contaminação do solo por metais pesados, identificando nos organismos coletados, alterações morfológicas e comportamentais. A localidade escolhida foi a Raia Olímpica do campus Butantã da Universidade de São Paulo, devido ao seu histórico com a mineração, atividade comumente associada à contaminação por metais pesados. Estudou-se a fauna do solo dessa localidade, na intenção de demonstrar sua acurácia como bioindicadora da presença ou ausência dessa contaminação.

Palavras-chave: fauna de solo, bioindicador, contaminação, metais pesados.

ABSTRACT

Soil is a natural resource that is essential to life, being a source of food, substrate upon which humanity builds its structures and habitat to 25% of Earth's biodiversity (FAO-UN, 2020). Therefore, any threats to this resource are threats to the life that depends on it. Soil contamination by heavy metals due to activities like civil construction, mining and waste disposal present, as main consequence, alterations and mortality of fauna. Thus, this research used soil fauna as a bioindicator of soil contamination by heavy metals, identifying in the collected organisms, morphological and behavioral alterations. The chosen locality was the Olympic Lane of the Butantã campus of the Universidade de São Paulo, due to its history with mining, an activity commonly associated with heavy metal contamination. Soil fauna in this locality was studied with the intention of demonstrating its accuracy as a bioindicator of the presence or absence of such contaminants.

Key-words: *soil fauna, bioindicator, contamination, heavy metals.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pirâmide representando a quantidade de organismos presentes em 1m ² de solo.....	8
Figura 2 - Barranco no qual as amostras do Ponto 1 foram coletadas.....	16
Figuras 3 e 4 - Espécime I da amostra 1a: soldado de <i>Camponotus mus</i>	17
Figuras 5 e 6 - Espécime II da amostra 1a: outro soldado de <i>Camponotus mus</i>	17
Figura 7 - Espécime III da amostra 1a: operária menor de <i>Camponotus mus</i>	18
Figura 8 - Espécime IV da amostra 1a: outra operária menor de <i>Camponotus mus</i>	18
Figuras 9 e 10 - Galeria cilíndrica associada à passagem de minhocas na amostra 1b	19
Figuras 11 e 12 - Espécimes de <i>Formica moki</i> e <i>Acromyrmex lundii</i> da amostra 1c.....	20
Figuras 13 e 14 - Torrões amarelados da amostra 1c.....	20
Figuras 15 e 16 - Três operárias menores e uma operária maior de <i>C. mus</i> na amostra 1d....	21
Figuras 17 a 21 - <i>P. corethrurus</i> encontradas nas amostras 2a e 2b, nota-se a presença clara de solo no sistema digestivo dos animais.....	23
Figura 22 e 23 - Pedaços de isopor enterrados na amostra 3c.....	25
Figura 24 - Espécime de <i>P. corethrurus</i> encontrado na amostra 3a.....	25
Figura 25 - Espécime de <i>P. corethrurus</i> encontrado na amostra 3b.....	26
Figuras 26 e 27 - As duas larvas de <i>D. abderus</i> , encontradas na amostra 3c	26
Figuras 28 e 29 - Espécime de <i>G. flavus</i> encontrados na amostra 3d.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da pedofauna por tamanho.....	9
Tabela 2 - Teores de MO e frações grossa ($>63\ \mu\text{m}$) e fina ($<63\ \mu\text{m}$) no Ponto 1.....	15
Tabela 3 - Teores de MO e frações grossa ($>63\ \mu\text{m}$) e fina ($<63\ \mu\text{m}$) no Ponto 2.....	22
Tabela 4 - Teores de MO e frações grossa ($>63\ \mu\text{m}$) e fina ($<63\ \mu\text{m}$) no Ponto 3.....	24
Tabela 5 - Comparação entre os valores (em mg/kg) obtidos por XRF e os valores certificados para o material de referência OREAS 70b.....	27
Tabela 6 - Comparação entre os valores (em mg/kg) obtidos por XRF e os valores certificados para o material de referência BCR 667.....	27
Tabela 7 - Comparação entre os valores (em mg/kg) obtidos por XRF e os valores certificados para o material de referência SS-2.....	28
Tabela 8 - Valores de Intervenção (VI) Residencial (em mg/kg) para os cinco metais pesados escolhidos para análise, vide atualização mais recente pela CETESB em 2021....	29
Tabela 9 - Concentrações (em mg/kg) de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas por XRF para o Ponto 1.....	30
Tabela 10 - Concentrações (em mg/kg) de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas por XRF para o Ponto 2.....	31
Tabela 11 - Concentrações (em mg/kg) de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas por XRF para o Ponto 3.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVA.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivos Gerais.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR METAIS PESADOS.....	4
3. FAUNA DE SOLO: DEFINIÇÕES E CONCEITOS.....	7
3.1. DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA.....	7
3.2. SOLOS CONTAMINADOS: IMPLICAÇÕES À FAUNA.....	9
3.3. FAUNA DE SOLO COMO BIOINDICADORA DE CONTAMINAÇÃO.....	11
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
4.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	12
4.2. COLETA DE AMOSTRAS E ORGANISMOS.....	12
4.3. ANÁLISE DE PARÂMETROS MACROMORFOLÓGICOS.....	12
4.4. ANÁLISE DA PEDOFAUNA MACROSCÓPICA ENCONTRADA.....	13
4.5. ANÁLISE DE MATÉRIA ORGÂNICA E GRANULOMETRIA.....	14
4.6. ANÁLISE DE METAIS PESADOS POR XRF.....	14
5. RESULTADOS.....	15
5.1. ANÁLISE MACROMORFOLÓGICA E BIOLÓGICA.....	15
5.1.1. Ponto 1 - Amostras 1a, 1b, 1c e 1d.....	15
5.1.2. Ponto 2 - Amostras 2a, 2b, 2c e 2d.....	21
5.1.3. Ponto 3 - Amostras 3a, 3b, 3c e 3d.....	23
5.2. ANÁLISE DE METAIS PESADOS POR XRF.....	26
5.2.1. Ponto 1 - amostras 1a, 1b, 1c e 1d.....	29
5.2.2. Ponto 2 - amostras 2a, 2b, 2c e 2d.....	31
5.2.3. Ponto 3 - amostras 3a, 3b, 3c e 3d.....	31
6. CONCLUSÕES.....	33
7. BIBLIOGRAFIA.....	34

1. INTRODUÇÃO

No século XIX, o naturalista britânico Charles Darwin foi um dos primeiros estudiosos a reconhecer a importância da fauna edáfica para a manutenção da fertilidade do solo, destacando a importância das minhocas no revolvimento e turbação do solo (LEPSCH, 2002). A relação entre a fauna e o solo é uma de beneficiamento mútuo, pois enquanto os animais obtêm do solo sua alimentação, habitat e proteção contra predadores e intempéries, o solo em si é beneficiado pela presença desses seres, responsáveis por potencializar a infiltração de água e ar através das pedotubulações, assim como as dinâmicas de formação e disponibilização de nutrientes e matéria orgânica para o crescimento vegetal. Segundo PRIMAVESI (2002):

Os seres vivos no solo fazem parte dele, modificando-o e influenciando-se mutuamente. O solo é formado através de sua vida, e a vida é típica às características específicas do solo. Quer dizer: o solo determina sua vida e a vida determina o solo. (PRIMAVESI, 2002, p. 147).

Assim, sabe-se que a fauna edáfica, ou “pedofauna”, está diretamente associada às dinâmicas químico-físicas do solo, podendo servir como indicadora de seu equilíbrio ecossistêmico. Uma vez que compostos tóxicos são inseridos no solo e o mesmo torna-se contaminado, a fauna é uma das primeiras afetadas. Em relação à pedofauna, um solo contaminado pode sofrer com a diminuição ou desaparecimento de certas espécies devido a morte ou fuga, aparecimento de espécies invasoras, perda de estruturas como os biotubos e alterações no bem-estar dos animais (como mutações, perda de membros, etc.). Dessa forma, a pedofauna pode ser utilizada como um “indicador biológico” da ocorrência de contaminação. Várias espécies de animais são conhecidas pelos estudiosos como bioindicadores de contaminação, devido à sua capacidade de acumular e excretar contaminantes.

Bioindicador é a espécie ou o grupo de espécies que reflete os níveis bióticos e abióticos de contaminação de um ambiente, apresentando alterações que possibilitam a geração de informações sobre a qualidade do ambiente, como, por exemplo, informações sobre o acúmulo de substâncias em concentrações superiores às consideradas normais ou essenciais (...). (TIECHER & CLASEN, 2023, p. 305).

Ademais, um dos principais contaminantes dos solos na atualidade são os compostos conhecidos como “metais pesados”, assim chamados por conta de sua alta densidade, e conhecidos por sua perigosa capacidade de bioacumulação. Em pequenas quantidades, essas

substâncias são comuns na composição química geral do solo, sendo provenientes da intemperização de variados minerais presentes na rocha-mãe. Entretanto, atividades antrópicas de construção civil, mineração, agricultura, indústria e etc. podem gerar rejeitos e resíduos compostos por metais pesados, que, devido ao descaso com o descarte desses rejeitos, acabam indo parar nos solos em quantidades elevadas e prejudiciais à sua saúde e manutenção.

Ainda segundo TIECHER & CLASEN (2023), os invertebrados do solo são importantes bioindicadores da presença de contaminantes como metais pesados no solo. Os autores destacam a importância das minhocas como bioindicadores pois, ao escavar e ingerir o solo, entram em contato com quaisquer substâncias contaminantes nele, devido não só ao processo de digestão do solo e formação de húmus, mas também devido ao contato direto dos contaminantes com a cutícula cutânea absorvente desses animais. Outros que servem como bioindicadores da presença de metais pesados em níveis elevados no solo são os insetos (especialmente formigas, cupins e besouros), aracnídeos, miríapodes e etc.

Doravante, o presente trabalho propõe um estudo de uma área significativa do Campus Butantã da Universidade de São Paulo, a Raia Olímpica, cuja história interessantíssima remonta ao início da construção do campus, quando a área atualmente alagada da Raia -- onde hoje praticam-se diversos esportes, como canoagem e remo -- era uma cava de mineração de areia. Assim, buscar-se-á identificar, através da análise do solo e de sua pedofauna, coletados em três diferentes pontos ao longo da área escolhida, se há contaminação por metais pesados no solo.

Através da coleta de quatro amostras de solo em cada um dos três pontos escolhidos (totalizando doze amostras), serão realizadas: análise da pedofauna encontrada e análise química e física em laboratório através da técnica conhecida como XRF (do inglês, *X-Ray Fluorescence* ou Fluorescência de Raios-X), buscando reconhecer, caracterizar e analisar os espécimes animais encontrados, na intenção de utilizá-los como bioindicadores da presença (ou ausência) de contaminação por metais pesados no solo coletado.

1.1. JUSTIFICATIVA

A fauna do solo é um dos principais indicadores de saúde e manutenção do solo, pois a degradação deste leva a uma série de desequilíbrios ecológicos, causando a morte e/ou a alteração das formas de vida que dele dependem. Segundo PRIMAVESI (2002): “Não existem seres isolados, (...) somente comunidades. E a comunidade pode ser alterada pela modificação

de qualquer um dos fatores do meio ambiente. O que existe no solo são equilíbrios dinâmicos” (p. 158). Dessa forma, analisar a pedofauna de um solo é uma maneira eficaz de identificar se há equilíbrio químico-físico naquele solo, pois tal equilíbrio está diretamente associado à questão biológica.

Os principais organismos encontrados no solo são invertebrados (com destaque para os anelídeos e os artrópodes como insetos, aracnídeos, milípedes e etc.), sendo tais animais e seus ciclos reprodutivos fortemente influenciados pelas dinâmicas pedológicas. Como destacam TIECHER & CLASEN (2023): “Organismos muito utilizados na avaliação do grau de perturbação de um solo (...) são os invertebrados que [o] habitam” (p. 309). Assim, os invertebrados, como principal grupo da macrofauna do solo, são excelentes bioindicadores de contaminação por metais pesados, principalmente devido à bioacumulação desses compostos.

Ademais, a área escolhida para o trabalho em questão foi cuidadosamente escolhida. Levando em consideração a história dessa localidade, é possível que haja contaminação do solo por metais pesados devido às atividades de mineração, construção civil e descarte dos rejeitos produzidos por essas atividades. Segundo ALLOWAY (1990), na obra “*Heavy Metals in Soils*”, a mineração e a construção civil são citadas como principais fontes de contaminação por metais pesados. A utilização da análise da fauna edáfica como bioindicadora dessa contaminação demonstra não só a importância da pedofauna para o solo e como alterações nele a afetam, mas também, a importância de analisar-se o solo como um sistema químico, físico e biológico, no qual todas essas esferas estão constantemente associadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é identificar possível contaminação de solo por metais pesados no campus Butantã da Universidade de São Paulo, através da coleta, identificação, caracterização e análise da pedofauna encontrada em três pontos localizados ao longo da Raia Olímpica, escolhida para análise por sua importância para a comunidade USP e seu histórico na mineração e construção civil.

1.2.2. Objetivos específicos

Citam-se: observar a importância da pedofauna para a estrutura do solo, identificando, quando possível, a presença de biotubulações e galerias; reconhecer como alterações no solo,

como a inserção de compostos tóxicos, pode afetar a pedofauna; utilizar a pedofauna como bioindicadora de possível contaminação por metais pesados nas localidades de interesse; analisar as características físicas (estrutura, textura, porosidade, etc.) e químicas (macro e micronutrientes, contaminantes, etc.) do solo estudado; demonstrar como o solo é um sistema bioquímico-físico, no qual essas três esferas estão sempre conectadas, tanto que quaisquer alterações em uma delas irá gerar reflexos nas outras. Isto é, compreender a relação entre a biologia do solo e sua estabilidade e estruturação física e composição e equilíbrio químico.

2. CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR METAIS PESADOS

O fenômeno conhecido por “contaminação ambiental” é, por definição da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), caracterizado pela introdução de algum agente, elemento ou composto que é, por si só, indesejável, ou que é introduzido em quantidades indesejáveis em um meio previamente saudável. Ainda, a Academia de Ciências do Estado de São Paulo caracteriza um contaminante como “Substância ou composto que afeta negativamente o ecossistema, capaz de provocar alterações na estrutura e funcionamento das comunidades” (ACIESP, 1987). Ademais, é essencial destacar que a contaminação, isto é, a inserção (ou aumento dos teores) de compostos indesejados em um meio, pode, com o tempo, levar ao fenômeno conhecido como “poluição”, que inicia-se quando a contaminação passa a ter efeitos deletérios na biodiversidade do meio, incluindo não só consequências à fauna e flora, mas também, à saúde humana (SILVA & BOTELHO, 2014, p. 283).

Atualmente, embora várias formas de degradação atinjam os solos brasileiros -- como a desertificação, a acidificação e a erosão --, nenhuma é tão expressiva nos grandes centros urbanos como a contaminação. O fato dos solos urbanos estarem comumente cobertos por cimento não significa que estão protegidos das enormes quantidades de compostos e substâncias químicas diariamente produzidas, utilizadas e descartadas nas cidades. Tais solos são ameaçados por uma gama de substâncias estranhas à sua composição original e potencialmente nocivas, embora amplamente utilizadas nas indústrias da construção civil, limpeza, tecnologia, mineração, siderurgia, galvanoplastia, comercialização de combustíveis, etc. O Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo, publicado pela CETESB em 2020, destaca como principais contaminantes dos solos urbanos, não só os

combustíveis derivados do petróleo (gasolina, diesel, etc.) mas também, os chamados metais pesados¹ (os quais são o foco deste trabalho).

Enquanto a contaminação do solo por combustíveis derivados do petróleo limita-se, nas áreas urbanas, aos arredores dos postos de combustíveis e seus tanques subterrâneos de armazenamento, a contaminação por metais pesados possui origens mais amplas. Segundo ALLOWAY (1990), as principais fontes de metais pesados, como Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Mercúrio (Hg) e Antimônio (Sb) no solo são as atividades de metalurgia e siderurgia, mineração, e descarte de rejeitos urbanos, industriais, hospitalares e etc.

[o descarte inadequado do lixo urbano] leva à contaminação (...) pelos metais associados a diferentes tipos de materiais presentes no lixo, como Cd (plásticos, pilhas e baterias), Pb (metais ferrosos, tintas, papel, pilhas e baterias), Cu (metais ferrosos), Cr (couro), Zn (borracha) e Ni (pilhas e baterias). Nas indústrias de mineração (...), comumente, observam-se elementos constituintes não desejáveis. (BURAK *et al*; 2017).

Compreende-se que, uma certa quantidade de determinados metais pesados é esperada em certos tipos de solo -- baseando-se na composição da rocha mãe. Entretanto, elevadas quantidades desses materiais mostram-se extremamente tóxicas à morfologia e à biota do solo, podendo levar à poluição deste e causando consequências como perda de estrutura do solo, alteração textural, morte e fuga da biota, comprometimento da qualidade do ar e das fontes de água subterrânea, como destaca LEPSCH (2002).

Ainda, é interessante notar que diversos autores explicam que a argilosidade e a matéria orgânica de um solo têm papel importantíssimo no que diz respeito ao potencial de adsorver, armazenar e liberar metais pesados aos quais tais solos são expostos diante da atividade humana, como explica LEPSCH (2002):

A argila (...) é bastante ativa quimicamente. A grande atividade dessa fração deve-se ao pequeno tamanho de suas partículas, o que lhes confere propriedades coloidais. A mais importante dessas propriedades é a afinidade pela água e por elementos químicos nela dissolvidos e que é devida à vasta superfície específica e à existência de muitas cargas elétricas nessa superfície. (LEPSCH, 2010, p. 49).

Assim, comprehende-se que quanto maior a argilosidade de um solo, maior é sua capacidade de adsorver, reter e, consequentemente, liberar íons metálicos no meio. O perigo disso está não só nas consequências morfológicas para o próprio sistema solo, mas também, nas consequências para a biota que dele depende e de todo o ecossistema onde tal solo está

¹ “O professor Rubens Figueira, especialista em Oceanografia Química do Instituto Oceanográfico (IO) da USP, explica que o termo ‘metais pesados’ não se refere necessariamente a metais, mas sim a ‘elementos químicos potencialmente tóxicos, entre os quais se destacam o arsênio, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco’ ” (SOUSA, G. C. Jornal da USP no Ar, 2023).

inserido, novamente, LEPSCH (2010) destaca que um solo contaminado pode poluir a água e o ar (p. 50). Isto é, a contaminação dos solos afeta não só suas características morfológicas e sua biota nativa, mas também, possui um grande potencial de afetar a saúde humana à medida em que rios, lagos, fontes de água subterrânea e o próprio ar que se respira, são contaminados por metais pesados nos solos.

Além da natureza do material de origem, outros fatores como o teor e a composição da fração argila, conteúdo de matéria orgânica e condições físico-químicas dos solos podem influenciar sua concentração em metais pesados. (FADIGAS *et al*; 2002).

Ainda sobre as consequências dessa forma de contaminação dos solos:

Os metais pesados são elementos não biodegradáveis (...). Esses elementos ainda podem ser bioacumulados, ou seja, podem ser acumulados nos seres vivos. (GUEDES, 2008).

Portanto, comprehende-se que o estudo das origens e características da contaminação de solos urbanos por metais pesados é essencial na atualidade, diante do crescimento desenfreado das cidades e suas populações. Além disso, é imprescindível chamar atenção para as consequências desse fenômeno para o meio ambiente e os organismos que nele vivem, incluindo os seres humanos.

Por fim, há uma gama de experimentos, técnicas, métodos e equipamentos que podem ser utilizados para identificar a presença desses contaminantes. Chamam a atenção experimentos como ensaios com fluorescência de raios-X e utilização de Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (*ICP-OES*), entre outros. Além das análises químicas, é possível identificar a presença de metais pesados em teores elevados no solo através de análises biológicas. Isto é, utilizar a biota do solo (plantas, animais, bactérias, fungos e etc.) como “bioindicador” da presença de contaminação, através da análise das características morfológicas, comportamentais e possíveis alterações e mutações decorrentes da interação de organismos vivos com contaminantes.

[Bioindicador] é a espécie ou o grupo de espécies que reflete os níveis bióticos e abióticos de contaminação de um ambiente, apresentando alterações que possibilitam a geração de informações sobre a qualidade do ambiente, como, por exemplo, informações sobre o acúmulo de substâncias em concentrações superiores às consideradas normais ou essenciais. (...) Organismos muito utilizados na avaliação do grau de perturbação de um solo em função das atividades humanas ou da intensificação de seu uso são os invertebrados que habitam o solo. (TIECHER & CLASEN, 2023, p. 308-309).

Sendo assim, reitera-se a importância da vida no solo para o planeta: um solo saudável armazena mais carbono do que a atmosfera e a vegetação juntas, sendo que grande parte dessa absorção de Carbono atmosférico pelo solo é viabilizada e potencializada pelos organismos

que nele vivem, como destacado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2020). Dessa forma, é indubitável a relação entre a saúde do solo e a saúde de sua biota, sendo que alterações químico-físicas no solo causam diversos malefícios à sua estrutura, textura, porosidade, teores de nutrientes e, consequentemente, à sua fauna.

3. FAUNA DE SOLO: DEFINIÇÕES E CONCEITOS

3.1. DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA

A fauna de solo, também chamada de “Pedofauna” ou “fauna edáfica” (referente à edafologia, estudo das interações entre o solo e os seres vivos), é o grupo de membros do Reino *Animalia* que vivem no subsolo ou que passam parte significativa de sua vida (como estágios larvais e períodos de incubação de ovos) dentro do solo. Os membros mais conhecidos desse grupo são os invertebrados: anelídeos como as minhocas, aracnídeos como aranhas e escorpiões, quilópodes como centopéias e lacraias e, principalmente, insetos como formigas, cupins, e besouros, colêmbolos e etc. Além disso, o solo também é habitat para vertebrados, como aves (corujas-buraqueiras), mamíferos (toupeiras, tatus, coelhos, ratos), répteis (cobras, lagartos, jabutis). E não menos importante, o solo é o local onde animais como aves e répteis depositam seus ovos para mantê-los protegidos das intempéries e predadores. Sendo assim, o solo torna-se um rico ecossistema, com suas próprias cadeias tróficas entre as milhares de espécies que nele habitam.

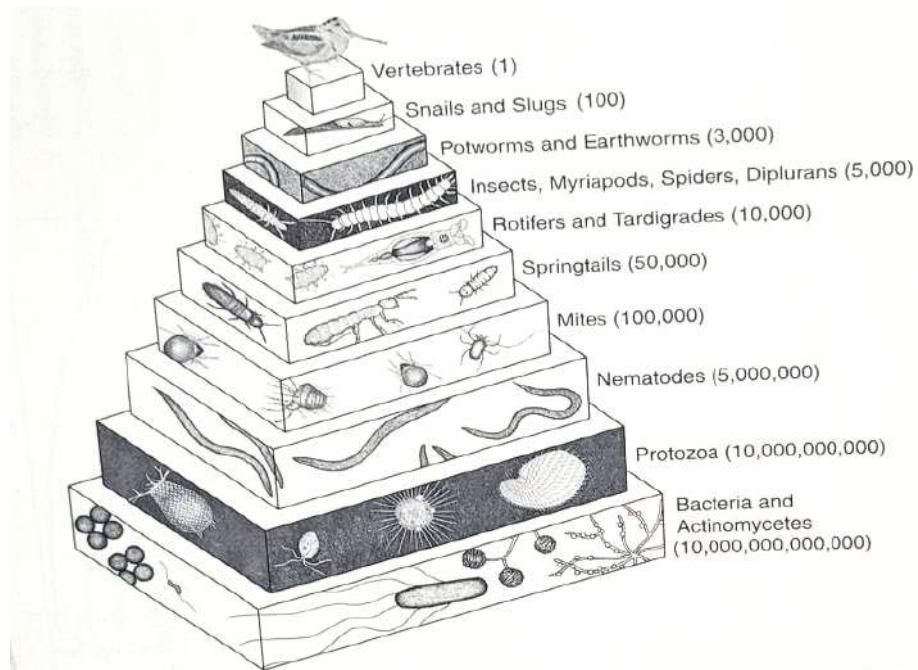
Além disso, os membros da pedofauna desempenham uma série de papéis essenciais para a formação e desenvolvimento do solo, como a bioturbação, a digestão da matéria orgânica, a formação e disponibilização de adubos orgânicos como o húmus, o controle de parasitas e espécies invasoras e outros.

No caso de parâmetros físicos, os invertebrados edáficos podem influenciar na agregação e descompactação de solo, aeração, porosidade, percolação e armazenamento de água; nos químicos, os organismos edáficos são agentes na ciclagem de nutrientes e mineralização de resíduos orgânicos e nos biológicos, colaboram com a decomposição e disseminação de esporos (JAMES *et al.*, 2015). Logo, o conhecimento dessas comunidades e suas funções são indispensáveis para a preservação da biodiversidade no solo e seu funcionamento. (PATUCCI *et al.*; 2018, p. 78).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (do inglês, FAO - UN), o número de organismos presentes em uma colher de sopa de solo é maior que o número de humanos na Terra. NARDI (2007) representa, na Figura 1, como os animais

invertebrados compõem grande parte da fauna do solo, totalizando cerca de 170.000 organismos por m² de solo.

Figura 1 - Pirâmide representando a quantidade de organismos presentes em 1m² de solo.



Fonte: James B. Nardi, 2007, p. 27.

Enquanto o solo é essencial para a sobrevivência desses organismos, tal relação é uma de benefício mútuo, pois a presença da pedofauna é importante para a manutenção de diversas características morfológicas dos solos, como a textura e a estrutura. Animais como as minhocas são responsáveis por digerir a matéria orgânica no solo, originando adubo orgânico (húmus). Ademais, a fauna edáfica é responsável pelos “pedotubos”, “bioporosidades” ou “bioturbações”, que são buracos, caminhos e galerias criados pela passagem dos animais e de extrema importância para a infiltração de água e ar e para a ciclagem de nutrientes no solo.

Os animais que se abrigam no solo, constantemente trituram os restos dos vegetais, cavam galerias e misturam materiais dos diversos horizontes. Entre os que podem promover grande movimentação dos materiais do solo, estão as formigas, os cupins (ou termitas) e os vermes (principalmente minhocas). Além desse revolvimento, suas carcaças e resíduos contribuem para a formação do húmus e dos agregados. (LEPSCH, 2010, p. 66).

Ainda, há vários parâmetros sobre os quais a fauna do solo pode ser classificada, como diâmetro do corpo, mobilidade, habitat, hábito alimentar, tempo de presença no solo e outros. A classificação por tamanho costuma ser a mais utilizada, mas possui diferentes definições. A Tabela 1 apresenta uma sugestão de classificação baseada em LAVELLE *et al.* (1994) e DIONÍSIO & SIGNOR (2012).

Tabela 1 - Classificação da pedofauna por tamanho.

Nomenclatura	Tamanho	Exemplos	Observações
Microfauna	<0,2 mm	Tardígrados, rotíferos, colêmbolos, nemátodos	Dependentes de ambientes úmidos.
Mesofauna	entre 0,2 e 4 mm	Algumas espécies de ácaros, insetos e aracnídeos	Auxiliam na humificação do solo.
Macrofauna	entre 4 mm e 20 cm	Algumas espécies de insetos, aracnídeos, anelídeos, miríapodes, e crustáceos	Responsáveis pela bioturbação e ciclagem de nutrientes
Mega fauna ²	>20 cm	Mamíferos, aves, répteis e anfíbios	Criam grandes tocas, ninhos e galerias.

Fonte: elaborado pela autora (2024). Adaptado de LAVELLE, *et al.* (1994) e DIONÍSIO & SIGNOR (2012).

Percebe-se que, embora a maior parte da fauna do solo seja parte da Micro e Mesofauna (dificilmente visíveis a olho nu), os organismos mais conhecidos e associados à vida no solo são os membros da Macrofauna, com destaque para minhocas, formigas, cupins, besouros, aranhas e miríapodes. Esses animais são responsáveis por grande parte da bioturbação do solo, auxiliando na infiltração de água e ar, assim como constroem incríveis bioconstruções -- como formigueiros, cupinzeiros e casulos de besouros --, importantes indicadores de solos com boa estrutura e textura. Ademais, esses animais, com destaque para as minhocas, são essenciais no processo de transformação da matéria orgânica do solo em húmus, adubo orgânico. E, também, a alimentação e excreção desses animais é importante para diversos processos relacionados aos ciclos de nutrientes no solo.

Portanto, comprehende-se que o solo é um ecossistema extremamente rico em vida, contendo milhares -- senão milhões -- de animais (e outros organismos) vivendo nele e participando de seus processos. Dessa forma, é indiscutível que a pedofauna tem um papel importantíssimo na manutenção da saúde e estabilidade do solo, estando em uma relação de benefício mútuo com esse recurso.

3.2. SOLOS CONTAMINADOS: IMPLICAÇÕES À FAUNA

Uma vez compreendidos os conceitos e definições acerca da fauna do solo, sua importância para a manutenção desse recurso e como alterações físico-químicas na composição e estrutura pedológicas podem afetar a pedofauna, destaca-se como a

² É importante não confundir a mega fauna do solo com a mega fauna estudada pela paleontologia e composta por animais como preguiças-gigantes, tigres-dente-de-sabre, tatus-gigantes, mamutes, etc.

contaminação -- isto é, a inserção de elementos, compostos e substâncias indesejáveis ou em quantidades indesejadas no solo --, afeta sua fauna negativamente.

Em relação à contaminação, como destacado anteriormente, focar-se-á, no presente trabalho, na contaminação de solos urbanos por metais pesados, comum nas cidades devido às atividades de mineração, metalurgia, fabricação de diferentes produtos cotidianos e o descarte de rejeitos e resíduos urbanos e industriais. Compreende-se que, a depender da rocha-mãe da qual o solo estudado originou-se, pode haver variadas concentrações dos mais diferentes elementos, incluindo os metais pesados. Na grande maioria das vezes, os teores desses metais em um solo são mínimos o bastante para que sejam chamados de “elementos-traço” e, em tais pequenas quantidades, alguns metais como o Cobre (Cu) possuem importantes funções biológicas. O problema começa quando há a inserção de compostos sem importância biológica, como o Chumbo (Pb) e o Mercúrio (Hg), ou aumento dos teores dos elementos-traço já existentes.

Os organismos vivos necessitam destes componentes em mínimas quantidades para sobrevivência e funcionamento normal dos processos bioquímicos. (...) Em algumas condições os metais podem atuar de maneira nociva, apresentando níveis tóxicos. (BROTT & FIRMINO, 2014).

Essa alteração na composição química original do solo afeta, sem dúvidas, a fauna que nele vive. BELSKAYA *et al.* (2019), MITIC *et al.* (2023) e DE SÁ *et al.* (2024) destacam consequências fisiológicas e comportamentais observadas em invertebrados diante de altos teores de metais pesados no solo. Entre as principais consequências citadas, chamam a atenção a formação de corcundas em formigas, o enrolamento do corpo de minhocas e, principalmente, a mortalidade e diminuição do tamanho das populações e colônias, assim como abruptos desaparecimentos de espécies esperadas ou antes encontradas no solo.

Ademais, autores como MIGLIORINI *et al.* (2004) explicam que invertebrados são mais suscetíveis aos efeitos nocivos da contaminação de solos por metais pesados devido ao fato de viverem, em sua maioria, “vidas estacionárias”. Animais maiores, como mamíferos, aves e répteis geralmente vivem vidas mais “móveis”. Mesmo populações de tatus e toupeiras podem cobrir grandes extensões de terra, enquanto os invertebrados com seus diminutos tamanhos, geralmente são mais limitados a ocupar apenas as áreas onde constroem seus ninhos, formigueiros, cupinzeiros e etc; raramente se aventurando por maiores extensões (NARDI, 2007).

Portanto, percebe-se que a contaminação de solos por metais pesados é capaz de causar mudanças facilmente perceptíveis nas fisionomias dos animais, mudanças

comportamentais em populações observadas e gerar fuga ou morte de colônias. Assim, a fauna do solo, especificamente os invertebrados, pode ser uma ferramenta de extrema utilidade para estudos de saúde do solo.

3.3. FAUNA DE SOLO COMO BIOINDICADORA DE CONTAMINAÇÃO

Há várias razões pelas quais pode-se considerar os invertebrados do solo como bons indicadores biológicos da presença de contaminação no solo.

Brown *et al.* (1995) enfatiza que alteração na abundância, diversidade e composição de [bio] indicadores mede a perturbação do ambiente, apresentando estes respostas mais rápidas que outros atributos pedológicos. (COUSSEAU, 2017).

Isto é, a análise da pedofauna providencia sinais mais fácil e rapidamente mensuráveis e perceptíveis da presença de contaminantes no solo, em comparação com métodos de análise de outros atributos pedológicos. A pedofauna como bioindicadora também traz o benefício de ser um método relativamente fácil de aplicar, já que há diversos meios simples e baratos de capturar invertebrados para fins de estudo das condições de seu habitat, como o método TSBF (*Tropical Soil Biology and Fertility Method*) e as famosas armadilhas *Pitfall*.

Ademais, MIGLIORINI *et al.* (2004) e GRZÉS (2010) destacam que, como anteriormente mencionado, o estilo de vida “estacionário” de invertebrados do solo significa que os mesmos acabam mais expostos a possíveis contaminantes do que os vertebrados de vida “móvel”. Invertebrados como formigas e cupins literalmente vivem restritos à área imediata ao redor de seu formigueiro ou cupinzeiro, assim como aranhas geralmente ficam restritas às suas teias e tocas e minhocas apresentam maior movimentação vertical pelo solo.

*The intricate relationships of edaphic invertebrates with their ecological niches in soil, the fact that many of them live a rather sedentary life, and the stability of community composition at a specific site provide good starting points for bioindication of changes in soil properties and the impact of human activity (van Straalen, 1998). (MIGLIORINI *et al.*; 2004).³*

Finalmente, segundo a HOPWOOD, MAY & FRISCHIE (2022) e a *Xerces Society for Invertebrate Conservation* (2022), os invertebrados do solo podem ser ótimos bioindicadores de saúde do solo pois atendem às principais exigências para um bom bioindicador: sensibilidade a alterações ambientais, facilmente reconhecível, bem distribuído, fácil de encontrar e bem documentado.

³ As intrincadas relações entre os invertebrados edáficos e seus nichos ecológicos no solo, o fato de que muitos deles vivem uma vida relativamente sedentária, e a estabilidade da formação da comunidade em um sítio específico providenciam bons pontos de partida para a bioindicação de mudanças nas propriedades do solo e o impacto das atividades humanas. (Tradução da autora).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO:

Etapa realizada durante toda elaboração desse estudo. Envolve a leitura e o estudo de materiais como artigos científicos e livros sobre temas como fauna edáfica, pedologia, contaminação de solos, metais pesados e etc; consultados virtual e presencialmente. Entre as principais obras e artigos utilizados nos estudos acerca das relações entre o solo e os animais, cita-se “*Life in the Soil: A Guide for Naturalists and Gardeners*” (NARDI), “Estudo da pedofauna como bioindicadora da qualidade de solos em fragmentos florestais urbanos” (PATUCCI) e “Manejo Ecológico do Solo: a Agricultura em Regiões Tropicais” (PRIMAVESI), para estudo dos aspectos macromorfológicos do solo, destaca-se “Formação e Conservação dos Solos” (LEPSCH), a respeito da contaminação de solos, destacam-se “*Heavy Metals in Soil*” (ALLOWAY) e “Química do Solo” (TIECHER *et al.*), entre outras.

4.2. COLETA DE AMOSTRAS E ORGANISMOS

Realizada em 22 de Agosto de 2024, das 10h às 15h, na área conhecida como Raia Olímpica, nas dependências do Centro de Práticas Esportivas (CEPE) do campus Butantã da Universidade de São Paulo. Foram escolhidos três pontos de interesse na área da Raia Olímpica: o Ponto 1, um barranco cheio de formigueiros próximos; o Ponto 2, solo sob a sombra de um pinheiro, mais afastado da água; e o Ponto 3, sob a sombra de um bambuzal, a uma distância média entre a área alagada e a grade que separa a Raia do resto do campus. Para cada ponto, foram coletadas quatro amostras de 250g, buscando-se coletar cada amostra a uma profundidade diferente. As doze amostras finais foram devidamente identificadas como 1a, 1b, 1c, 1d, 2a, 2b, 2c, 2d, 3a, 3b, 3c e 3d. Para cada amostra, buscou-se coletar, através do método *TSBF* (*Tropical Soil Biology and Fertility Method*), quaisquer invertebrados macroscópicos que estivessem presentes nas amostras, através do uso de pinças e recipientes com uma mistura de água e álcool 70%.

4.3. ANÁLISE DE PARÂMETROS MACROMORFOLÓGICOS

Realizada ao longo dos meses de Agosto e Setembro, em laboratório, com auxílio de lupas e pinças, nessa etapa buscou-se reconhecer alguns dos principais aspectos

macromorfológicos do solo da região de interesse e dos três pontos de coleta. Os resultados serão apresentados na seção 6. Entre os parâmetros analisados, cita-se:

- Textura e estrutura, analisadas a olho nu com auxílio de lupas e fitas métricas, na intenção de identificar a presença de grumos causados pela fauna, e em laboratório, com auxílio de peneiras que separam a fração grossa ($> 63 \mu\text{m}$) da fina.
- Cor, analisada com auxílio da Tabela Munsell (*Munsell Soil Color Chart*), na intenção de obter uma compreensão inicial do teor de matéria orgânica, composição química e condições hidromórficas.
- Porosidade, analisada com auxílio de lupas, pinças e fitas métricas. Focou-se na bioporosidade das amostras, isto é, nos poros criados por organismos locomovendo-se pelo solo, criando galerias para transporte de recursos, formando ninhos e, também, por raízes vegetais.

4.4. ANÁLISE DA PEDOFAUNA MACROSCÓPICA ENCONTRADA

Realizada através do uso de lupas, fitas métricas, pinças e consulta bibliográfica. Nessa etapa, após a morte dos organismos na mistura de água e álcool 70%, um a um, os mesmos foram limpos dos restos de solo presentes e secos sobre papel toalha. Em seguida, foram medidos utilizando duas fitas métricas posicionadas perpendicularmente uma à outra. Adiante, com auxílio de diversas bibliografias, incluindo obras como trabalhos de graduação, mestrado e doutorado sobre fauna de solo e, especificamente, sobre a pedofauna encontrada em análises prévias no campus em questão, na intenção de identificar as espécies de invertebrados macroscópicos encontrados em cada amostra.

Uma vez identificadas as espécies e contabilizados os organismos encontrados em cada amostra, buscou-se consultar bibliografias variadas sobre invertebrados como bioindicadores de contaminação por metais pesados, na intenção de reconhecer se a fauna do solo da Raia Olímpica da Universidade de São Paulo indicam alguma forma de contaminação por tais elementos, provenientes da época da construção do campus, que incluiu atividades de mineração e construção civil na área de coleta. Os resultados dessa etapa serão apresentados na seção 6.

4.5. ANÁLISE DE MATÉRIA ORGÂNICA E GRANULOMETRIA

Essa análise foi realizada em duas etapas. Primeiramente, separou-se 10g de cada uma das doze amostras em doze bêqueres devidamente identificados. Os bêqueres foram pesados em balança de precisão. A análise em si consistiu na adição semanal de Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) nos bêqueres, pois tal composto reage com a matéria orgânica, transformando-a em Gás Carbônico (CO_2) e liberando-o dentro da capela de exaustão onde as amostras foram deixadas para reagir. Diante da presença abundante de matéria orgânica nas amostras, percebeu-se que o processo estava demorando muito e, dessa forma, buscou-se realizá-lo novamente, porém com menores quantidades de amostra (2g). Assim, seguiu-se a adição de 50 - 150 mL de H_2O_2 semanalmente até verificar a coloração clara da amostra, sinal da perda da matéria orgânica que escurece o solo. Em seguida, uma vez finalizada a queima da matéria orgânica, as amostras foram passadas em filtros, que foram secos em estufa a 40°C e pesados. Em seguida, removeu-se os sedimentos do filtro com auxílio de um pincel e os mesmos foram passados na peneira de 63 µm, na qual restou apenas a fração grossa, que foi filtrada no mesmo filtro para retirar a água usada na análise granulométrica e evitar perda da massa que gruda no filtro, por fim, tais filtros são secos e pesados uma última vez e preenche-se a planilha com os dados e cálculos necessários.

4.6. ANÁLISE DE METAIS PESADOS POR XRF

Realizada em Setembro de 2024 através do uso do equipamento portátil de XRF. Anteriormente à análise, montou-se as cápsulas nas quais cada amostra seria exposta ao Raio-X. Para tal montagem, utilizou-se equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Química Inorgânica Marinha do Instituto Oceanográfico da USP, incluindo os recipientes da cápsula, tampa, filme plástico, filtro e algodão. Em seguida, utilizando o equipamento portátil de XRF localizado no Instituto de Energia e Ambiente (IEE-USP), realizou-se a análise dos componentes químicos de cada uma das doze amostras. Essa etapa durou, inicialmente, 30min (preparação das cápsulas), seguidos de 15min (passagem pelo equipamento).

5. RESULTADOS

5.1. ANÁLISE MACROMORFOLÓGICA E BIOLÓGICA

5.1.1. Ponto 1 - Amostras 1a, 1b, 1c e 1d

O primeiro ponto de coleta escolhido na Raia Olímpica foi um barranco de quase 4 m de altura à margem da área alagada (Figura 2), localizado-se nas coordenadas S 23°33'16.1568 W 46°43'4.978. Essa localidade foi escolhida devido às características macromorfológicas identificáveis a olho, como a coloração marrom-clara, significativamente pálida, caracterizada como 10 YR 7/1 e a aparência muito arenosa desse solo.

Ao primeiro toque foi possível reconhecer encrostamento superficial, possivelmente devido à ausência de chuvas no período e calor extremo que fazia no dia da coleta. A falta de espécies vegetais de dossel alto na área possivelmente é um contribuinte para a superfície ficar exposta ao sol e, assim, secar, possibilitando a formação de crostas difíceis de serem quebradas mesmo com auxílio de facas. Tais crostas também dificultam a penetração das raízes vegetais, tanto que nessa área havia apenas rasas gramíneas.

Em análise laboratorial, confirmou-se a textura extremamente arenosa desse solo em todas as amostras coletadas, assim como um baixo teor de grãos finos (argila e silte) e, consequentemente, baixo teor de matéria orgânica. Tais aspectos são típicos de solos arenosos, que também são suscetíveis a rápido aquecimento, o que explica o encrostamento superficial, provavelmente causado pelo clima seco e quente do período de coleta e não pela presença de metais contaminantes.

Tabela 2 - Teores de MO e frações grossa (>63 µm) e fina (<63 µm) no Ponto 1.

Amostra	Matéria orgânica (%)	Grossos (areia e cascalho) (%)	Finos (silte e argila) (%)
1a	2%	55%	45%
1b	2%	93%	7%
1c	4%	63%	37%
1d	3%	96%	4%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Quanto à porosidade, foi analisada para este trabalho apenas a macroporosidade de responsabilidade biológica, isto é, aquela causada pela passagem de animais e raízes vegetais pelo subsolo. Na amostra 1a, por exemplo, foram identificados pequenos (<2 cm) torrões

contendo finíssimas raízes vegetais (<1 mm), associadas às gramíneas presentes. Nas demais amostras, foram vistas algumas galerias e caminhos com formas mais irregulares, típicos da passagem de formigas pelo solo.

Dessa forma, em análise macromorfológica inicial, não notou-se aspectos que denotem contaminação, apenas aspectos facilmente explicados pela granulometria natural do solo (muito arenoso), e o clima seco e quente da época, que dificulta a presença de plantas de médio a grande porte e animais maiores e de corpo mole, que produzem poros bem delimitados (como minhocas).

Figura 2 - Barranco no qual as amostras do Ponto 1 foram coletadas.



Fonte: elaborada pela autora (2024).

Como esperado, levando em consideração a proximidade do local de coleta de um formigueiro, foram encontradas, na amostra 1a, quatro formigas da espécie *Camponotus mus* (família *Formicidae*), conhecida como Formiga-Doceira. Duas das formigas encontradas são classificadas como “soldados”, (identificadas pela cabeça grande e pelas enormes presas) e duas como “operárias menores” (responsáveis pelo transporte de recursos para o formigueiro). (Figuras 3 a 8).

Ainda, todos os espécimes encontrados estavam em ótimo estado, apresentando todas as seis patas, duas antenas e corpo dividido em três partes (cabeça, tronco e abdômen). Segundo GRZÉS (2010), formigas, no geral, são consideradas seres resistentes, entretanto, quantidades elevadas de contaminantes no solo podem levar a uma redução da população, devido à morte das larvas e membros menos resistentes do grupo, o que resultaria, também, num menor tamanho do formigueiro. Além disso, diante de um solo contaminado, é comum ocorrer diminuição da quantidade de formigueiros em proximidade, já que o solo torna-se impróprio para a competição por recursos. Segundo RANGEL (2023):

A presença e diversidade de formigas apontam para ambientes conservados, como os de mata nativa e áreas de regeneração, por apresentarem uma maior variação de recursos vegetais e materiais orgânicos essenciais para o estabelecimento desse grupo. (RANGEL, 2023, p. 28).

Dessa forma, fatores como o extenso tamanho dos formigueiros encontrados e o fato de haver muitos formigueiros em proximidade (menos de 3 m) um do outro indicam que aquela região possui algum atrativo para a instalação, permanência e crescimento de colônias. Ou seja, é improvável que haja níveis significativos de contaminação nesse ponto de coleta. Além disso, a presença de espécimes saudáveis também é um indicador positivo para a saúde desse solo, pois diante de contaminação, ocorre não só a morte dos organismos, mas também, possíveis alterações morfológicas no corpo do animal, como a formação de corcundas em formigas *Formicidae* encontradas em solo contaminado por metais pesados, segundo estudo de BELSKAYA *et al.* (2019).

Figuras 3 e 4 - Espécime I da amostra 1a: soldado de *Camponotus mus*.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figuras 5 e 6 - Espécime II da amostra 1a: outro soldado de *Camponotus mus*.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 7 - Espécime III da amostra 1a: operária menor de *Camponotus mus*.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 8 - Espécime IV da amostra 1a: outra operária menor de *Camponotus mus*.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Em seguida, a amostra 1b foi coletada a menos de 1 m do formigueiro onde foi coletada a amostra 1a, na intenção de observar se as características morfológicas encontradas na superfície desse solo continuavam no subsolo e, principalmente, se essa população de formigas da espécie *Camponotus mus*, responsáveis pelo formigueiro onde coletou-se a amostra anterior, ainda encontrava-se nessa região, formando bioturbações e coletando recursos.

A amostra 1b apresentou, de fato, características macromorfológicas muito parecidas com aquelas encontradas na amostra 1a, como aparência arenosa, porém sem formação de crostas. A coloração ficou levemente menos pálida, classificada como 10 YR 4/2. A análise laboratorial (Tabela 2) confirmou que o caráter arenoso do solo permanece nessa amostra, apresentando, assim, um baixo teor de matéria orgânica e dominância da fração grossa na análise granulométrica.

Ainda, foram encontradas galerias (Figuras 9 e 10) que apresentam diâmetro e formato condizente com a passagem de minhocas, cujo corpo cilíndrico forma, justamente, galerias perfeitamente cilíndricas no solo.

Figuras 9 e 10 - Galeria cilíndrica associada à passagem de minhocas na amostra 1b.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Embora tenham sido observados e coletados torrões que apresentavam claras características da passagem de minhocas pelo solo, não foram encontradas minhocas na amostra coletada. Teoriza-se que, diante do clima muito quente e seco, as minhocas que antes transitavam ali, desceram mais fundo para o subsolo a fim de proteger-se do calor. Além disso, o fato do solo do Ponto 1 estar muito seco na época da coleta pode ter feito as minhocas fugirem para o subsolo, pois ao contrário das formigas, não possuem presas capazes de perfurar solos mais duros e, dessa forma, parecem ter abandonado essa região diante da secura que dificulta sua passagem e até seu consumo do solo.

TIECHER & CLASEN (2020), comentam, também, que é comum minhocas “fugirem” para o subsolo diante da presença de contaminantes na superfície do solo. Ainda assim, como mencionado, o mesmo pode ocorrer simplesmente diante de condições climáticas atípicas ou extremas que tornam a superfície inóspita para as minhocas em certas épocas do ano. Dessa forma, a suposta fuga desses animais pode indicar contaminação, mas também, pode indicar processos naturais, sendo necessário consultar a análise feita por XRF na seção 5.2 para descobrir de fato o que pode ter causado a fuga das minhocas.

Embora não tenham sido encontradas as minhocas causadoras das bioturbações observadas na amostra 1b, foram encontradas duas formigas de espécies diferentes, uma operária menor de *Formica moki* e um soldado de *Acromyrmex lundii* (Figuras 11 e 12). Tal fato é um ponto positivo acerca da biodiversidade desse solo, mostrando que populações diferentes de artrópodes estão instalando-se e desenvolvendo-se na região, o que não seria provável diante de grandes teores de um contaminante no solo.

Figuras 11 e 12 - Espécimes de *Formica moki* e *Acromyrmex lundii* da amostra 1c.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

A amostra 1c foi coletada mais abaixo que as primeiras, em um estrato do barranco que, curiosamente, apresentou uma coloração mais amarelada (Figuras 13 e 14), classificada como 10 YR 5/3, geralmente identificada como indicadora da presença de óxidos de manganês no solo. Entretanto, segundo MCBRIDE (1994), a contaminação por metais pesados pode alterar drasticamente a cor do solo, sendo que o amarelo pode indicar a presença de chumbo (Pb) em concentrações elevadas. Tal contaminação pode ser fruto de atividades de construção civil, mineração, descarte de rejeitos, uso de fertilizantes e substâncias químicas variadas e etc.

Figuras 13 e 14 - Torrões amarelados da amostra 1c.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Além disso, nessa amostra, curiosamente, não foram encontrados animais, como minhocas e formigas, e nem sinais de sua presença, como textura grumosa e bioturbações. Tal fato indica que há alguma diferença na composição e estrutura físico-química dessa camada de solo, podendo tal alteração ser fruto de uma contaminação por metais pesados, assim como pode ser fruto de outro tipo de contaminante ou fatores geológicos naturais. Tal questão há de

ser discutida à frente na seção 7, diante dos resultados da análise química realizada nas amostras.

Curiosamente, na amostra 1d, a coloração do solo retorna ao usual tom marrom pálido (10 YR 4/2) das amostras 1a e 1b. Também, vê-se novamente a presença de torrões grumosos com bastante pedotubos. Coletou-se nessa amostra mais três operárias menores e um soldado de *C. mus* (Figuras 15 e 16), como nas amostras superiores. Essa volta à “normalidade” pode dar-se devido ao revolvimento do solo durante a construção da área ou por fenômenos naturais (como chuvas fortes) ao longo dos anos, bagunçando a configuração original dos horizontes.

Figuras 15 e 16 - Três operárias menores e uma operária maior de *C. mus* na amostra 1d.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

5.1.2. Ponto 2 - Amostras 2a, 2b, 2c e 2d

O segundo ponto de coleta escolhido na Raia Olímpica foi à sombra de um pinheiro de 6 m de altura, nas coordenadas S 23°33'16.1568" W 46°43'24.978". Essa localidade foi escolhida devido à vegetação de alto porte e solo mais úmido e escuro no local, contrastando com o Ponto 1. Para a coleta, foi aberto um pequeno buraco (cuja abertura não passou de 20 cm), utilizando ferramentas de jardinagem. As amostras 2a, 2b, 2c e 2d foram coletadas a diferentes profundidades consequentes nesse buraco, que chegou a aproximadamente 40-50 cm de profundidade máxima.

À primeira vista, o solo em questão apresentou uma coloração brunada (7,5 YR 3/1) e aparência úmida e grumosa, não mais tendo a aparência pálida e seca do Ponto 1. A presença de árvores de grande porte cria um dossel que protege o solo do sol, impedindo que fique tão seco. Dessa forma, em análise macromorfológica inicial, esse solo aparenta estar em boas condições, associadas justamente à presença de extensa vegetação que protege-o das intempéries extremas.

Surpreendentemente, em análise laboratorial (Tabela 3), viu-se que esse solo ainda é mais arenoso que argiloso, assim como o solo do Ponto 1, além de não ter teores significativamente altos de matéria orgânica. Essa condição natural do solo da região demonstra o porquê a mesma funcionou como cava de mineração de areia, já que esse recurso parece ser abundante nesse solo.

Tabela 3 - Teores de MO e frações grossa ($>63 \mu\text{m}$) e fina ($<63 \mu\text{m}$) no Ponto 2.

Amostra	Matéria orgânica (%)	Grossos (areia e cascalho) (%)	Finos (silte e argila) (%)
2a	10%	76%	24%
2b	3%	85%	15%
2c	8%	71%	29%
2d	11%	58%	42%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Mesmo com a textura arenosa, ainda observou-se a presença de galerias cilíndricas e uniformes, típicas da passagem de minhocas pelo solo, assim como grumos típicos do processamento do solo pela fauna. Embora minhocas sejam comumente associadas a solos argilosos, as mesmas podem viver em solos arenosos, já que o tamanho da fração areia permite maior permeabilidade das chuvas, permitindo que as minhocas encontrem a umidade de que necessitam para sobreviver. No Ponto 2, foram encontradas 5 minhocas-mansas (*Pontoscolex corethrurus*) nas amostras 2a e 2b (Figuras 17 a 21).

Segundo YADAV *et al.* (2023), minhocas, no geral, são animais sensíveis à contaminação de solo por metais pesados, devido à sua pele permeável e sistema digestivo dependente do consumo de solo. Dessa forma, diante dessa contaminação, esperar-se-á que as minhocas morram e parem de consumir o solo, o que afetaria显著mente sua grumosidade e porosidade. Ainda, sobre a reação delas à contaminação por metais pesados, DE SÁ *et al.* (2024) destacam que:

Duarte *et al.* (2014) investigaram a biomassa e as taxas de sobrevivência da *P. corethrurus* em área contaminada por chumbo (Pb), constatando a redução destes parâmetros apenas em altas concentrações do contaminante (...). [a presença desses contaminantes no solo causa consequências para as minhocas] como enrolamento do corpo, produção intensiva de muco e mudanças comportamentais e morfológicas. (DE SÁ *et al.* 2024).

Os espécimes encontrados nas primeiras duas amostras do Ponto 2 apresentavam estar saudáveis, sem quaisquer anomalias, como enrolamento do corpo ou produção extensiva de muco, além de ser claro o consumo de solo por esses espécimes devido à ausência de pigmentação do corpo, típica da espécie e que permite a visualização do solo no sistema

digestivo. Quanto às amostras 2c e 2d, não foram encontrados animais, porém, notou-se a presença de boa bioporosidade, com bastante galerias cilíndricas e uniformes que evidenciam a passagem de minhocas pelo local. Ou seja, só o fato de não terem sido coletados organismos nessa amostra não caracteriza, necessariamente, contaminação, pois permanecem as mesmas características macromorfológicas das amostras anteriores, demonstrando-se, assim, a importância da união da análise biológica com a análise física e, como será feito na seção seguinte, com a análise química.

Figuras 17 a 21 - *P. corethrurus* encontradas nas amostras 2a e 2b, nota-se a presença clara de solo no sistema digestivo dos animais.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

5.1.3. Ponto 3 - Amostras 3a, 3b, 3c e 3d

O terceiro ponto de coleta escolhido na Raia Olímpica foi à sombra de um grande Bambuzinho-amarelo (*Phyllostachys aurea*), espécie de planta típica da China e amplamente utilizada para paisagismo, nas coordenadas S 23°33'17.388" W 46°43'24.2148". Essa

localidade foi escolhida devido ao contraste com a vegetação do Ponto 2. A coleta realizou-se da mesma forma que no Ponto 2. À primeira vista, o solo no Ponto 3 apresentou coloração brunada-escura, textura grumosa e aparência mais úmida que nos pontos anteriores. Nas amostras 3a e 3b havia galerias cilíndricas e uniformes típicas da passagem de minhocas e, de fato, foram encontrados dois espécimes de *P. corethrurus* nessas amostras (Figuras 24 e 25).

Em análise laboratorial (Tabela 4), observou-se que no Ponto 3, as amostras mais profundas apresentaram teores mais altos de matéria orgânica, além de também mostrarem-se mais argilosas que as amostras dos pontos anteriores.

Tabela 4 - Teores de MO e frações grossa ($>63 \mu\text{m}$) e fina ($<63 \mu\text{m}$) no Ponto 3.

Amostra	Matéria orgânica (%)	Grossos (areia e cascalho) (%)	Finos (silte e argila) (%)
3a	8%	63%	37%
3b	2%	79%	21%
3c	20%	26%	74%
3d	16%	43%	57%

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Entretanto, mesmo diante desses bons índices de MO e argilosidade, é importante notar que, na amostra 3c, notou-se a presença de muitos pedaços de isopor (nome popular para produtos feitos de poliestireno expandido ou EPS). O isopor em si não contém metais pesados em sua composição, porém, sua degradação lenta pode acarretar na liberação de microplásticos no solo. Segundo estudo publicado em 2021 no periódico *Journal of Hazardous Materials Letters*, microplásticos são capazes de absorver e liberar metais e íons metálicos, similarmente à ação da argila e demais frações finas do solo. Dessa forma, caso haja contaminação por metais pesados na região, a possível presença de microplásticos, associada à maior argilosidade a essa profundidade, poderia potencializar a liberação de íons metálicos no solo.

Na amostra 3d, não mais encontrou-se pedaços de isopor, mostrando que tal ocorrência aparenta ser apenas fruto do descarte incorreto de lixo por algum usuário do local há bastante tempo (já que o material encontrava-se enterrado) e não representa, necessariamente, poluição do solo em questão, visto que não foram realizadas análises de contaminantes orgânicos nessa área. Ainda assim, é sempre interessante reiterar a importância da conscientização da população acerca do descarte correto de resíduos, especialmente os plásticos, assim como é importante que sejam providenciados bastante locais de descarte (lixeiras) devidamente identificadas e sinalizadas.

Figura 22 e 23 - Pedaços de isopor enterrados na amostra 3c.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Além disso, mesmo com a presença desse material na amostra 3c, ainda assim, foram encontrados interessantes membros da pedofauna, como duas larvas do besouro *Diloboderus abderus* conhecidas como “Coró-das-pastagens” (Figuras 26 e 27). Já na amostra 3d, foi encontrado um quilópode da espécie *Geophilus flavus* (Figuras 28 e 29).

A presença dessas larvas de besouro é um bom sinal contra a presença por teores elevados de metais pesados nesse solo, indicando que a presença do isopor parece não ter afetado significativamente a composição química deste solo. Embora besouros como *D. abderus* sejam considerados resistentes à contaminação, suas larvas são seres delicados e muito vulneráveis à predação e mudanças no ambiente, sendo assim, sua presença e aparência saudável (sua cor escurecida nas fotos é fruto da interação com o álcool da coleta) é um bom sinal. Segundo MITIC *et al.* (2023), quilópodes (como *G. flavus*) são animais sensíveis à presença de metais pesados, sendo sua ausência um possível indicativo de contaminação. Reitera-se a presença das minhocas-mansas (*P. corethrurus*) nas amostras superiores, apresentando aparência saudável que inclui o consumo de solo pelo animal (evidenciado pela coloração escura do corpo normalmente apigmentado dessa espécie).

Figura 24 - Espécime de *P. corethrurus* encontrado na amostra 3a.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 25 - Espécime de *P. corethrurus* encontrado na amostra 3b.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figuras 26 e 27 - As duas larvas de *D. abderus*, encontradas na amostra 3c.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figuras 28 e 29 - Espécime de *G. flavus* encontrados na amostra 3d.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

5.2. ANÁLISE DE METAIS PESADOS POR XRF

A análise da composição química de um solo pode ser realizada fácil e rapidamente através da Fluorescência de Raios-X, conhecida como XRF (do inglês, X Ray Fluorescence). O equipamento de XRF em questão possui uma fonte que emite um Raio-X sobre uma amostra e, esse feixe de energia interage com os átomos presentes na amostra, que então emitem um Raio-X próprio, característico e exclusivo a cada elemento químico. Assim, através da medida da energia que os átomos emitem diante da irradiação, o equipamento

identifica quais são os elementos químicos presentes na amostra e sua concentração, pois a mesma é proporcional à intensidade dessa energia emitida pelos átomos irradiados.

Para analisar a composição química dos solos deste trabalho, utilizou uma máquina de XRF portátil para medir não só as doze amostras de interesse, mas também, três materiais de referência (OREAS 70b, BCR 667 e SS-2) cuja composição é certificada por seus fabricantes, na intenção de comparar as medidas obtidas e as certificadas, para compreender a acurácia do equipamento na medição dos elementos de interesse (os metais pesados). Dessa forma, diante dessa comparação, percebeu-se que os metais pesados que apresentaram maior acurácia entre os valores obtidos pelo XRF e os valores certificados pelos fabricantes foram: Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Arsênio (As). Tais elementos apresentaram concentrações medidas pelo XRF muito próximas das concentrações certificadas, especialmente, considerando-se o desvio padrão de ambas medidas.

Tabela 5 - Comparação entre os valores (em mg/kg) obtidos por XRF e os valores certificados para o material de referência OREAS 70b.

Elemento	Valor obtido no XRF	Desvio Padrão obtido no XRF	Valor Certificado	Desvio Padrão certificado
Arsênio (As)	112	8	143	20
Chumbo (Pb)	15	5	13,2	1,8
Cobre (Cu)	54	20	52	6
Níquel (Ni)	2148	69	2200	80
Zinco (Zn)	110	13	107	9,5

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Tabela 6 - Comparação entre os valores (em mg/kg) obtidos por XRF e os valores certificados para o material de referência BCR 667.

Elemento	Valor obtido no XRF	Desvio Padrão obtido no XRF	Valor Certificado	Desvio Padrão Certificado
Arsênio (As)	19	2	entre 14,3 - 19,9	-
Chumbo (Pb)	32	2	31,9	1,1
Cobre (Cu)	75	5	60	9
Níquel (Ni)	134	6	128	9
Zinco (Zn)	187	5	175	13

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Tabela 7 - Comparação entre os valores (em mg/kg) obtidos por XRF e os valores certificados para o material de referência SS-2.

Elemento	Valor obtido no XRF	Desvio Padrão obtido no XRF	Valor Certificado	Limite de Confiança 95% Certificado
Arsênio (As)	83	3	78	62 - 94
Chumbo (Pb)	125	3	148	130-166
Cobre (Cu)	195	6	198	189 - 207
Níquel (Ni)	66	5	59	55 - 63
Zinco (Zn)	554	8	509	479 - 539

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Ademais, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), determina “valores ordenadores” para identificação de contaminação e poluição de solos e águas subterrâneas por uma variedade de substâncias e compostos. A tabela atualizada em 2021 foi utilizada para analisar se as concentrações obtidas pelo XRF em cada amostra estão acima dos valores permitidos.

Os Valores Orientadores para solo e água subterrânea são concentrações de substâncias químicas derivadas por meio de critérios numéricos e dados existentes na literatura científica internacional, para subsidiar ações de prevenção e controle da poluição, visando à proteção da qualidade dos solos e das águas subterrâneas e o gerenciamento de áreas contaminadas. (CETESB, 2021).

Antes de partir para os resultados propriamente ditos, é importante contextualizar que a CETESB determina “Valor de Prevenção” (VP) e “Valor de Interferência” (VI). Entre os valores de Interferência, a CETESB determina valores diferentes para áreas agrícolas, residenciais e industriais. A Raia Olímpica, neste trabalho, foi considerada uma área residencial, já que está localizada em um bairro residencial e não se encaixa como área agrícola e nem como industrial.

Valor de Intervenção – VI é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerado um cenário de exposição genérico (...). (CETESB, 2021).

Ou seja, quando a concentração de um elemento em uma amostra de solo está acima do Valor de Intervenção (VI) significa que haverá, de fato, efeitos negativos e deletérios para o solo em questão e, consequentemente, para sua biota e todos os seres que dele dependem. Um solo cujo teor de algum metal pesado está acima do VI, encontrará-se não só contaminado por esse elemento, mas sim, poluído. Reitera-se que a intervenção em solos que apresentarem

teores de metais pesados acima do VI é essencial, pois estes são mais suscetíveis a alterações texturais e estruturais que podem resultar em fenômenos como a subsidência do solo, a erosão, o ravinamento e o voçorocamento, a morte da biodiversidade e a infertilidade diante de desertificação e acidificação.

Tabela 8 - Valores de Intervenção (VI) Residencial (em mg/kg) para os cinco metais pesados escolhidos para análise, vide atualização mais recente pela CETESB em 2021.

Elemento	Valor de Intervenção (VI) Residencial
Arsênio (As)	55
Chumbo (Pb)	240
Cobre (Cu)	480
Níquel (Ni)	4100
Zinco (Zn)	7000

Fonte: elaborado pela autora (2024), vide CETESB (2021).

5.2.1. Ponto 1 - amostras 1a, 1b, 1c e 1d

Em relação ao Ponto 1, a única amostra na qual houve bioindicação de alguma alteração químico-física no solo em questão foi a amostra 1c. As amostras 1a, 1b e 1d apresentaram bons resultados na análise biológica, sendo que a fauna encontrada nessas três amostras apresentou-se saudável, sem quaisquer mutações fisiológicas ou alterações comportamentais citadas pelas literaturas referenciadas como GRZÉS (2010), BELSKAYA *et al.* (2019), MITIC *et al.* (2023) e DE SÁ *et al.* (2024), acerca de solos contaminados por metais pesados. Além disso, em análise física, todas essas três amostras apresentaram textura grumosa e presença de galerias cilíndricas e uniformes, típicas da presença de minhocas (animais sensíveis à contaminação e facilmente afetados negativamente por ela), além da presença de galerias menores e menos uniformes onde notou-se a passagem e presença de populações de diferentes espécies de formigas, o que é um bom indicador de que a área é boa para a instalação e desenvolvimento de colônias.

Já a amostra 1c apresentou características morfológicas distintas às amostras anteriores durante análise física, como cor, textura e porosidade. A cor amarelada pode indicar contaminação por Chumbo segundo MCBRIDE (1999), mas também pode ser indicativo da mineralogia natural da região, sendo característica a óxidos de manganês. A falta de grumosidades e bioturbações, além do fato de não terem sido coletados organismos nessa amostra, indica que sua composição química é, provavelmente, distinta das demais.

Entretanto, conclui-se que a análise biológica por si não pode confirmar se essas alterações são naturais e geológicas ou antrópicas e frutos de um tipo específico de contaminação.

A Tabela 9 mostra as concentrações de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas para cada uma das quatro amostras do Ponto 1.

Tabela 9 - Concentrações (em mg/kg) de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas por XRF para o Ponto 1.

Elemento	1a	1b	1c	1d
Arsênio (As)	5	7	5	6
Chumbo (Pb)	33	26	22	28
Cobre (Cu)	20	24	30	21
Níquel (Ni)	45	18	27	26
Zinco (Zn)	88	86	61	97

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Comparando os valores obtidos para cada um desses elementos e os valores ordenadores apresentados na Tabela 5, percebe-se que nenhum dos elementos apresentou níveis acima do Valor de Intervenção (VI) Residencial determinado pela CETESB na Tabela 4. Embora tal resultado seja esperado e previsto pela análise biológica e macromorfológica nas amostras 1a, 1b e 1d, o resultado da amostra 1c surpreende.

Esperava-se que a amostra 1c apresentasse níveis altos de Chumbo, já que a contaminação por esse metal pode tornar o solo amarelado (MCBRIDE, 1999). Entretanto, os níveis de CHumbo nessa amostra estão não só abaixo do Valor de Intervenção (VI) Residencial, mas também abaixo dos valores desse elemento medidos nas outras amostras, que não apresentarem alterações na cor.

Dessa forma, conclui-se que, no Ponto 1, não há contaminação por nenhum dos cinco metais pesados escolhidos para análise. A análise da pedofauna indicou um solo saudável nas amostras 1a, 1b e 1d, e embora tenha indicado alterações na química da amostra 1c, a análise química veio para confirmar que tais alterações não são fruto de contaminação pelos elementos de interesse. Sendo assim, essa alteração na cor, textura, porosidade e biota nessa amostra pode ser fruto de fatores geológicos naturais da região (como um alto teor de óxidos de manganês na rocha-mãe) ou contaminação por outros compostos não estudados nessa pesquisa (como os compostos orgânicos, como os combustíveis fósseis e os plásticos).

5.2.2. Ponto 2 - amostras 2a, 2b, 2c e 2d

Em relação ao ponto 2, a análise biológica mostrou bons resultados. Foram encontrados exemplares de minhocas-mansas (*Pontoscolex corethrurus*), úteis na bioindicação pois seu corpo pigmentado permite visualizar se as minhocas estão consumindo e processando o solo o que não fazem diante de contaminação devido à sua sensibilidade. Em todos os espécimes coletados, ficou clara a presença de solo no sistema digestivo dos animais. Além disso, mesmo nas amostras onde não foram coletadas minhocas, sua presença no solo foi confirmada devido à presença das típicas galerias cilíndricas e uniformes no solo, assim como a textura grumosa associada à digestão do solo pelas minhocas. Não havendo indicação pela fauna de contaminação por metais pesados nesse solo, esperou-se que a análise química confirmasse essa ausência.

A Tabela 10 mostra as concentrações de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas para cada uma das quatro amostras do Ponto 2.

Tabela 10 - Concentrações (em mg/kg) de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas por XRF para o Ponto 2.

Elemento	2a	2b	2c	2d
Arsênio (As)	6	7	6	6
Chumbo (Pb)	31	35	34	43
Cobre (Cu)	38	28	35	32
Níquel (Ni)	20	28	16	25
Zinco (Zn)	96	102	84	115

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Como esperado, as amostras do Ponto 2 não apresentam níveis dos elementos de interesse acima dos Valores de Intervenção (VI) Residencial da CETESB. Dessa forma, conclui-se que nesse ponto, a análise biológica não indicou contaminação por metais pesados ou quaisquer alterações físico-químicas preocupantes nesse solo, fato que foi confirmado pela análise química apresentada na Tabela 7.

5.2.3. Ponto 3 - amostras 3a, 3b, 3c e 3d

Quando ao Ponto 3, todas as amostras apresentaram bons resultados na análise biológica. Inclusive, o Ponto 3 apresentou maior biodiversidade que os dois pontos anteriores, nos quais haviam sido encontrados exclusivamente formigas e minhocas. O

Ponto 3 apresentou anelídeos (minhocas), insetos (larvas de besouro) e miríapodes (quilópode), o que indica um ecossistema saudável física e químicamente. A análise física desse ponto também demonstrou um solo estável em sua textura, estrutura e porosidade.

A única questão que chama a atenção nesse ponto são os pedaços de isopor encontrados na amostra 3c. Como explicado na seção anterior, o isopor pode ser uma fonte de microplásticos que, por sua vez, podem ser vetores de absorção e liberação de metais pesados no solo. Mesmo assim, a análise biológica não determinou bioindicação de contaminação por metais pesados nesse solo, e a análise física também não apresentou resultados estranhos. Dessa forma, resta a análise química confirmar se, de fato, a presença do isopor nesse solo ainda não causou grandes problemas (por ser uma pequena quantidade, praticamente removida durante a coleta da amostra), no que diz respeito aos metais pesados.

A Tabela 11 mostra as concentrações de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas para cada uma das quatro amostras do Ponto 3.

Tabela 11 - Concentrações (em mg/kg) de As, Pb, Cu, Ni e Zn obtidas por XRF para o Ponto 3.

Elemento	3a	3b	3c	3d
Arsênio (As)	5	8	4	6
Chumbo (Pb)	31	37	29	34
Cobre (Cu)	33	32	21	39
Níquel (Ni)	21	30	20	13
Zinco (Zn)	99	113	74	178

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Como mostra a Tabela 11, não houve valores dos elementos de interesse acima dos Valores de Intervenção (VI) Residencial da CETESB. Mesmo a amostra 3c tendo o problema da presença do isopor, a mesma apresenta os teores mais baixos de Arsênio, Chumbo, Cobre e Zinco entre todas as amostras desse ponto, mostrando que a presença dessa pequena quantidade de isopor não causou grandes problemas na biota e morfologia desse solo. Entretanto, reitera-se a importância de se educar e informar os usuários da Raia Olímpica sobre o descarte correto de tais materiais, comumente utilizados para o transporte de alimentos.

6. CONCLUSÕES

A utilização da fauna do solo como bioindicadora de alterações na composição química do solo é uma maneira rápida e eficaz de identificar tais mudanças em relação à biodiversidade, textura, estrutura e porosidade de um solo. Como mostraram os resultados desta pesquisa, a análise da taxonomia, fisionomia, e comportamento dos animais encontrados em uma amostra de solo são úteis para identificar alterações químico-físicas nas características morfológicas do solo. Mesmo diante da ausência dos animais, as bioturbações e grumosidades pelas quais eles são responsáveis permanecem no solo analisado, comprovando a presença desses animais nele.

Entretanto, a pesquisa em questão mostrou que a análise biológica do solo, por si só, pode não ser certeira na indicação de fenômenos específicos, como a contaminação de solos por metais pesados. Segundo as literaturas consultadas, os mais certeiros índices de bioindicação de contaminação por metais pesados deram-se através da análise direta dos teores de metais no corpo dos organismos, e não somente pela observação da taxonomia, fisionomia e comportamento dos animais coletados.

Sendo assim, observa-se que a análise biológica deve vir associada à análises físico-químicas na busca por contaminantes como os metais pesados. Apenas a observação dos animais coletados e de seus comportamentos no solo (no que diz respeito à sua textura e porosidade) não indicam, certeiramente, a presença de contaminação no solo, embora indiquem bem a presença de diferenças morfológicas entre uma amostra e outra. Novamente, a análise química -- que pode ser realizada por vários métodos, como o XRF, o ICP-MS, o ICP-OES e a extração de metais diretamente dos tecidos dos organismos. --, é essencial para confirmar o que os animais indicam ou não sobre a saúde e manutenção de um solo.

Por fim, conclui-se, então, que sendo o solo um sistema químico, físico e biológico, no qual essas três esferas constantemente e indubitavelmente influenciam umas às outras, a análise de todos esses três parâmetros é essencial para reconhecer, identificar e diagnosticar diversas condições em um solo. No caso da contaminação por metais pesados, novamente, a união das análises biológica, física e química é essencial para compreender se teores altos de certos elementos podem estar causando alterações morfológicas indicadas pela fauna coletada, observada e analisada. Como destaca a EMBRAPA Solo (2020): a biologia, física e química da terra têm que trabalhar em conjunto a fim de manter o solo saudável.

7. BIBLIOGRAFIA

ALLOWAY, J. B. (Ed.). *Heavy Metals in Soils*. 2a Ed. Glasgow/Londres: Blackie and Son Ltd, 1995. 328p.

BELSKAYA, E. et al. *Diversity of ants (Hymenoptera, Formicidae) along a heavy metal pollution gradient: Evidence of a hump-shaped effect*. Ecological Indicators, vol. 106, 2019. p. 105-447

BROTTO, D. de F; FIRMINO, E. L. B. **INSETOS COMO BIOINDICADORES E ACUMULADORES DE POLUIÇÃO POR METAIS PESADOS**. Anais do 8º ENEPE UFGD/ 5º EPEX UEMS, n. 6, 2015.

BURAK, D.L; et al. Metais pesados em solos: Aspectos gerais. In: Polanczyk, R.A; et al. (Org.). **Estudos Avançados em Produção Vegetal**. 1 ed. Vitória - ES: 2008, v. 32, p. 571-592.

CORREIA, Maria Elizabeth Fernandes. **Potencial de Utilização dos Atributos das Comunidades de Fauna de Solo e de Grupos Chave de Invertebrados como Bioindicadores do Manejo de Ecossistemas**. Seropédica: EMBRAPA Agrobiologia, dez. 2002, 23 p.

COUSSEAU, Laura. **FAUNA EPIEDÁFICA EM AMBIENTE CONTAMINADO POR CHUMBO NO SUDOESTE DO PARANÁ**. Trabalho de Conclusão do Curso Superior em Ciências Biológicas – Licenciatura, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dois vizinhos - PR - UFPR, 2017. 57 p.

DE SÁ, A. C. N. et al. *Eisenia fetida e Pontoscolex corethrurus como bioindicadoras de ambientes contaminados por metais pesados*. Revista Contribuciones a las ciencias sociales, vol. 17, n. 3, 2024.

DIONÍSIO, J. A. et al. **Guia prático de biologia do solo**. Curitiba - PR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Núcleo Estadual Paraná (SBCS/NEPAR), 2012. 152 p.

FADIGAS, F. de S; et al. **Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros**. Solos e Irrigação, vol. 61, n. 2, 2002.

FERREIRA, Ivanir. **Poluição do ar afeta sedimento da Raia Olímpica da USP, mas qualidade da água é boa**. Jornal da USP, 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/poluicao-do-ar-afeta-sedimento-da-raia-olimpica-da-usp-mas-qualidade-da-agua-e-boa/>. Acesso em: 23 Out. 2023.

GRZÉS, Irena M. *Ants and heavy metal pollution -- A review*. European Journal of Soil Biology, vol. 46, p. 350 - 355, 2010.

GUEDES, Italo M. R. **Metais pesados em solos: Metais como poluentes ambientais**. Geófagos, 2008. Disponível em: <https://www.blogs.unicamp.br/geofagos/2008/08/20/metais-pesados-em-solos-metais-como-poluentes-ambientais/>. Acesso em: 14 Out. 2024.

GUERRA, A. J. T; JORGE, M. C. O. (Org.). **Degradação de Solos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014. 317p.

HILDEBRANDT, L. et al. *Microplastics as a Trojan horse for trace metals. Journal of Hazardous Materials Letters*, vol. 2, 2021.

HOPWOOD, J; MAY, E; FRISCHIE, S. *Pocket Guide to Soil Invertebrates as Bioindicators. Xerces Society for Invertebrate Conservation*, 2022. 16 p.

LEPSCH, Igo F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2^a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216p.

MCBRIDE, Murray B. *Environmental chemistry of soils*. Nova York: Oxford University Press, 1992. 406 p.

MIGLIORINI, M. et al. *The effects of heavy metal contamination on the soil arthropod community of a shooting range. Environmental Pollution*, vol. 129, n. 2, 2004, p. 331-340.

MITIC, B. M; VASILJEVIC, L. C; BORKOVIC, S. S. *Centipedes (Chilopoda) as bioindicators of soil pollution. VIII International Congress “Engineering, Environment and Materials in Process Industry”*, 2023. p. 317-324.

NARDI, James B. *Life in the Soil: A Guide for Naturalists and Gardeners*. Chicago: University of Chicago, 2007. 336p.

PATUCCI, Natália Nunes, et al. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLOS URBANOS EM REMANESCENTES FLORESTAIS DA CIDADE DE SÃO PAULO ATRAVÉS DE BIOINDICADORES**. In: Anais da IV Reunião Nordestina de Ciência do Solo: Uso sustentável do solo e segurança alimentar no nordeste brasileiro. Teresina (PI) - SBCS/NRNE, Embrapa Meio-Norte, UFPI, UESPI, IFPI, 2019. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/ivrnccs/130733-AVALIACAO-DA-QUALIDADE-DE-SOLO-S-URBANOS-EM-REMANESCENTES-FLORESTAIS-DA-CIDADE-DE-SAO-PAULO-ATRAVES-DE-BIOINDICADO>. Acesso em: 01/11/2024

PATUCCI, Natália Nunes, et al. **Bioindicadores Edáficos de Fragmentos Florestais Urbanos da Cidade de São Paulo (SP)**. Revista do Departamento de Geografia, vol. 26, 2018. São Paulo - SP: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/149144/149521>. Acesso em: 29 Out. 2024.

PATUCCI, Natália Nunes. **Estudo da pedofauna como bioindicadora da qualidade de solos em fragmentos florestais urbanos**. 2015. 135 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo - SP.

PRIMAVESI, Ana. **Manejo Ecológico do Solo: a Agricultura em Regiões Tropicais**. 2^a ed. São Paulo: Nobel, 2021. 549p.

RANGEL, Danillo Sartório. **FORMIGAS DO SOLO E SEU PAPEL COMO BIOINDICADORAS DE RESTAURAÇÃO DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS.** Dissertação (mestrado em Agroecologia), Instituto Federal do Espírito Santo. Alegre - ES: IFES, 2023.

RIBEIRO, Márcia Marzagão. **Fauna Edáfica.** Slides apresentados para a disciplina AL 057 - Fauna Edáfica, do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 2020. 21 slides. Disponível em: <https://agrarias.ufpr.br/marzagao/wp-content/uploads/sites/25/2020/07/aula01intro2020.pdf>. Acesso em: 07 out. 2024.

SHEPHERD, A; JOHNSON, C. *Using color as a proxy to identify heavy metals in mine dumps; Heavy Metals on Trails and Mine Dumps in Jacob City, Tooele Co, Utah.* Salt Lake Community College. s/d.

SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. Capítulo 7: Degradação dos solos no estado do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T; JORGE, M. do C. O. (Org.). **Degradação dos solos no Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand, 2014. p. 261-292.

SOUSA, Guilherme Castro. **Contaminação por metais pesados: a ameaça dos poluentes ao oceano e à saúde humana.** Jornal da USP no Ar, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=648910>. Acesso em: 14 Out. 2024.

STATE of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities - 2020 Report. FAO - UN (Food and Agriculture Organization - United Nations). Roma: FAO - UN, 2020. 618 p.

TIECHER, T. L; CLASEN, B. Capítulo 9: A contaminação e a poluição do solo. In: TIECHER, T. et al. (Org.). **Química do Solo.** 1^a ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2023. p. 291 - 320.

USP e Energia e Mineração promovem concurso para universitários. SP Notícias - Governo do Estado de São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/ultimas-noticias/usp-e-secretaria-de-energia-e-mineracao-promovem-concurso-para-universitarios/>. Acesso em: 23 Out. 2024.

WINK, C. et al. **INSETOS EDÁFICOS COMO INDICADORES DA QUALIDADE AMBIENTAL.** Revista de Ciências Agropecuárias, v. 4, n. 1, p. 60 - 71, 2005.

YADAV, R. et al. *Heavy metal toxicity in earthworms and its environmental implications: A review.* Environmental Advances, vol. 12, 2023.