

Ocorrência e distribuição de bisfenol a e microplásticos em solos de área urbana e periurbana de Francisco Beltrão (Paraná)

Claudia Adriana Becker Dalla Pria¹, Elisete Guimarães^{2*}, Julio Caetano Tomazon³,

¹Aluna de mestrado em Engenharia Ambiental-PPGEA UTFPR-Campus Francisco Beltrão-PR. Brasil

²Doutora em Química UTFPR-Campus Francisco Beltrão-PR. Brasil. (*Autor correspondente: guimaraes@utfpr.edu.br).

³Doutor em Geologia Ambiental - UTFPR-Campus Francisco Beltrão-PR. Brasil

Histórico do Artigo: Submetido em: 28/03/2026 – Revisado em: 02/04/2026 – Aceito em: 02/06/2026

RESUMO

A contaminação por bisfenol A (BPA) e microplásticos em matrizes aquáticas e terrestres têm se intensificado nas últimas décadas, configurando-se como uma questão emergente de relevância ambiental e de saúde pública. Neste estudo, foram investigados cinco pontos de amostragem de solo, coletados entre 10–20 cm, no município de Francisco Beltrão, Paraná, selecionados com base no grau de influência antrópica. A granulometria indicou textura arenosa (P1: 22,5% de areia) e predominantemente argilosa (P3: 81% de argila; P5: 79%). O teor de matéria orgânica variou de 0,402% (P4) a 3,753% (P2), enquanto o pH de ácido a levemente ácido (4,8–5,8) e a capacidade de troca catiônica (CTC) variou entre 8,72 e 67,69 cmolc kg⁻¹. A espectroscopia FTIR identificou bandas associadas a minerais de argila, matéria orgânica e silicatos, com destaque para uma banda em 1100 cm⁻¹ (P3), indicativa de compostos orgânicos sintéticos. A análise por LC-MS/MS, apresentou LOD de 3,39 µg kg⁻¹, LOQ de 10,27 µg kg⁻¹, coeficiente de variação inferior a 7% e precisão entre 83% e 101%. O BPA foi detectado em todas as amostras, com valor máximo em P5, 60 vezes superior ao P3 e até 8.000 vezes acima das médias agrícolas globais. A distribuição do contaminante foi influenciada pela textura do solo, teor de matéria orgânica, pH e intensidade antrópica. Esses resultados inéditos para o sudoeste do Paraná reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas ao controle de resíduos e estratégias de remediação para preservar a saúde do solo e dos ecossistemas locais.

Palavras-Chaves: Contaminação do solo; desreguladores endócrinos, monitoramento ambiental; poluentes emergentes

Occurrence and Distribution of Bisphenol A and Microplastics in Soils of Urban and Peri-urban Areas of Francisco Beltrão (Paraná – Brazil)

ABSTRACT

Contamination by bisphenol A (BPA) and microplastics in aquatic and terrestrial environments has intensified in recent decades, emerging as a significant environmental and public health issue. In this study, five soil sampling sites were investigated, with samples collected from a depth of 10–20 cm in the municipality of Francisco Beltrão, Paraná, selected based on the degree of anthropogenic influence. The particle size distribution indicated a sandy texture (P1: 22.5% sand) and predominantly clayey texture (P3: 81% clay; P5: 79%). The organic matter content ranged from 0.402% (P4) to 3.753% (P2), while the pH ranged from acidic to slightly acidic (4.8–5.8) and the cation exchange capacity (CEC) varied between 8.72 and 67.69 cmol·kg⁻¹. FTIR spectroscopy identified bands associated with clay minerals, organic matter, and silicates, notably a band at 1100 cm⁻¹ (P3), indicative of synthetic organic compounds. LC-MS/MS analysis showed a LOD of 3.39 µg kg⁻¹, a LOQ of 10.27 µg kg⁻¹, a coefficient of variation below 7%, and precision between 83% and 101%. BPA was detected in all samples, with a maximum value in P5, 60 times higher than in P3 and up to 8,000 times above global agricultural averages. The distribution of the contaminant was influenced by soil texture, organic matter content, pH, and anthropogenic intensity. These unprecedented results for the southwest of Paraná reinforce the need for public policies aimed at waste control and remediation strategies to preserve soil health and local ecosystems.

Keywords: Soil contamination; endocrine disruptors, environmental monitoring; emerging pollutants

Dalla Pria, C. A., Guimarães, E., Tomazoni, J. C., (2026). Caracterização da Contaminação por Bisfenol A e Microplásticos em Solos de Área Urbana e seu entorno. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.14, n.3, p.xx-xx.



Presencia y distribución de bisfenol A y microplásticos en suelos de zonas urbanas y periurbanas de Francisco Beltrão (Paraná – Brasil)

RESUMEN

La contaminación por bisfenol A (BPA) y microplásticos en matrices acuáticas y terrestres se ha intensificado en las últimas décadas, convirtiéndose en un problema emergente de relevancia ambiental y para la salud pública. En este estudio, se investigaron cinco puntos de muestreo de suelo, recolectados entre 10 y 20 cm, en el municipio de Francisco Beltrão, Paraná, seleccionados en función del grado de influencia antropogénica. La granulometría indicó textura arenosa (P1: 22,5 % de arena) y textura predominantemente arcillosa (P3: 81 % de arcilla; P5: 79 %). El contenido de materia orgánica varió de 0,402 % (P4) a 3,753 % (P2), mientras que el pH varió de ácido a ligeramente ácido (4,8–5,8) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) varió de 8,72 a 67,69 cmole kg⁻¹. La espectroscopia FTIR identificó bandas asociadas con minerales arcillosos, materia orgánica y silicatos, con especial énfasis en una banda a 1100 cm⁻¹ (P3), indicativa de compuestos orgánicos sintéticos. El análisis LC-MS/MS mostró un LOD de 3,39 µg kg⁻¹, un LOQ de 10,27 µg kg⁻¹, un coeficiente de variación inferior al 7 % y una precisión entre el 83 % y el 101 %. Se detectó BPA en todas las muestras, con un valor máximo en P5, 60 veces superior a P3 y hasta 8000 veces por encima de los promedios agrícolas mundiales. La distribución del contaminante estuvo influenciada por la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, el pH y la intensidad antropogénica. Estos resultados sin precedentes para el suroeste de Paraná refuerzan la necesidad de políticas públicas centradas en el control de residuos y estrategias de remediación para preservar la salud del suelo y los ecosistemas locales.

Palabras clave: Contaminación del suelo; disruptores endocrinos, monitoreo ambiental; contaminantes emergentes

1. Introdução

A intensificação das atividades antrópicas nas últimas décadas tem promovido a introdução contínua de contaminantes classificados como poluentes emergentes nos diferentes compartimentos ambientais. Esse cenário tem despertado crescente atenção da comunidade científica, em razão da elevada persistência química dessas substâncias e de seu potencial de bioacumulação, configurando um problema ambiental de escala global (Puri, et al., 2023).

Os contaminantes emergentes compreendem um amplo grupo de substâncias químicas presentes no meio ambiente em decorrência de atividades antrópicas, como práticas domésticas, agrícolas e industriais. Embora muitos desses compostos já estivessem disseminados nos ecossistemas, seu monitoramento tornou-se mais expressivo com o avanço de técnicas analíticas capazes de detectá-los em concentrações extremamente baixas, inclusive na faixa de partes por trilhão.

Entre os principais contaminantes emergentes, destacam-se pesticidas, fertilizantes, metais pesados, microplásticos, compostos farmacêuticos ativos, produtos de higiene pessoal e hormônios naturais e sintéticos, cuja ocorrência tem despertado preocupação ambiental crescente (Wang, et al., 2024).

Nos últimos anos, os poluentes emergentes passaram a receber atenção crescente da comunidade científica, especialmente substâncias como o bisfenol A (BPA) e os microplásticos. Em um primeiro momento, os estudos buscaram compreender sua presença e distribuição no ambiente. No entanto, o aprofundamento das pesquisas revelou que esses contaminantes vão além de uma simples ocorrência ambiental, uma vez que podem comprometer o equilíbrio dos ecossistemas e representar riscos à saúde humana (Montagner, et al., 2021; Dayal, et al, 2024).

O intemperismo dos materiais plásticos promove sua fragmentação em partículas menores, como os nanoplásticos, e favorece a lixiviação de substâncias químicas associadas. Os microplásticos e nanoplásticos têm emergido como contaminantes físicos relevantes do solo, devido à sua capacidade de alterar atributos estruturais e físicos, como a agregação, a densidade aparente, a aeração, o fluxo de água e a evaporação, além de influenciar a penetração radicular (Basumatary, et al., 2025).

O acúmulo desses resíduos é intensificado pelo descarte inadequado de plásticos e por atividades antrópicas. Em áreas agrícolas, a aplicação de lodo de esgoto constitui uma importante fonte de microplásticos, os quais podem ser absorvidos pelas plantas e inseridos na cadeia alimentar (Basumatary, et al., 2025).

A poluição por microplásticos altera os ciclos de carbono e nutrientes e desestabiliza ecossistemas terrestres e aquáticos, afetando diretamente a biodiversidade e espécies essenciais ao equilíbrio ecológico. Diante da ameaça do aquecimento global, é fundamental mitigar o uso de materiais plásticos e adotar modelos de gestão de resíduos de maior eficiência. (Basumatary., et al., 2025).

Dessa forma, o desenvolvimento de estratégias de remediação eficazes tem sido amplamente reconhecido como um desafio técnico-científico, fundamental para a preservação da integridade ecossistêmica, a mitigação de riscos ecotoxicológicos e a proteção da biodiversidade em escala global (Macleod, et al., 2021).

Diferentes abordagens físicas, químicas e biológicas vêm sendo estudadas com o objetivo de remover microplásticos de águas residuais e de outros sistemas aquáticos. Dentre essas, os métodos físicos se destacam por sua aplicabilidade operacional e por, em geral, não promoverem alterações químicas diretas nos contaminantes ou na matriz aquosa, essas técnicas são empregadas como etapas preliminares ou complementares dentro de sistemas integrados de tratamento (Ahmed, et al., 2025).

Materiais como óxido de grafeno e quitina têm apresentado resultados promissores, indicando sua relevância como adsorventes em processos de remediação hídrica. Sharma, et al., (2020); Rullander, et al. (2024), avaliaram a utilização de casca de árvore e biochar como materiais filtrantes para a remoção de diferentes polímeros microplásticos presentes em água pluvial, incluindo poliamida, polietileno, polipropileno e poliestireno, alcançando taxas de retenção superiores a 97%.

No tratamento químico, a remoção de microplásticos ocorre por meio da aplicação de agentes ou processos capazes de promover alterações nas propriedades físico-químicas desses contaminantes, favorecendo sua agregação, separação ou degradação na matriz aquosa (Ahmed, et al., 2025). Dentre as principais técnicas empregadas, a eletrocoagulação tem se destacado como uma alternativa tecnicamente promissora à coagulação convencional, sobretudo por reduzir a necessidade de adição direta de reagentes químicos ao sistema (Chu, et al., 2024).

No que se refere aos tratamentos biológicos, os microplásticos apresentam baixa suscetibilidade à biodegradação, uma vez que sua estrutura química, em geral, não contém grupos funcionais reativos nem ligações facilmente hidrolisáveis, o que limita sua utilização como substrato por microrganismos. Além disso, suas propriedades intrínsecas, como alta durabilidade, hidrofobicidade, cristalinidade e resistência à degradação, dificultam a fixação microbiana, a adsorção enzimática e o início de processos metabólicos capazes de promover sua decomposição (Cai, et al., 2023)

Entretanto, a biodegradação fúngica tem sido apontada como uma alternativa promissora para a remoção de microplástico de ambientes aquáticos. Além da atuação dos fungos, outras abordagens biológicas também vêm sendo investigadas, como o uso de algas na degradação de materiais poliméricos. Nessa condição, processos como hidrólise, corrosão superficial, incrustação e penetração têm sido descritos como mecanismos envolvidos na interação entre algas e microplásticos, contribuindo para sua decomposição ou alteração estrutural (Chia et al., 2020; Cai, et al., 2023).

No Brasil, a ocorrência de poluentes emergentes, especialmente do BPA, está frequentemente associada ao manejo inadequado de resíduos sólidos urbanos e industriais, bem como ao uso disseminado de materiais plásticos e resinas capazes de liberar esse composto no ambiente. A gestão de resíduos plásticos no país ainda apresenta fragilidades, caracterizadas por elevadas taxas de descarte inadequado e baixos índices de reciclagem, favorecendo a dispersão de microplásticos e BPA no solo e nos recursos hídricos (BRASIL, 2022).

No estado do Paraná, essa problemática é intensificada pela expansão das atividades industriais e agrícolas. Paralelamente, os microplásticos consolidaram-se como um importante campo emergente de investigação em universidades, centros de pesquisa e setores industriais, refletindo a crescente compreensão de seus impactos ambientais (Vargas, et al., 2022). Esses contaminantes são amplamente distribuídos no ambiente e apresentam potencial de bioacumulação ao longo da cadeia alimentar, constituindo uma ameaça aos ecossistemas e à saúde humana.

O bisfenol A (BPA), amplamente empregado na produção de plásticos e resinas, tem sido alvo de crescente preocupação devido aos seus efeitos adversos à saúde humana. Destaca-se sua atuação como desregulador endócrino, capaz de interferir no sistema hormonal e associado ao aumento do risco de diversas doenças, incluindo determinados tipos de câncer (Pérez, et al., 2017; Li, et al., 2022). Diante desse cenário, a Organização Mundial da Saúde (OMS) ressalta a necessidade de intensificar as pesquisas sobre microplásticos, BPA e outros poluentes emergentes, considerando seus potenciais impactos à saúde e ao meio ambiente (OEHHA, 2022).

A exposição humana ocorre predominantemente por ingestão e inalação, sendo esses contaminantes detectados em alimentos como frutos do mar, mel, hortaliças e carne (Pironti, et al., 2021). Esse estudo evidencia a relevância da via alimentar como rota de exposição e reforçam a necessidade de aprofundar estudos sobre mecanismos de contaminação, níveis de ingestão e efeitos a longo prazo. Apesar dos avanços, ainda persistem lacunas significativas quanto aos efeitos tóxicos decorrentes da exposição prolongada a esses poluentes. Além disso, as regulamentações vigentes mostram-se insuficientes, uma vez que frequentemente não abrangem todo o ciclo de vida dos plásticos, desde a produção até o descarte final (Usman, et al., 2020). Nesse contexto, torna-se essencial avaliar a contaminação do solo, especialmente em áreas urbanas e agrícolas, onde as atividades antrópicas intensificam os níveis de exposição (Yang, et al., 2025).

Embora o bisfenol A (BPA) seja amplamente investigado em ambientes aquáticos, sua ocorrência no solo ainda é pouco explorada (Blasing & Amelung, 2018; Yang, et al., 2025). Informações sobre sua distribuição e efeitos em diferentes compartimentos ambientais são fundamentais para a avaliação de riscos em condições naturais (Sodré et al., 2018). Considerando que grande parte das atividades humanas depende do solo ou resulta na deposição de resíduos nesse compartimento, observa-se um impacto crescente e recorrente sobre sua qualidade. Muitos desses compostos apresentam elevada persistência ambiental, podendo gerar efeitos adversos tanto à saúde humana quanto ao equilíbrio do solo e, conseqüentemente, dos recursos hídricos (Yang, et al., 2025).

A avaliação dessas alterações pode ser realizada por meio de indicadores de qualidade do solo, definidos como atributos mensuráveis expressos de forma quantitativa ou qualitativa (Silva, 2019). O conceito de qualidade do solo está relacionado à sua capacidade de desempenhar funções essenciais nos ecossistemas naturais ou manejados; esse equilíbrio é comprometido quando esses atributos são parciais ou totalmente afetados (Lepsch, 2021).

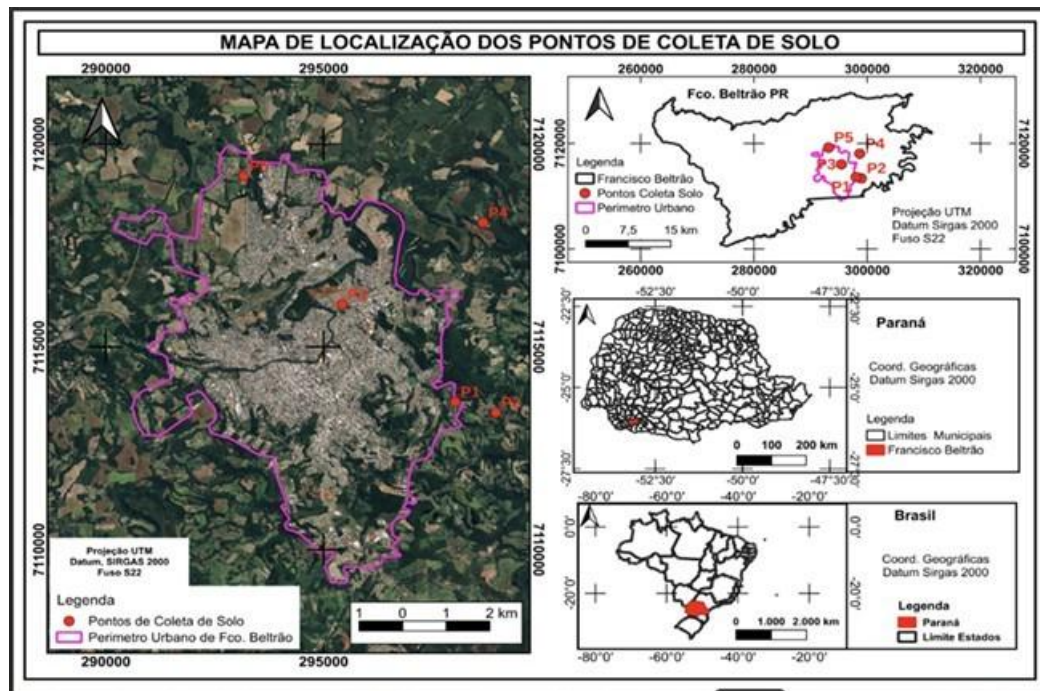
A qualidade e a funcionalidade do solo são reguladas por um conjunto integrado de propriedades físico-químicas e biológicas, que determinam o destino ambiental e o risco ecológico dos contaminantes presentes nesse compartimento (Lepsch, 2021; Silva, 2019). Essas propriedades constituem ferramentas fundamentais para o diagnóstico, monitoramento e avaliação de alterações em ecossistemas, refletindo sua saúde e sustentabilidade. Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo identificar a contaminação por bisfenol A (BPA) e microplásticos em solos de áreas urbanas e de seu entorno no município de Francisco Beltrão, Paraná.

2 - Material e Métodos

2.1 Localização da área de estudo

O município de Francisco Beltrão está situado na região Sudoeste do Paraná (26°05'S, 53°03'W), apresentando uma economia diversificada baseada em atividades agrícolas e urbano-industriais (IBGE, 2023). O crescimento urbano acelerado e a expansão do parque industrial municipal têm intensificado a geração de resíduos sólidos urbanos.

Figura 1 - Mapa de localização dos pontos de coleta das amostras
Figure 1 - Map showing the location of the sample collection points



Fonte: Autores, 2024
 Source: Authors, 2024

Para esse estudo, foram definidos cinco pontos de amostragem georreferenciados, distribuídos para contemplar diferentes usos do solo (agrícola, urbano e industrial). A seleção dos pontos de amostragem apresentado na Figura 1, baseou-se em critérios que contemplassem diferentes intensidades de perturbação antrópica, estabelecendo um gradiente que varia de áreas minimamente alteradas a locais submetidos a intensa pressão por atividades urbanas e industriais.

2.2 Procedimentos metodológicos para coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em setembro de 2024, na camada de 10–20 cm de profundidade, com o auxílio de um trado holandês, foi removida a camada superficial de resíduos vegetais, a fim de evitar interferências no material amostrado. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos de polietileno limpos, devidamente identificados, e transportadas ao laboratório para posterior preparo e análise, conforme as recomendações da EMBRAPA (2024). Durante o procedimento de coleta, foram adotados cuidados para

minimizar contaminações externas, especialmente por materiais plásticos, considerando a natureza dos contaminantes investigados.

A Tabela 1 apresenta a identificação das amostras coletadas, assim, como as respectivas classes de solo e algumas de suas principais características. Essas informações são importantes para a caracterização da área de estudo e para a compreensão de possíveis influências dos atributos do solo sobre a ocorrência de microplásticos e bisfenol A (BPA.).

Tabela 1. Identificação das classes de solos amostradas na área de estudo e descrição de suas principais características pedológicas

Table 1. Identification of the soil classes sampled in the study area and description of their main pedological characteristics

Amostras	Tipo de solo	Características
P1	Nitossolo	São solos profundos, bem drenados, com elevada fração argilosa e altos teores de óxidos de ferro, conferindo coloração avermelhada e estrutura bem definida.
P2	Neossolo	São solos pouco desenvolvidos, em geral, possuem baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, o que pode favorecer maior mobilidade de contaminantes no perfil do solo
P3, P4 e P5	Latossolos	São solos muito intemperizados, sua elevada porosidade e estabilidade estrutural podem influenciar a dinâmica de retenção e transporte de poluentes emergente

Fonte: Autores, 2024 (adaptado do SiBCS/Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2024).

Source: Authors, 2024

A Figura 2, indica o local de coleta de solo no primeiro ponto (P1), situado em frente a uma usina particular de reciclagem de resíduos sólidos, localizada na Linha São Paulo, no município de Francisco Beltrão, Paraná.

Figura 2- Fotografia do 1º ponto de coleta (P1), localizado na Linha São Paulo, município de Francisco Beltrão/PR
 Figure 2 - Photograph of the 1st collection point (P1), located at Linha São Paulo, municipality of Francisco Beltrão/PR



Fonte: Autores, 2024

Source: Authors, 2024

Trata-se de uma área rural caracterizada por intenso tráfego de veículos e próximo de um depósito de coleta privada de resíduos recicláveis. A Figura 3, indica segundo ponto de coleta de solo (P2), localizada em uma região industrial com intenso tráfego de veículos.

Figura 3 - Fotografia do 2º ponto de coleta (P2), localizado na Linha São Paulo, município de Francisco Beltrão/PR
Figure 3 - Photograph of the 2nd collection point (P2), located in Linha São Paulo, municipality of Francisco Beltrão/PR



Fonte: Autores, 2024
Source: Authors, 2024

Essas áreas tendem a apresentar concentrações elevadas de poluentes químicos e microplásticos, decorrentes principalmente da deposição atmosférica e do manejo inadequado de resíduos sólidos. A Figura 4 mostra o terceiro ponto de coleta de solo (P3), localizado na área do Aterro Sanitário Público, considerado um local potencialmente suscetível à presença de microplásticos (MPs) e partículas de bisfenol A (BPA).

Figura 4 - Fotografia do 3º ponto de coleta (P3), Aterro Sanitário Público, localizado na Linha Santa Rosa, município de Francisco Beltrão /PR.
Figure 4 - Photograph of the 3rd collection point (P3), Public Sanitary Landfill, located in Linha Santa Rosa, municipality of Francisco Beltrão/PR.



Fonte: Autores, 2024
Source: Authors, 2024

Essa vulnerabilidade decorre, sobretudo, das atividades de triagem e processamento de materiais plásticos realizadas na estação de reciclagem adjacente. A Figura 5, indica o quarto ponto de coleta de solo (P4), localizado no entorno de uma rodovia e próximo a uma unidade de saúde.

Figura 5 - Fotografia do 4º ponto de coleta (P4), localizado no Bairro Luther King, município de Francisco Beltrão/PR.

Figure 5 - Photograph of the 4th collection point (P4), located in the Luther King neighborhood, municipality of Francisco Beltrão/PR.



Fonte: Autores, 2024
Source: Authors, 2024

Esta área pode contribuir com a presença de resíduos farmacêuticos e de equipamentos médicos, principais fontes de poluentes emergentes, como ftalatos e outros aditivos de plásticos. A Figura 6, corresponde ao quinto ponto de coleta de solo (P5), localizado em uma área industrial consolidada.

Figura 6 - Fotografia do 5º ponto de coleta (P5), localizado no complexo no bairro Pinheirinho, município de Francisco Beltrão/PR

Figure 6 - Photograph of the 5th collection point (P5), located in the complex in the Pinheirinho neighborhood, municipality of Francisco Beltrão/PR



Fonte: Autores, 2024
Source: Authors, 2024

A área é considerada um potencial fonte de contaminação por diversos poluentes químicos, como microplásticos de origem industrial, bisfenol A (BPA) e hidrocarbonetos associados às atividades fabris.

2.2 Análises Físicas e Químicas das amostras de solo

A textura do solo foi determinada por análise granulométrica da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), seguindo os procedimentos descrito pela EMBRAPA (2018), com a quantificação das frações areia, silte e argila.

As análises químicas do solo foram determinadas em conformidade com os protocolos analíticos padronizados pela Embrapa (2018), contemplando os principais atributos químicos do solo, pH, matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P), capacidade de troca de cátions (CTC).

Os teores dos metais, ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu) e manganês (Mn), foram determinados por absorção Atômica. As análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco.

2.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram realizadas em espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), modelo Frontier (Perkin Elmer), na Central de Análises do Campus Pato Branco da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Os espectros de FTIR, foram adquiridos com a soma de 128 varreduras, resolução de 4 cm^{-1} , na faixa espectral de $400\text{ a }4000\text{ cm}^{-1}$. Para a obtenção dos espectros, as amostras foram preparadas na forma de pastilhas de KBr, utilizando-se aproximadamente 1% (m/m) de amostra (cerca de 99 mg de KBr para 1 mg de amostra).

2.5 Cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE/HPLC)

Essa análise foi realizada pelo Laboratório Multiusuários de Equipamentos e Análises Ambientais (LAMEAA), Sede Ecoville do Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). A cromatografia foi utilizada para a determinação da concentração de bisfenol A (BPA) nas cinco amostras de solo.

Os procedimentos metodológicos foram ajustados às especificidades da matriz do solo, bem como às condições experimentais adotadas neste estudo, de modo a assegurar maior adequação analítica, reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

A extração do bisfenol A das amostras de solo foi realizada com base na adaptação de protocolos descritos na literatura, conforme proposto por Campos, et al (2019), Pradhan, et al (2020), e Pop, et al (2024). O bisfenol A foi extraído a partir de 5g de solo previamente homogeneizado (Terra Fina Seca ao Ar), adicionando 20 mL de solução (solventes de grau HPLC), composta por metanol e água ultrapura na proporção de 20:80 (v/v), em seguida adicionou-se 20 mL solução de NaOH $0,1\text{ mol L}^{-1}$, com a finalidade de promover a dessorção do BPA, adsorvido às partículas do solo.

A suspensão obtida foi submetida à agitação em banho ultrassônico por 20 minutos e, posteriormente, centrifugada a 4000 rpm por 30 minutos. O extrato foi filtrado com membrana de $0,45\text{ }\mu\text{m}$ para remover partículas finas, e, então analisado por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS).

As análises cromatográficas foram realizadas em coluna Biphenyl ($2,1 \times 100\text{ mm}$, $3\text{ }\mu\text{m}$), mantida a 40°C , utilizando-se como fase móvel água e metanol, com vazão de $0,3\text{ mL min}^{-1}$ e volume de injeção de $5\text{ }\mu\text{L}$.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análises Físicas e Químicas das amostras de solo

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises físico-químicas realizadas nas amostras de solo, com o objetivo de caracterizar atributos relevantes para a interpretação da qualidade do solo e sua possível relação com a presença e o teor de bisfenol A (BPA) nas amostras avaliadas.

Tabela 2. Resultados das análises físicas e químicas das amostras de solo
Table 2. Results of the physical and chemical analyzes of the soil samples

Amostra	Argila%	Areia%	Silte%	MO%	pH/CaCl ₂	CTC (cmol _c /Kg)	P mg/dm ³
P1	40,0	22,5	37,5	1,07	5,8	67,7	68,3
P2	60,0	5,1	34,9	3,75	5,1	43,0	20,0
P3	81,0	2,8	16,2	0,80	4,8	17,3	5,2
P4	70,0	2,8	27,2	0,40	5,1	8,7	5,6
P5	79,0	4,4	16,6	1,74	5,0	19,3	6,0

Fonte: Autores, 2024

Legenda: MO (matéria orgânica), CTC (capacidade de troca catiônica) e P (fósforo).

Legend: OM (organic matter), CEC (cation exchange capacity), and P (phosphorus)

Source: Authors, 2024

As amostras P3 e P5 apresentaram teores de argila elevados, o que lhes confere maior eficiência na retenção de contaminantes. Essa maior capacidade está relacionada à elevada superfície específica das partículas argilosas e à presença de cargas elétricas negativas, que intensificam os processos de adsorção de poluentes no solo.

A amostra P1 apresentou o teor de areia mais elevado (22,5%), essa característica indica menor capacidade de retenção de poluentes. Esse comportamento está associado a maior macroporosidade nesse tipo de solo, que favorece a infiltração de água e, conseqüentemente, a lixiviação de contaminantes para camadas mais profundas, podendo atingir as águas subterrâneas conforme reportado por Zhang, et al (2024), em estudos sobre mobilidade de poluentes emergentes em solos arenosos.

Conferindo as análises química (Tab. 2), as cinco amostras de solo analisadas apresentaram teores muito baixos de matéria orgânica (MO), com destaque para a amostra P4, que exibiu o menor valor (0,40%). Essa amostra também apresentou baixa capacidade de troca catiônica (CTC), com valor de 8,7 cmolc/kg (Tab. 2), indicando uma reduzida capacidade de retenção de poluentes emergentes.

Esses resultados são relevantes, uma vez que tanto a MO quanto a CTC são parâmetros fundamentais para os processos de mitigação e imobilização de contaminantes no solo. Já a presença de fósforo no solo (Tab. 1) indica um potencial adicional para a atenuação e retenção de poluentes emergentes. A eficácia do fósforo como agente imobilizador está associada principalmente à sua baixa mobilidade no solo e à capacidade de formar complexos estáveis ou de promover a adsorção em superfícies minerais, contribuindo para a imobilização de diferentes classes de contaminantes.

Assim, a amostra P1 destaca-se por apresentar o maior teor de fósforo (68,3 mg/dm³), bem como a maior CTC com valor de 67,7 cmolc/kg (Tab. 2). Esses atributos conferem à amostra P1, capacidade superior de adsorção e retenção de uma ampla gama de poluentes emergentes, resultando na redução de sua mobilidade no solo e, conseqüentemente, no menor risco de contaminação de camadas mais profundas e das águas subterrâneas.

3.1 Teores de metais: Cobre, Ferro, Zinco e Manganês das amostras de solo

A Tabela 3 apresenta os teores dos metais cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn), expressos em mg dm^{-3} , obtidos a partir da análise das amostras de solo coletadas em cinco pontos distintos da área de estudo.

Tabela 3. Resultados das análises físicas e químicas das amostras de solo
Table 3. Results of physical and chemical analyses of soil samples

Amostra	Cu (mg/dm^3)	Fe (mg/dm^3)	Zn (mg/dm^3)	Mn (mg/dm^3)
P1	15,32	133,14	16,44	142,84
P2	13,50	116,35	14,98	188,85
P3	11,90	103,10	1,56	35,65
P4	5,90	106,80	3,59	19,82
P5	13,81	119,91	3,04	99,01

Fonte: Autores, 2024

Source: Authors, 2024

A influência dos elementos metálicos sobre os poluentes emergentes, decorre principalmente das interações geoquímicas entre metais, matéria orgânica, óxidos metálicos e superfícies poliméricas. O bisfenol A (BPA), é um composto orgânico aromático, de caráter predominantemente hidrofóbico, contendo dois grupos fenólicos que favorecem interações com a matriz do solo. Essas interações podem ocorrer por ligações de hidrogênio, complexação com íons metálicos presentes na fração mineral ou ainda forças eletrostáticas, influenciando sua adsorção, mobilidade e persistência no ambiente.

O teor de ferro (Tab. 3), variou entre 103,10 e 133,14 mg/dm^3 , esse elemento desempenha papel essencial na retenção de BPA no solo. Os óxidos e hidróxidos de ferro, especialmente nas formas associadas ao Fe^{3+} , apresentam elevada área superficial e cargas superficiais variáveis, características que favorecem a adsorção do BPA por meio de mecanismos como a complexação com grupos fenólicos da molécula de BPA (Khalid, et al., 2021; Li, et al., 2026).

Solo com teores de ferro muito elevado tendem a diminuir a mobilidade do BPA ao longo do perfil, ocasionando a sua imobilização e aumentando a retenção desse poluente (Khalid, et al., 2021; Li, et al., (2026). O manganês (Tab. 3), apresentou teores oscilando de 19,82 a 188,85 mg dm^{-3} . Esse elemento pode exercer influência significativa no comportamento ambiental do BPA no solo, uma vez que os óxidos de manganês são altamente reativos e tendem a ligar-se ao BPA (Khalid, et al., 2021).

Os óxidos de manganês, podem tanto adsorver o BPA quanto atuar como agentes oxidantes, promovendo transformações químicas na molécula e, conseqüentemente, reduzindo sua persistência no ambiente. O cobre (Tab. 3), cujos teores variaram entre 5,9 e 15,32 mg dm^{-3} , apresenta elevada afinidade pela matéria orgânica do solo, característica que influencia significativamente o comportamento ambiental do BPA. Esse metal pode participar da formação de complexos envolvendo cobre, matéria orgânica e BPA, favorecendo a adsorção indireta desse poluente (Khalid, et al., 2021; Li, et al., 2026).

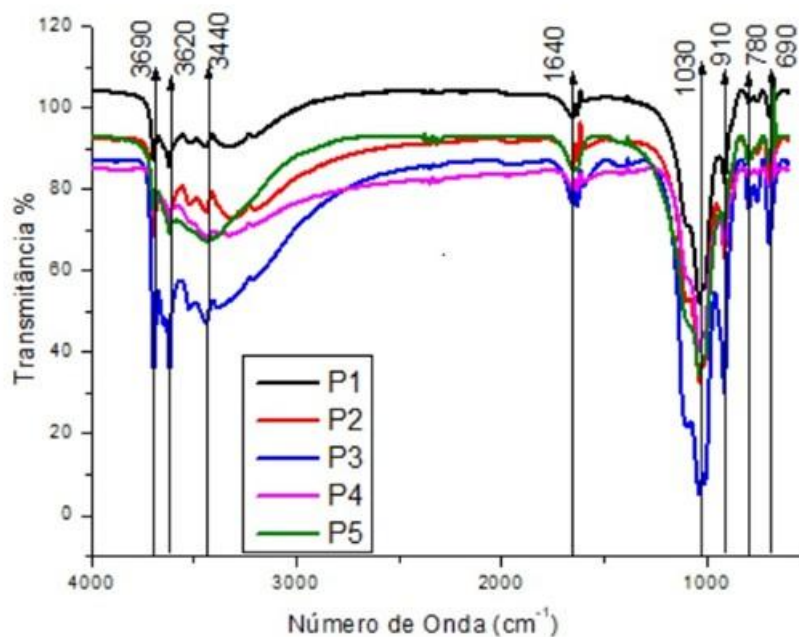
Em concentrações mais elevadas, especialmente em solos com maior teor de carbono orgânico, o Cu tende a intensificar a imobilização do BPA, reduzindo sua mobilidade e aumentando sua retenção no solo (Khalid, et al., 2021; Li, et al., 2026). Os teores de zinco (Tab. 2), variaram entre 1,56 e 16,44 mg dm^{-3} , apresenta menor afinidade direta pelo bisfenol A, quando comparado ao ferro e ao cobre. Sua atuação no solo está associada, principalmente, à ocupação de sítios de adsorção na fração mineral, o que pode limitar a disponibilidade desses sítios para a retenção do BPA (Li, et al., 2026).

Em solos com maiores concentrações de Zn, essa competição por sítios adsorptivos pode reduzir a adsorção do contaminante, favorecendo maior mobilidade do BPA ao longo do perfil do solo e, potencialmente, ampliando seu transporte para compartimentos ambientais adjacentes (Li, et al, 2026).

3.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) tem recebido crescente atenção na análise de solos nos últimos 15 anos e tem sido aplicada para estimar propriedades físicas e químicas do solo (Jaconi, et al., 2019). A análise por FTIR evidenciou a presença de diferentes grupos funcionais associados às frações mineral e orgânica das amostras de solo. Os espectros correspondentes estão apresentados na Figura 7, todas as amostras apresentaram bandas nas regiões de 3670 e 3620 cm^{-1} , atribuídas às vibrações de estiramento O–H de grupos Si–OH e Al–O–H, característicos de minerais de argila (caulinita, gibbsita), do quartzo, e de ferro (goethita) (Merino-Guzmán & Fernández, 2025).

Figura 7 Espectros de FTIR de amostras de solo
Figure 7 FTIR spectra of soil samples



Fonte: Autores, 2025
Source: Authors, 2025

Esses resultados corroboram os elevados teores de argila identificados nas análises físicas das amostras de solo, indicando coerência entre os dados mineralógicos e granulométricos.

Observou-se ainda a presença da banda em torno de 1640 cm^{-1} , associada às vibrações de deformação axial de ligações C=C de grupos aromáticos ou/e C=O de grupos carboxilato (COO^-), típicos de ácidos carboxílicos, cetonas, aldeídos e ésteres (Silverstein, et al., 2005).

Essas funcionalidades estão relacionadas à fração de matéria orgânica do solo, a qual desempenha papel relevante nos processos de adsorção de contaminantes. Em todas as amostras aparece uma banda intensa na região de 1030 cm^{-1} , atribuída à vibração de estiramento Si–O, característica de impurezas silicatadas, principalmente associadas ao quartzo (Lazzareti, et al., 2020). Além disso, a banda observada em 910 cm^{-1} está relacionada às deformações O–H ligadas ao alumínio, evidenciando a presença de argilominerais como

caulinita e gibbsita.

As bandas nas regiões de 780 e 690 cm^{-1} correspondem às vibrações de estiramento e deformação angular das ligações Si–O, também atribuídas a fases silicatadas (Lazzareti, et al., 2020). Uma particularidade foi observada na amostra P3, que apresentou uma banda adicional em torno de 1100 cm^{-1} , localizada na região de impressão digital do espectro (1300–1100 cm^{-1}) (Silverstein, et al., 2005). Essa banda é atribuída à vibração de estiramento axial da ligação simples C–O, indicando a presença de grupos funcionais como álcoois, ésteres ou ácidos carboxílicos. Tal característica pode estar associada ao elevado teor de argila da amostra e à maior interação com compostos orgânicos.

Ressalta-se que o ponto de coleta da amostra P3 encontra-se próximo a uma estação de reciclagem e coleta seletiva, onde ocorre intensa manipulação de resíduos plásticos. Essa atividade pode favorecer a fragmentação de polímeros e a liberação de partículas plásticas, como microplásticos, no solo, o que pode explicar a presença adicional de grupos funcionais orgânicos detectados por FTIR.

A amostra P2 apresentou maior intensidade da banda na região de 1030 cm^{-1} em relação às demais amostras. O ponto de coleta está situado no interior de uma fábrica de alumínio, onde as atividades industriais podem favorecer a deposição de resíduos metálicos, especialmente alumínio e ferro, no solo. A intensidade dessa banda pode estar associada a concentração mais elevada de óxidos metálicos, em conformidade com as características industriais da área estudada.

De modo geral, os resultados de FTIR indicam que a composição mineralógica do solo e as atividades antrópicas locais influenciam sua estrutura química. Esses achados reforçam a importância da caracterização espectroscópica para compreender os processos de retenção e mobilidade de poluentes emergentes nos solos analisado.

3.4 Cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE/HPLC)

O bisfenol A (BPA) foi identificado por meio da comparação dos espectros obtidos com aqueles disponíveis na biblioteca de referência do National Institute of Standards and Technology/NIST (MAY, et al., 2000). A Tabela 4, mostra a concentração de BPA determinada nos cinco pontos de coleta de solo.

Tabela 4 – Concentração de bisfenol A por CLAE (Cromatografia Líquida de Alta Eficiência)
Table 4 – Bisphenol-A concentration by HPLC (High Performance Liquid Chromatography)

Amostra	Área	[]/ppb	Diluição	[] real/ppb	Média	DP
P1	48316	24,8	50,00	1239,6	1256,55	27,0
	48394	24,8		1241,7		
	50142	25,7		1288,3		
P2	50571	26,0	50,00	1299,8	1325,20	49,1
	50353	25,9		1294,0		
	53641	27,6		1381,8		
P3	75690	39,4	50,00	3941,0	4002,75	116,1
	79354	41,4		4136,7		
	75493	39,3		3930,5		
P4	56401	29,1	100,00	2910,9	2991,21	128,6
	56667	29,2		2925,2		
	60699	31,4		3140,5		
P5	89064	46,5	5000,000	232761	234557,44	4709,9
	91738	48,0		239901,2		
	88408	46,2		231009,80		

Fonte: Autores, 2025

Legenda: LOD: limite de detecção; LOQ: limite de quantificação; CV: coeficiente de variação

Source: Authors, 2025

Legend: LOD: limit of detection; LOQ: limit of quantification; CV: coefficient of variation

O método analítico por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) demonstrou desempenho adequado para a determinação de bisfenol A (BPA) em matrizes de solo, evidenciado pelos parâmetros de validação obtidos. O limite de detecção (LOD) foi de $3,39 \mu\text{g kg}^{-1}$ e o limite de quantificação (LOQ) de $10,27 \mu\text{g kg}^{-1}$, indicando sensibilidade satisfatória para análises ambientais. A curva de calibração apresentou linearidade adequada no intervalo de $5,7$ a $40 \mu\text{g kg}^{-1}$, com coeficiente de variação (CV) inferior a 2% na maioria dos pontos avaliados. Além disso, os ensaios de validação confirmaram a precisão do método, com CV inferior a 7%, e exatidão média variando entre 83% e 101%, evidenciando a robustez e a confiabilidade do procedimento analítico, em concordância com a literatura (Campos, et al., 2019).

No que se refere aos resultados analíticos, as concentrações de BPA apresentaram variação expressiva entre os pontos de amostragem. As amostras P1, P2, P3 e P4 exibiram níveis relativamente baixos, variando entre 1256 e $4002 \mu\text{g kg}^{-1}$. Em contraste, a amostra P5 apresentou concentração significativamente mais elevada ($234.557 \mu\text{g kg}^{-1}$), aproximadamente 60 vezes superior à observada na amostra P3, caracterizando um cenário de contaminação acentuada. Esse resultado sugere a influência de fontes pontuais de poluição, possivelmente associadas à proximidade de áreas de descarte de resíduos de serviços de saúde, industriais ou de materiais poliméricos.

Essa interpretação é reforçada pelo amplo uso do BPA como monômero na produção de policarbonatos e resinas epóxi, materiais frequentemente presentes nesses tipos de resíduos. Por outro lado, o elevado desvio padrão observado para a amostra P5 ($4709,9 \mu\text{g kg}^{-1}$) indica uma distribuição heterogênea do contaminante no solo, característica típica de áreas impactadas por deposição irregular ou localizada de resíduos.

Em conjunto, os resultados reforçam a necessidade de monitoramento ambiental contínuo e da adoção de estratégias eficazes de gestão de resíduos, sobretudo em regiões com maior potencial de aporte de contaminantes emergentes. Diante da crescente preocupação associada a esses poluentes, com destaque para os microplásticos e bisfenol A (BPA), torna-se urgente intensificar os esforços científicos voltados à compreensão de sua dinâmica no ambiente e de seus possíveis efeitos em longo prazo. O fortalecimento desse conhecimento é essencial para fundamentar estratégias mais eficazes de monitoramento, manejo e mitigação, contribuindo para a preservação da qualidade ambiental, da integridade funcional dos ecossistemas e da sustentabilidade das sociedades humanas. Assim, o avanço da pesquisa científica representa um passo decisivo para o enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos impostos pelos contaminantes emergentes.

4. Conclusão

A suscetibilidade do solo à contaminação está diretamente relacionada à natureza dos poluentes e aos atributos físico-químicos da matriz edáfica, especialmente a textura, que regula os processos de retenção e mobilidade. Solos com capacidade de retenção intermediária tendem a favorecer simultaneamente a adsorção superficial e a mobilização de contaminantes, sobretudo sob condições de erosão, configurando um cenário de risco ambiental dinâmico. Nesse contexto, a interpretação integrada dos resultados evidencia que a distribuição e o comportamento do bisfenol A (BPA) nos solos analisados resultam da interação entre fatores intrínsecos do solo e pressões antrópicas.

A amostra P2, que apresentou o maior teor de matéria orgânica (3,75%), exibiu, contudo, concentração relativamente baixa de BPA ($1325,2 \mu\text{g kg}^{-1}$), em contraste com a expectativa teórica de maior sorção desse composto em solos ricos em matéria orgânica. Esse resultado pode ser explicado pela atuação de mecanismos concorrentes, como a formação de complexos solúveis entre o BPA e a matéria orgânica dissolvida, os quais aumentam sua mobilidade e favorecem processos de lixiviação, conforme reportado na literatura recente. Adicionalmente, solos com maior teor de matéria orgânica tendem a apresentar maior atividade microbiana, o que pode promover a biodegradação aeróbia de compostos orgânicos, contribuindo para a redução de suas concentrações.

A influência do pH constitui outro fator determinante na dinâmica dos contaminantes. As amostras apresentaram pH ácido a ligeiramente ácido (4,8–5,8), condição que reduz a densidade de cargas negativas na superfície coloidal do solo, limitando a adsorção eletrostática de compostos orgânicos ionizáveis. Paralelamente, o meio ácido favorece a solubilização de complexos organometálicos, aumentando o potencial de migração vertical no perfil do solo. Esses aspectos, combinados, indicam maior vulnerabilidade à mobilização de contaminantes em ambientes com tais características químicas.

A variabilidade entre os pontos de amostragem reforça essa interpretação. O ponto P4, com o menor teor de matéria orgânica (0,402%) e baixa capacidade de troca catiônica ($CTC = 8,72 \text{ cmolc kg}^{-1}$), apresenta reduzida capacidade tampão e limitada retenção de contaminantes, configurando elevada suscetibilidade à contaminação. Em contraste, o ponto P1, com teor moderado de matéria orgânica (1,072%), elevada CTC ($67,69 \text{ cmolc kg}^{-1}$) e alto teor de fósforo disponível ($63,8 \text{ mg dm}^{-3}$), demonstra maior capacidade de retenção, especialmente para cátions metálicos e compostos orgânicos polares. O fósforo, devido à sua baixa mobilidade e forte interação com a matriz do solo, pode atuar como agente imobilizador indireto, favorecendo a formação de complexos estáveis e reduzindo a biodisponibilidade de contaminantes.

A geoquímica dos metais também desempenha papel relevante na dinâmica do BPA. Os resultados indicam que ferro e manganês atuam como principais controladores dos processos de retenção e transformação do contaminante, enquanto o cobre contribui para sua complexação e imobilização indireta. O zinco, por sua vez, influencia predominantemente a mobilidade do BPA, em função da competição por sítios de adsorção na fração mineral do solo. Além disso, a interação do BPA com microplásticos pode potencializar sua persistência ambiental, ampliando os riscos associados à sua presença.

As análises espectroscópicas por FTIR confirmaram a presença de argilominerais, como caulinita e gibbsita, além de matéria orgânica e impurezas silicatadas, evidenciadas por bandas características associadas a grupos hidroxila. Esses resultados corroboram os dados granulométricos e indicam elevada capacidade de adsorção, especialmente em frações finas do solo. Considerando que o BPA apresenta afinidade por superfícies argilosas, sua retenção tende a ser favorecida nessas condições, embora não impeça sua mobilidade em função de outros fatores ambientais.

A análise por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), revelou a presença ubíqua de BPA em todas as amostras, com concentrações variando entre $1256 \mu\text{g kg}^{-1}$ (P1) e $234.557 \mu\text{g kg}^{-1}$ (P5), evidenciando contaminação disseminada. O método analítico apresentou elevada sensibilidade e confiabilidade, assegurando a robustez dos dados obtidos. Destaca-se o ponto P5, cuja concentração indica contaminação severa, possivelmente associada a atividades industriais, aproximando-se de valores reportados em áreas impactadas por resíduos eletroeletrônicos. Tal magnitude representa risco significativo à qualidade do solo e aos recursos hídricos subterrâneos, considerando o potencial de lixiviação do BPA.

Embora os demais pontos apresentem concentrações inferiores, os valores detectados ainda excedem referências típicas para solos não impactados, indicando contaminação difusa associada a atividades urbanas e periurbanas. Esses achados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e de políticas públicas voltadas à gestão adequada de resíduos sólidos.

De forma geral, a análise integrada demonstra que, embora solos com maior teor de argila apresentem maior capacidade de retenção de contaminantes nas camadas superficiais, a intensidade das fontes antrópicas exerce influência determinante sobre as concentrações observadas. Assim, o comportamento do BPA no ambiente edáfico não pode ser explicado por um único fator isolado, mas sim pela interação entre propriedades físico-químicas do solo e pressões externas.

Por fim, cabe destacar que, por se tratar de um estudo pioneiro na região Sudoeste do Paraná, a estratégia amostral adotada foi direcionada a áreas com maior potencial de contaminação. Essa abordagem, embora adequada para uma avaliação inicial, apresenta limitações, como a realização de amostragem em único período, a ausência de áreas de controle e a restrição à camada superficial do solo (10–20 cm). Tais aspectos devem ser

considerados em estudos futuros, visando uma compreensão mais abrangente da dinâmica espacial e temporal da contaminação por BPA.

5. Agradecimentos

A UTFPR-Campus Francisco Beltrão, PPGEA, UTFPR-Campus Pato Branco (Central de Análises e Labsolos), UTFPR-Campus Curitiba/Ecoville (Laboratório de Análises/LAMEAA) e Prefeitura Municipal de Francisco Beltrão-PR.

6. Referências

Ahmed, A, A, S., Billah, Md, M., Ali, M. M., Guo, L., Akhtar, S.A., Bhuiyan, Md. K. A., Md.K., & Islam, Md. S., (2025). Microplastic characterization and factors influencing its abundance in coastal wetlands: insights from the world's largest mangrove ecosystem, Sundarbans. 32, 5435-5456. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36044-9>

Basumatary. T., Biswas, D., Boro, S., Nava, A. R., Narayan, M., & Sarma, H. (2025). Dynamics and Impacts of Microplastics (MPs) and Nanoplastics (NPs) on Ecosystems and Biogeochemical Processes: The Need for Robust Regulatory Frameworks. *ACS Omega* 10 (17), 17051-17069. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01175>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2022) Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico]/coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 209p. ISBN 978-65-88265-15-4 (on-line)

Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: analytical methods and possible sources. **Science of the Total Environment**, 612, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>

Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H., & Yan, M. (2023). Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. *Microorganisms*, 11 (1661), 1-17. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>

Campos, J. M., Roston, D. M., Queiroz, S. C. N. (2019). Desenvolvimento e validação de método para determinação de bisfenol A e etinilestradiol em aguapé e mini-papiro provenientes de wetlands construídas. **Quim. Nova**, 42 (8), 20-927. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170402>

Chia, W. Y., Tang, D. Y. Y., Khoo, K. S., Lup, A. N. K., Chew, K. W. (2020). Nature's fight against plastic pollution: Algae for plastic biodegradation and bioplastics production. *Environ Sci Ecotechnol*. 5 (4):100065. doi: 10.1016/j.ese.2020.100065.

Chu, Y., Zhang, J., Hou, X., Zhang, Y., Lu, J. & Wang, Y. (2024). Mitigation of natural organic matter fouling of electrified membranes by pre-coagulation strategies to improve bisphenol A treatment performance, Separation and Purification Technology. 338, 126591. ISSN 1383-5866. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126591>

Dayal, L., Yadav, K., Dey, U., Das, K., Kumari, P., Raj, D., MandaL, R. R. (2024). Recent advancement in microplastic removal process from wastewater - A critical review. *Journal of Hazardous Materials Advance*.

16, 1-15, ISSN 2772-4166 <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100460>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. edição. Rio de Janeiro - Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 230p. ISSN 1517-2627

EMBRAPA-Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono. (2024). Editores técnicos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 30p ISSN 2966-2443;243

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-**Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. (2025) 6ª edição. Brasília/DF. 393p ISBN 978-65-5467-104-0

Geremia, E., Tomajoli, M. T. M., Murano, C., Petito, A. & Fasciolo, G. (2023). Review the impact of micro and nanoplastics on aquatic organisms: Mechanisms of oxidative stress and implications for human health-A Review. *Environments*. 10 (161), 1-27. <https://doi.org/10.3390/environments10090161>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama de Francisco Beltrão. (2023). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br> acesso em 10 de janeiro de 2026

Jaconi, A., Vos, C. & Don, A. (2019). Near infrared spectroscopy as an easy and precise method to estimate soil texture. *Geoderma*, 337, 906-913. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.038>

Khalid, N; Aqeel, M; Noman, A; Khan, Mulk, S; Akhter, N. (2021). Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments. *Environmental Pollution*, 290, 104-118. doi:10.1016/j.envpol.2021.118104

Lazzareti, B. P., Silva, L. S., Drescher, G., L., Dotto, A. C., Britzke, & D., Nörnberg, J. L. (2020). Prediction of soil organic matter and clay contents by near-infrared spectroscopy – NIRS. *Cienc. Rural*, 50 (1), 1-8. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190506>

Luchese, E. B., Favero, L, O.B., & Lenzi, E. (2026). **Fundamentos da Química do solo: Teoria e Prática**. 3ª edição, Rio de Janeiro, Editora. Freitas Bastos, 280 p

Lepsch, I. F. (2021). **19 lições de pedologia**. 2ª edição, São Paulo. Editora Oficina de Textos, 310p.

Li, W.; Wang, S.; Wufuer, R.; Duo, J.; & Pan, X. (2022). Nanoplastic adsorption characteristics of bisphenol A: the roles of pH, metal ions, and suspended sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 178, 113602. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113602

Macleod, M.; Arp, H. P. H.; Tekman, M. B.; & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, 373, (6550), 61-65. doi: 10.1126/science.abg5433

Martín-pozo, L.; Mejias, C.; Santos, J. L.; Martin, J.; Aparicio, I.; & Alonso, E. (2024). Influence of microplastic contamination on the dissipation of endocrine disrupting chemicals in soil environment. *Environmental Pollution*, 347,123919. doi: 10.1016/j.envpol.2024.123919

May, W., Parris, R., Beck, C., Fassett, J., Greenberg, R., Guenther, F., Kramer, G., Wise, S., Gills, T., Colbert, J., & Gettings, R. (2000). Standard Reference Materials® Definitions of Terms and Modes Used at NIST for

Value-Assignment of Reference Materials for Chemical Measurements, NIST Special Publication 260-136 260-136, 16 pages.

Mensing, J.; & Riyad, B. S. (2022). Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments: a review: **Environmental Chemistry Letters**, 20, 1333-1375. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01379-5>

Merino-Guzmán, C., Fernández, I. J. (2025). Polymer-specific-impacts of microplastics on mineral retention and soil stability. **Environmental Pollution**, 378, 126487. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126487>

Montagner, C. C. Dias, M. Paiva, E. M & Vidal, C. (2021). Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. *Quim. Nova* 44 (10), 1328-1352. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170791>

OEHHA - Proposition 65 (2022). Evidence on the Carcinogenicity of Bisphenol A (BPA). The Office of Environmental Health Hazard Assessment. Disponível em: <http://www.oehha.ca.gov>. Acesso em 10 de fevereiro de 2026.

Pérez, J. A.; Martínez, A. P.; López, S. M. (2017). Endocrine-disrupting effects of bisphenol A: links to obesity and cancer. **Journal of Environmental Health**, 25 (2), 234 -245. doi:10.1007/s11356-021-13071-w

Pironti, C.; Ricciardi, M.; Motta, O.; Miele, Y.; Proto, A.; Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: intake through the food web, human exposure and toxicological effects. **Toxics**, 9, (9), 224. doi: 10.3390/toxics9090224

Pop, C. E., Miu, B., A., Nemeth, D., Wolf, R., Mihăilescu, D. F., Avramescu, S. M. & Mernea, M. (2024). Bisphenol A analysis and quantification inconsistencies via HPLC-UV: a systematic review with technical notes. **Discover Applied Sciences**, 6 (4) 171. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05617-z>

Pradhan, R., Venkata, K., Geetika, K., Taliyan, R., Khadgwat, R., Kachhawa, G., Singhvi, G., & Dubey, S., K. W. (2019), QhQbD-driven development and validation of HPLC method for determination of Bisphenol A and Bis-sulphone in environmental samples. **Journal of Environmental Analytical Chemistry**, 100 (1), 42–54. doi: 10.1080/03067319.2019.1629585

Puri, M., Gandhi, K., & Kumar, S. (2023). Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *Journal of Environmental Management*. 332, 117344, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117344>

Shah, A. I., Dar, M. U., Bhat, R. A., Singh, J. P., Singh, K., Bhat, S. A. (2020). Prospectives and challenges of wastewater treatment technologies to combat contaminants of emerging concerns. **Ecological Engineering**, 152, 104882 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105882>

Silverstein. Robert. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J., Bryce. D. L. (2005) **Spectrometric Identification of Organic Compounds**. New York, John Wiley & Sons, 8th Edition. 464p. ISBN-10:0470616377 ISBN-13 978-0470616376

Sodré, F. F.; Dutra, P. M., & Santos, V. P. (2018). Pharmaceuticals and personal care products as emerging micropollutants in Brazilian surface waters: a preliminary snapshot on environmental contamination and risks.

Eclética Química Journal, 43, 22-34. ISSN: 1678-4618 doi: 10.26850/1678-4618eqj.v43.1SI

Usman, S., Razis, A. F.A., Shaari, K., Amal, M. N. A., Saad, M. Z., ISA, N. M., Nazarudin, U. F., Zulkifli, S. Z., Sutra, & J., Ibrahim, M. A (2020). Microplastics pollution as an invisible potential threat to food safety and security, policy challenges and the way forward. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17 (24), 9591. doi:10.3390/ijerph17249591

Vargas, J. G. M.; Silva, V. B.; Oliveira, L. K., Molina, E. F. (2022). Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático. **Química Nova**, 45 (6), 705-711. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170870>

Wang, F. et al., (2024). Emerging contaminants: A One Health perspective. *The Innovation*. 5(4), 1-3, 100612. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612>

Yang, L., Yang, W., Li, Q., Zhao, Z., Zhou, H., Wu, P. (2025). Microplastics in Agricultural Soils: Sources, Fate, and Interactions with Other Contaminants. **J Agric Food Chem**, 28 (21), 12548-12562. doi: 10.1021/acs.jafc.5c03682.

Zhang, S., Fan, Y, Qian, X., Wu, Z., Feng, S., Xu, W., & Wang, G., (2024). Spatiotemporal distribution, source apportionment, and ecological risk of biphenyl analogues in a highly urbanized river basin. **Science of the total environment**, 920, 170964. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170964>