RGe ISSN: 2177-3246

AVALIAÇÃO QUÍMICA E FÍSICO-QUÍMICA DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA EM ÁREA IMPACTADA POR LIXIVIADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E SUCATA METÁLICA

CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL ASSESSMENT OF SOIL AND GROUNDWATER IN AN AREA IMPACTED BY LEACHATE FROM URBAN SOLID WASTE AND METAL SCRAP

EVALUACIÓN QUÍMICA Y FISICOQUÍMICA DEL SUELO Y DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN UN ÁREA IMPACTADA POR LIXIVIADO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y CHATARRA METÁLICA

10.56238/revgeov17n5-041

Maria Amanda Santana Veloso
Mestranda em Engenharia Química
Instituição: Centro de Capacitação e Pesquisa em Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (CEPEMA-Poli-USP)
E-mail: amanda.veloso@usp.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0005-8062-2890
Lattes: https://lattes.cnpq.br/5929279288306383

Osmar Francisco Gomes
Doutor em Ciências Ambientais
Instituição: Centro de Capacitação e Pesquisa em Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (CEPEMA-Poli-USP)
E-mail: ofgomes@usp.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9778-4152
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9002669322436747

Thiago Augusto da Mata Souza
Mestrando em Engenharia Química
Instituição: Centro de Capacitação e Pesquisa em Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (CEPEMA-Poli-USP)
E-mail: thiago.mata@usp.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-1798-6002
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5448948457775205

Lucas Monteiro de Carvalho Silva
Doutorando em Ciência Ambiental
Instituição: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP)
E-mail: lucas.mdecs@usp.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0009-4508-0335
Lattes: http://lattes.cnpq.br/0456155611769985

RGe
ISSN: 2177-3246

Claudio Augusto Oller do Nascimento
Doutor em Engenharia Química
Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP)
E-mail: oller@usp.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6110-0249
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4246000555132285

RESUMO
A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e a presença histórica de sucata metálica geram passivos ambientais complexos em áreas urbanas, exigindo interpretação integrada entre solo, água subterrânea e gases do solo. Este artigo reavalia uma área localizada no bairro Cantagalo, no município de Guarujá (SP), com histórico de disposição irregular de resíduos e armazenamento de sucata metálica, com base na integração de dados ambientais de campo, análises laboratoriais acreditadas e ensaios físico-químicos de bancada. O estudo foi organizado em duas etapas complementares: etapa de campo, com malha de gases do solo, instalação de poços de monitoramento, amostragem de solo e água subterrânea e análises por laboratório acreditado; e etapa de bancada, com ensaios de umidade gravimétrica, carbono total e granulometria em alta resolução vertical. No recorte avaliado, o solo não apresentou a resposta analítica mais representativa do impacto para compostos orgânicos voláteis (VOC), compostos orgânicos semivoláteis (SVOC), metais totais e hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH). Em contraste, a água subterrânea apresentou assinatura hidrogeoquímica mais consistente na fração dissolvida, com os maiores valores de concentração observados principalmente para bário e cobalto. As unidades de exposição foram tratadas como compartimentos de avaliação e organização espacial do sítio, permitindo relacionar cenários de uso, valores comparativos e distribuição das plumas. O bário apresentou distribuição mais pontual nos poços PM-14, PM-13 e PM-05, enquanto o cobalto exibiu distribuição mais ampla, especialmente nos poços PM-01, PM-05, PM-08, PM-09, PM-12, PM-13 e PM-14. As leituras de metano permaneceram abaixo do limite inferior de explosividade no período monitorado, embora com limitação de cobertura associada a poços não operacionais. Os ensaios de bancada confirmaram a heterogeneidade do meio poroso, com predomínio de material arenoso, baixa participação de partículas finas, oscilações abruptas de umidade e forte variabilidade de carbono total, condições coerentes com maior expressão do sinal ambiental na fase dissolvida. Em conjunto, esses resultados reforçam que a integração entre a estratigrafia, as propriedades físico-químicas do solo e as respostas analíticas da água subterrânea é fundamental para reduzir incertezas interpretativas, refinar o modelo conceitual do sítio e subsidiar o direcionamento de ações técnicas de monitoramento e gerenciamento ambiental.

Palavras-chave: Áreas Contaminadas. Lixiviado. Metais Dissolvidos. Água Subterrânea. Modelo Conceitual do Sítio.

ABSTRACT
The inadequate disposal of municipal solid waste and the historical presence of scrap metal generate complex environmental liabilities in urban areas, requiring an integrated interpretation of soil, groundwater, and soil gas data. This article reassesses an area located in the Cantagalo neighborhood, municipality of Guarujá, São Paulo State, Brazil, with a history of irregular waste disposal and scrap metal storage, based on the integration of field environmental data, accredited laboratory analyses, and bench-scale physicochemical tests. The study was organized into two complementary stages: a field stage, including a soil gas survey, installation of monitoring wells, soil and groundwater sampling, and

analyses performed by an accredited laboratory; and a bench-scale stage, including gravimetric moisture, total carbon, and grain-size distribution tests at high vertical resolution. Within the evaluated dataset, soil did not show the most representative analytical response to the impact regarding volatile organic compounds (VOC), semivolatile organic compounds (SVOC), total metals, and total petroleum hydrocarbons (TPH). In contrast, groundwater showed a more consistent hydrogeochemical signature in the dissolved fraction, with the highest concentration values mainly observed for barium and cobalt. The exposure units were treated as compartments for assessment and spatial organization of the site, allowing the relationship between land-use scenarios, comparative values, and plume distribution. Barium showed a more localized distribution in wells PM-14, PM-13, and PM-05, whereas cobalt showed a broader distribution, especially in wells PM-01, PM-05, PM-08, PM-09, PM-12, PM-13, and PM-14. Methane readings remained below the lower explosive limit during the monitored period, although spatial coverage was limited due to non-operational wells. The bench-scale tests confirmed the heterogeneity of the porous medium, with predominance of sandy material, low fine-particle content, abrupt moisture oscillations, and strong variability in total carbon, conditions consistent with a greater expression of the environmental signal in the dissolved phase. Overall, these results reinforce that the integration of stratigraphy, soil physicochemical properties, and analytical groundwater responses is essential to reduce interpretative uncertainties, refine the site conceptual model, and support the direction of technical actions for environmental monitoring and management.

Keywords: Contaminated Sites. Leachate. Dissolved Metals. Groundwater. Site Conceptual Model.

RESUMEN

La disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos y la presencia histórica de chatarra metálica generan pasivos ambientales complejos en áreas urbanas, lo que exige una interpretación integrada entre suelo, agua subterránea y gases del suelo. Este artículo reevalúa un área ubicada en el barrio Cantagalo, en el municipio de Guarujá, estado de São Paulo, Brasil, con antecedentes de disposición irregular de residuos y almacenamiento de chatarra metálica, a partir de la integración de datos ambientales de campo, análisis de laboratorio acreditado y ensayos fisicoquímicos de bancada. El estudio se organizó en dos etapas complementarias: una etapa de campo, con malla de gases del suelo, instalación de pozos de monitoreo, muestreo de suelo y agua subterránea, y análisis realizados por laboratorio acreditado; y una etapa de bancada, con ensayos de humedad gravimétrica, carbono total y granulometría en alta resolución vertical. En el recorte evaluado, el suelo no presentó la respuesta analítica más representativa del impacto para compuestos orgánicos volátiles (VOC), compuestos orgánicos semivolátiles (SVOC), metales totales e hidrocarburos totales de petróleo (TPH). En contraste, el agua subterránea presentó una firma hidrogeoquímica más consistente en la fracción disuelta, con los mayores valores de concentración observados principalmente para bario y cobalto. Las unidades de exposición fueron tratadas como compartimentos de evaluación y organización espacial del sitio, permitiendo relacionar escenarios de uso, valores comparativos y distribución de las plumas. El bario presentó una distribución más puntual en los pozos PM-14, PM-13 y PM-05, mientras que el cobalto mostró una distribución más amplia, especialmente en los pozos PM-01, PM-05, PM-08, PM-09, PM-12, PM-13 y PM-14. Las lecturas de metano permanecieron por debajo del límite inferior de explosividad durante el período monitoreado, aunque con limitación de cobertura asociada a pozos no operativos. Los ensayos de bancada confirmaron la heterogeneidad del medio poroso, con predominio de material arenoso, baja participación de partículas finas, oscilaciones abruptas de humedad y fuerte variabilidad de carbono total, condiciones coherentes con una mayor expresión de la señal ambiental en la fase disuelta. En conjunto, estos resultados refuerzan que la integración entre la estratigrafía, las propiedades fisicoquímicas del suelo y las respuestas analíticas del agua subterránea es fundamental para reducir incertidumbres interpretativas, refinar el modelo conceptual del sitio y subsidiar el direccionamiento de acciones técnicas de monitoreo y gestión ambiental.

ISSN: 2177-3246

Palabras clave: Áreas Contaminadas. Lixiviado. Metales Disueltos. Agua Subterránea. Modelo Conceptual del Sitio.

1 INTRODUÇÃO

A interpretação de sítios impactados por resíduos e materiais metálicos exige, portanto, uma leitura articulada entre fonte potencial, meio físico e resposta analítica, pois a simples identificação de concentrações acima de valores orientadores nem sempre é suficiente para explicar a distribuição espacial dos contaminantes e os mecanismos que sustentam sua permanência no sistema. Em áreas heterogêneas, a associação entre histórico de uso, compartimentação estratigráfica, propriedades do solo e comportamento hidrogeoquímico da água subterrânea é essencial para reduzir ambiguidades diagnósticas e fortalecer o modelo conceitual do sítio (CETESB, 2022; APPELO; POSTMA, 2018). Nessa perspectiva, a interpretação por linhas de evidência não corresponde apenas à justaposição de resultados analíticos, mas à integração crítica entre matrizes ambientais e processos de transporte, retenção e transformação que condicionam a expressão do impacto no subsolo.

Essa abordagem é particularmente relevante em cenários nos quais a água subterrânea apresenta resposta mais nítida na fração dissolvida, enquanto o solo registra comportamento mais heterogêneo e descontínuo, influenciado por textura, teor de umidade, conteúdo de carbono e distribuição de materiais antrópicos ao longo do perfil. Em meios predominantemente arenosos, com baixa participação de finos, tende a ocorrer maior conectividade de poros e menor área superficial específica para sorção, o que pode favorecer a mobilidade de espécies dissolvidas e ampliar a expressão hidrogeoquímica do impacto na água subterrânea (HILLEL, 2004; EMBRAPA, 2018). Para elementos como bário e cobalto, cujos comportamentos espaciais e controles geoquímicos não são equivalentes, essa leitura integrada torna-se ainda mais importante, pois permite distinguir concentrações pontuais mais elevadas de padrões de distribuição mais amplos e persistentes, contribuindo para interpretações mais robustas sobre mobilidade, compartimentação e criticidade ambiental (APPELO; POSTMA, 2018; ALLOWAY, 2019).

Com base nisso, o objetivo deste artigo é avaliar, de forma integrada, o comportamento químico e os controles físico-químicos do solo e da água subterrânea em uma área urbana costeira no município de Guarujá (SP), com histórico de deposição irregular de resíduos sólidos urbanos e presença de materiais metálicos/sucata metálica, enfatizando a organização espacial por unidades de exposição, a interpretação por plumas na fase dissolvida e o refinamento do modelo conceitual do sítio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO E UNIDADES DE EXPOSIÇÃO

A área investigada corresponde a um sítio urbano localizado no bairro Cantagalo, no município de Guarujá (SP), em contexto costeiro do Sudeste do Brasil, com superfície total de 10.429,3 m². Para fins de organização técnica e interpretação ambiental, a área foi subdividida em dois setores com históricos distintos de uso e potencial de geração de sinal ambiental: a porção A, com 2.583,61 m²,

associada ao armazenamento e acúmulo de sucata metálica; e a porção B, com 7.846,20 m², correspondente à antiga área de disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos. Essa compartimentação foi mantida ao longo do estudo por representar contextos-fonte distintos e por oferecer base espacial para a integração entre histórico de uso, distribuição dos pontos investigados e comportamento das matrizes ambientais avaliadas.

A Figura 1 apresenta a localização da área investigada e a delimitação dos dois setores de interesse ambiental, correspondentes à porção A e à porção B, definidos com base no histórico de uso e nas potenciais fontes associadas.

Figura 1 - Localização da área investigada e delimitação dos setores de interesse ambiental: porção A e porção B.



Fonte: Autora.

A organização espacial do estudo foi posteriormente refinada por meio das unidades de exposição (UEs), tratadas não apenas como categorias de tabela, mas como compartimentos técnico-espaciais de avaliação. Nesse enquadramento, a UE-01 corresponde ao cenário ocupacional/comercial, enquanto a UE-02 corresponde ao cenário residencial urbano, cada uma com valores comparativos específicos para água subterrânea. Essa segmentação permitiu interpretar os mesmos analitos sob cenários distintos de exposição, organizar a leitura das plumas dissolvidas e relacionar os resultados aos setores de maior criticidade potencial

Além de sua função comparativa, as unidades de exposição contribuíram para o refinamento do modelo conceitual do sítio. Em vez de interpretar os poços de monitoramento como pontos isolados, a segmentação por UEs permitiu integrar uso do solo, receptor potencial, critérios de comparação e distribuição espacial das anomalias hidrogeoquímicas, especialmente na água subterrânea. Assim, a

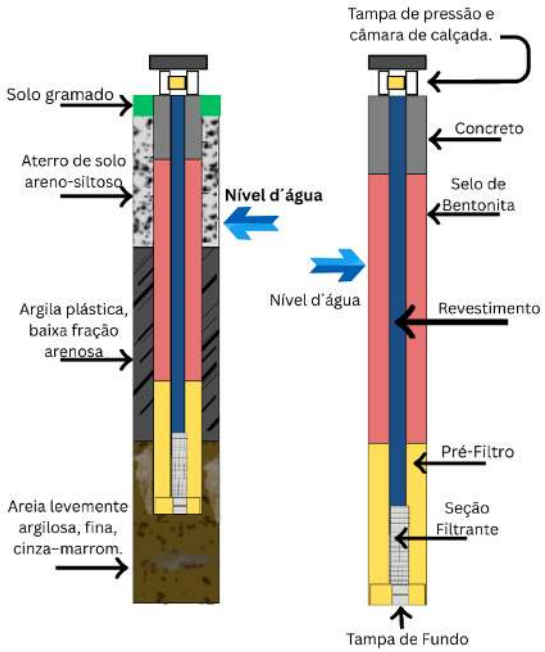
compartimentação por porções históricas e por unidades de exposição constituiu elemento central para a organização metodológica e para a interpretação integrada do impacto ambiental na área investigada

2.2 ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO

A pesquisa foi estruturada em duas etapas complementares. A Etapa 1 reuniu atividades de campo e análises laboratoriais externas, contemplando: amostragem de solo superficial por malha de multi-incremento (*Multi-Increment Sampling* – MIS); varredura de gases do solo por malha SGS (*Soil Gas Survey*); instalação de poços de monitoramento de água subterrânea; monitoramento hidrogeológico; amostragem de água subterrânea por baixa vazão (*low flow*); e monitoramento de gás metano em poços de vapor. A Etapa 2 compreendeu ensaios físico-químicos de bancada em alta resolução vertical, com incrementos de 5 cm, voltados à determinação de umidade gravimétrica, carbono total e granulometria, com a finalidade de qualificar a interpretação do meio poroso e apoiar a discussão integrada dos resultados obtidos em campo.

Na Etapa 1, foram instalados 18 poços de monitoramento de água subterrânea, conforme perfil construtivo (figura 2), sendo 7 unidades em julho de 2022 e 11 unidades em setembro de 2022, incluindo 4 poços multiníveis. Como complemento à avaliação de gases na zona não saturada, também foram instalados 8 poços de monitoramento de vapor, nos quais as leituras de metano foram realizadas com o analisador portátil EAGLE 2, o mesmo equipamento empregado na campanha de *Soil Gas Survey*. As amostras de solo e água subterrânea foram encaminhadas a laboratório acreditado segundo a ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, com emprego de métodos analíticos compatíveis com o escopo do estudo, incluindo ICP-MS para metais totais e dissolvidos, métodos EPA 8260D/5021A para VOC, EPA 8270E para SVOC, EPA 8015D para TPH e *Standard Methods* 9221E para microbiologia em água subterrânea.

Figura 2 - Perfil construtivo típico de poço de monitoramento de água subterrânea



Fonte: Autora.

Além dos mapas e da rede de monitoramento, registros fotográficos selecionados (figura 3) ajudam a explicitar o caráter operacional da Etapa 1, especialmente no que se refere à amostragem superficial e ao monitoramento hidrogeológico em campo.

Figura 3 - Registros fotográficos selecionados do trabalho de campo (Parte 1)

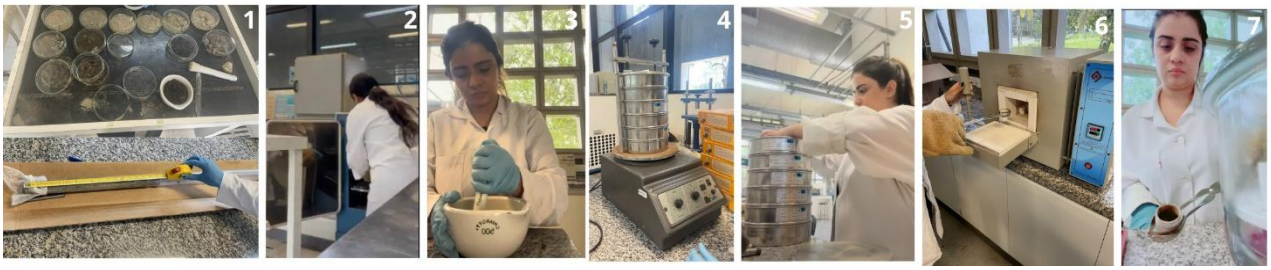


Fonte: Autora.

A representação construtiva evidencia que a interpretação da água subterrânea na fração dissolvida depende diretamente da adequada posição da seção filtrante, do preenchimento com pré-filtro e da selagem do espaço anular, fatores essenciais para a representatividade hidráulica da amostra e para a minimização de curtos-circuitos verticais.

A documentação fotográfica dos procedimentos laboratoriais também possui valor metodológico (figura 4), pois evidencia o preparo das amostras, o peneiramento granulométrico e o procedimento térmico empregado para a determinação de carbono total.

Figura 4 - Registros fotográficos selecionados das análises laboratoriais (Parte 2)



Fonte: Autora.

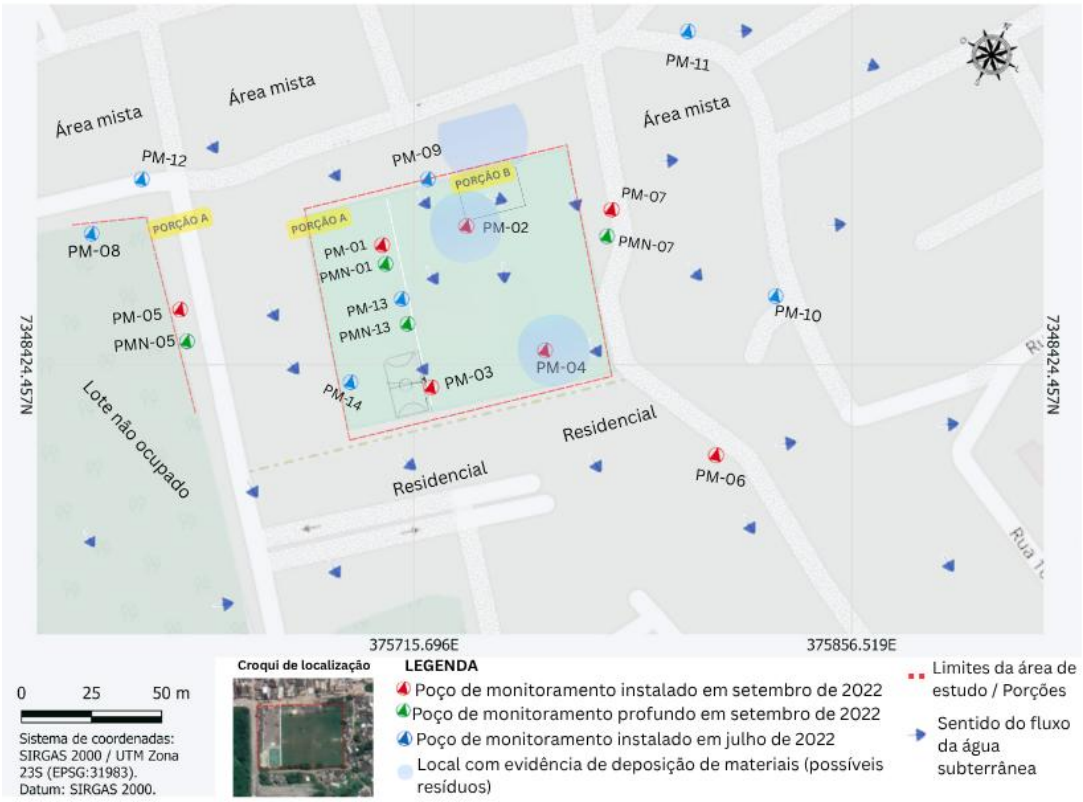
A inclusão desses registros não se limita à função ilustrativa, pois reforça a rastreabilidade da Etapa 1 e 2 e oferece suporte visual à interpretação dos resultados e contribui para explicitar a escala real de execução da investigação e a articulação metodológica entre as diferentes linhas de evidência produzidas em campo.

Os ensaios de bancada foram conduzidos em amostras de solo selecionadas de perfis representativos da área sob investigação, permitindo interpretação em escala vertical mais detalhada. A umidade gravimétrica foi determinada por secagem em estufa a 105 °C por 24 h; a granulometria foi avaliada por peneiramento em agitador mecânico, com organização das frações por classes de tamanho; e o carbono total foi estimado a partir de tratamento térmico em mufla, com controle do peso em balança analítica e cálculo por diferença de massa. O detalhamento operacional desses procedimentos, bem como a descrição das peneiras e classes granulométricas adotadas, é apresentado nas subseções metodológicas específicas.

Após a elaboração do mapa potenciométrico apresentado na figura 5, foi possível descrever as zonas de descarga, recarga e sentido do fluxo subterrâneo do aquífero. Nota-se na área de estudo, a presença de um fluxo advectivo (sentido do fluxo da água) predominantemente para Sudeste

Por sua vez, a interpretação espacial das plumas dissolvidas foi sustentada pela configuração da rede de monitoramento e pelo sentido preferencial de fluxo subterrâneo.

Figura 5 - Rede de poços de monitoramento e sentido preferencial de fluxo da água subterrânea



Fonte: Autora.

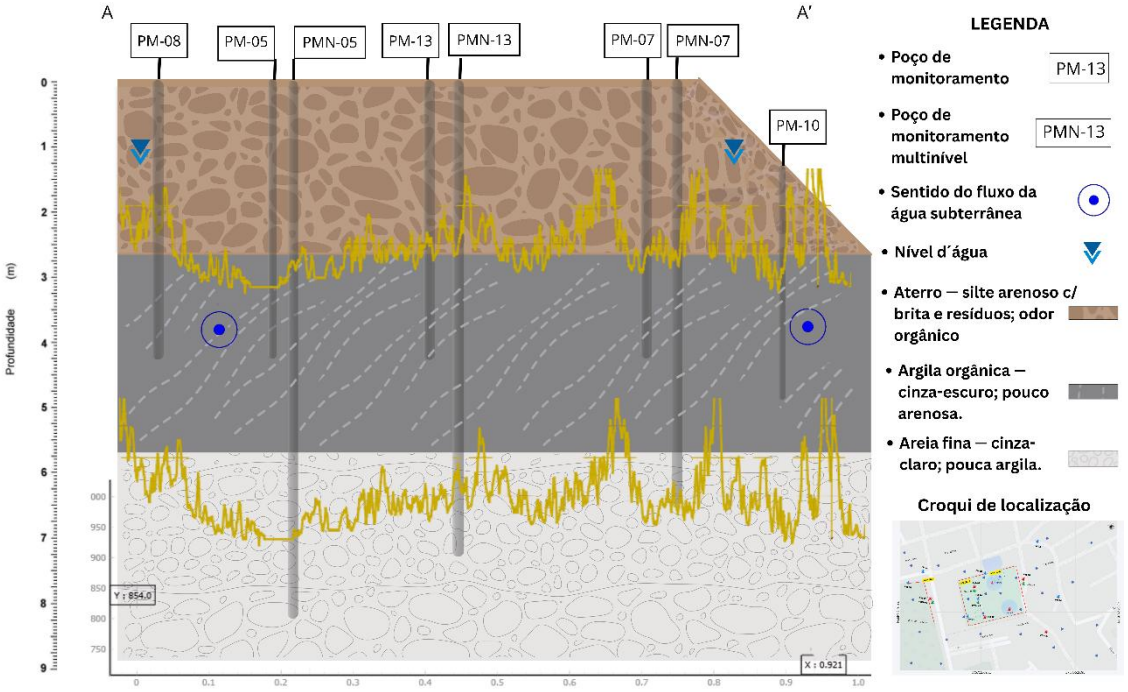
O mapa potenciométrico é uma das principais ferramentas utilizadas por geólogos e pesquisadores que buscam compreender a hidrogeologia de uma determinada área. Neste mapeamento, consideram-se as cotas das águas superficiais e subterrâneas, obtidas a partir da instalação de poços de monitoramento e da observação de afloramentos. Com base nessas informações, é possível identificar o sentido do fluxo subterrâneo e, consequentemente, estimar o comportamento de uma eventual pluma de contaminação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 BASE ESTRATIGRÁFICA E IMPLICAÇÕES PARA TRANSPORTE

As descrições de perfuração indicaram meio heterogêneo e compartimentado, com alternância entre materiais mais finos e mais retentivos e níveis mais arenosos e drenantes. Essa configuração é decisiva para interpretar o comportamento do sítio, porque controla simultaneamente o grau de saturação, a conectividade de poros, a retenção hídrica, a difusividade de gases e a mobilidade dos constituintes dissolvidos.

Figura 6 - Representação estratigráfica utilizada como base interpretativa



Fonte: Autora.

Em um sistema heterogêneo, a presença de compartimentos predominantemente arenosos favorece maior conectividade hidráulica e menor área superficial específica para sorção, o que contribui para maior expressão do sinal da pluma. Em contrapartida, incrementos localizados de finos e de material carbonáceo tendem a criar zonas mais retentivas, com microambientes hidrogeoquímicos próprios e variações abruptas em pequena escala. Essa heterogeneidade ajuda a explicar por que a investigação não revelou excedências expressivas em solo total, mas mostrou assinatura dissolvida mais consistente no aquífero raso.

3.2 SOLO DA ETAPA 1: EVIDÊNCIA SECUNDÁRIA FRENTE AO SINAL DISSOLVIDO

No recorte avaliado, os resultados de metais totais e TPH no solo não configuraram a principal evidência de concentrações acima dos valores de comparação adotados. Esse resultado não exclui a influência de resíduos e de materiais metálicos no sítio, mas indica que, nas profundidades e nos pontos amostrados, a matriz sólida não apresentou acúmulo suficientemente consistente para representar a principal expressão analítica do impacto.

Em áreas com histórico de disposição de resíduos, esse comportamento é tecnicamente plausível. A heterogeneidade espacial, a ocorrência de hotspots, a percolação preferencial e a mobilização em fase dissolvida podem reduzir a capacidade do solo de registrar, em concentração total, o mesmo sinal que se manifesta de forma mais integrada na água subterrânea. Assim, a ausência de concentrações elevadas no solo, frente aos critérios adotados, não deve ser interpretada como ausência

de impacto, mas como indicativo de que a principal resposta ambiental do sítio se expressa no compartimento dissolvido do aquífero raso.

3.3 ÁGUA SUBTERRÂNEA: A PRINCIPAL ASSINATURA DO SÍTIO

A água subterrânea apresentou a alteração hidrogeoquímica mais consistente do sítio na fração dissolvida, com concentrações acima dos valores de comparação adotados principalmente para bário e cobalto. Essa resposta é coerente com o papel integrador do aquífero raso em áreas impactadas por resíduos, uma vez que, ao longo do gradiente hidráulico, a água subterrânea concentra e integra os efeitos de lixiviação, dissolução e transporte, fornecendo uma leitura mais contínua e representativa do impacto ambiental do que a matriz solo no recorte analisado.

O estudo mostra que essa interpretação é sustentada pela própria organização dos resultados por unidades de exposição e pela representação espacial das plumas dissolvidas, nas quais o Ba apresentou distribuição mais pontual, enquanto o Co exibiu padrão mais abrangente na rede de monitoramento. Nesse contexto, a fração dissolvida não apenas indicou ocorrência de concentrações acima dos valores comparativos, mas também constituiu a base mais robusta para discutir mobilidade, continuidade espacial do impacto e priorização de setores críticos para monitoramento e refinamento do modelo conceitual do sítio

Tabela 1 - Síntese das principais excedências de metais dissolvidos por unidade de exposição

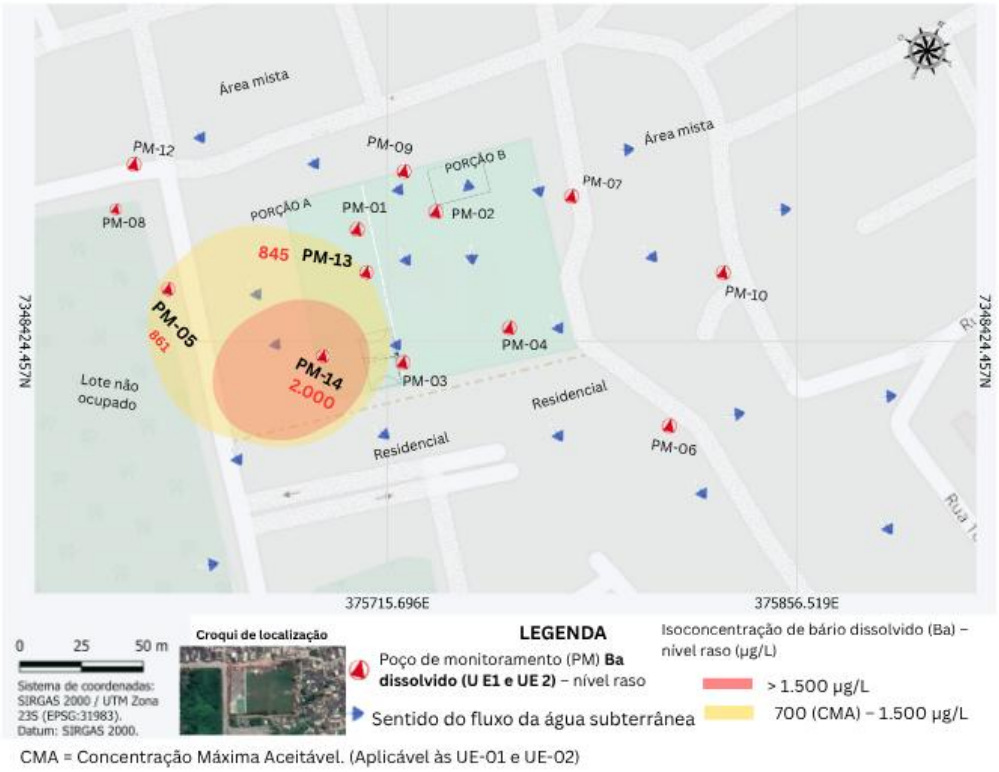
UE	Metal	Valor orientador adotado / CMA (µg/L)	Pontos com excedência em 2023
UE-01	Ba	700	PM-14 (2.000 µg/L) e PM-13 (845 µg/L)
UE-01	Co	12,1	PM-01 (381,1 µg/L), PM-13 (31,06 µg/L) e PM-14 (32,31 µg/L)
UE-02	Ba	700	PM-05 (861 µg/L)
UE-02	Co	6,46	PM-05 (61,54 µg/L), PM-08 (38,82 µg/L), PM-09 (84,28 µg/L) e PM-12 (35 µg/L)

Fonte: Autora.

A Tabela 1 evidencia que as unidades de exposição foram essenciais para organizar a interpretação. Na UE-01, associada ao cenário ocupacional/comercial, o cobalto apresentou maior impacto, com destaque para o valor encontrado no PM-01, enquanto o bário se concentrou sobretudo nos poços PM-14 e PM-13. Na UE-02, associada ao cenário residencial urbano, o bário permaneceu mais restrito, ao passo que o cobalto se distribuiu por múltiplos poços, ampliando a extensão do impacto em nível raso.

Esse contraste demonstra que as UEs ajudam a interpretar o sítio de duas formas complementares: como compartimentos de comparação frente aos valores orientadores e como compartimentos espaciais de leitura do modelo conceitual. Em outras palavras, elas permitem compreender não apenas onde foram observadas concentrações acima dos valores de comparação adotados, mas também em qual cenário de uso esse valor encontrado adquire maior relevância e como ele se distribui em relação às fontes, aos poços e ao fluxo subterrâneo. O bário dissolvido apresentou padrão espacial mais localizado, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Pluma de isoconcentração de bário dissolvido (Ba) em água subterrânea – nível raso (UE-01 e UE-02).



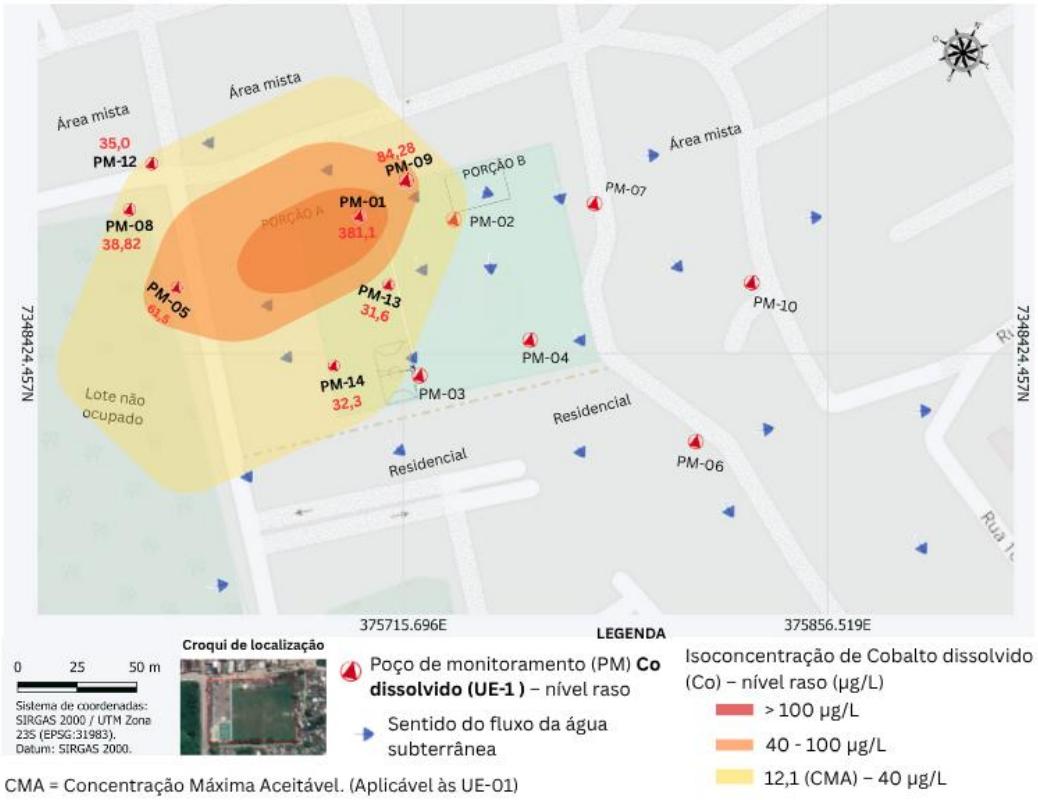
Fonte: Autora

A configuração espacial do Ba sugere um impacto mais localizado quando comparado ao Co, concentrando-se em torno de poucos pontos críticos (especialmente PM-14 e PM-13 na UE-01, e PM-05 na UE-02). Esse padrão é consistente com a leitura de que a pluma de Ba delimita parte da área-fonte e ao redor, com necessidade de maior número de pontos, para reduzir incertezas nos setores de borda (onde os limites permanecem inferidos).

Já na pluma de cobalto dissolvido (Co), na UE-01 (nível raso), apresentou concentrações acima da CMA (Concentração Máxima Aceitável), valor adotado como critério de comparação para a água subterrânea no cenário avaliado. Destaca-se o poço PM-01, com 381,1 µg/L, além dos poços PM-13, com 31,06 µg/L, e PM-14, com 32,31 µg/L, todos acima da CMA de 12,1 µg/L definida para a UE-01. Essa distribuição sustenta uma pluma com dimensão superior à do Ba, abrangendo porções mais

extensas do sítio, com limites ainda inferidos em múltiplos quadrantes, em função da geometria da rede de poços, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Pluma de isoconcentração de cobalto dissolvido (Co) em água subterrânea – nível raso (UE-01).



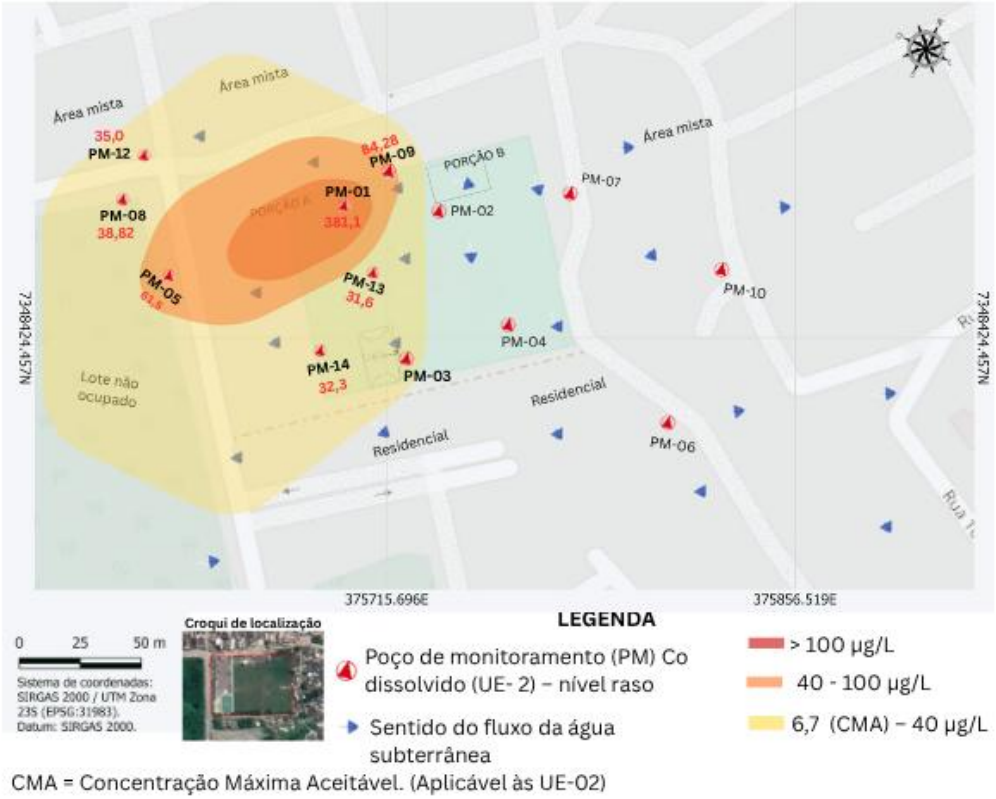
CMA = Concentração Máxima Aceitável. (Aplicável às UE-01)

Fonte: Autora.

A maior extensão da pluma de Co, quando comparada à de Ba, está associada à ocorrência de concentrações elevadas em diferentes pontos da rede de monitoramento, com destaque para o PM-01. Em termos de interpretação hidrogeoquímica, tal padrão de comportamento reforça a necessidade de avaliar a consistência espaço-temporal do Co dissolvido na rede (monitoramento contínuo) e de discutir possíveis mecanismos de manutenção do metal em solução (por exemplo, condições redox e interação água-matriz), uma vez que se trata do composto que mais contribui para a extensão do impacto na UE-01.

Porém, na pluma de cobalto dissolvido (Co) nas UE-02 (nível raso), o Co dissolvido excede a CMA de 6,46 µg/L em múltiplos poços em 2023 (PM-05, PM-08, PM-09 e PM-12), com valores que alcançam 84,28 µg/L (PM-09) e 61,54 µg/L (PM-05). A pluma resultante tende a apresentar grandes dimensões em comparação ao Ba, com continuidade espacial mais ampla e limites inferidos em setores periféricos, refletindo a distribuição mais dispersa das concentrações de Co dissolvido acima da CMA no nível raso.

Figura 9 - Pluma de isoconcentração de cobalto dissolvido (Co) em água subterrânea – nível raso (UE-02).



CMA = Concentração Máxima Aceitável. (Aplicável às UE-02)

Fonte: Autora.

A pluma de Co na UE-02, por sua abrangência e pela presença de diversos pontos com concentrações acima do CMA, representa o principal elemento para discussão de risco e gerenciamento do impacto no cenário residencial urbano. Além disso, a comparação entre campanhas indica que, embora alguns poços reduzam (ex.: PM-05), outros podem intensificar ou passar a apresentar concentrações acima da CMA (ex.: PM-08 e PM-09), reforçando a necessidade de acompanhamento sistemático e de refinamento do delineamento espacial em áreas onde a pluma permanece inferida.

Por fim, os dados de água subterrânea (Etapa 1) apontam contaminação inorgânica predominantemente na fase dissolvida para Ba e Co, com comportamento espacial distinto: Ba mais concentrado/localizado e Co mais abrangente e disperso, sustentando as plumas apresentadas e justificando a ênfase interpretativa na separação por UE-01 e UE-02 e no nível raso do aquífero.

3.4 METANO EM POÇOS DE VAPOR: TRIAGEM DE RISCO COM LIMITAÇÃO DE COBERTURA

O monitoramento de vapores no meio subsuperficial constitui uma linha de evidência complementar no gerenciamento de áreas com histórico de disposição de resíduos, pois permite verificar a presença de gás metano (CH_4), oriundo de processo bioquímico de degradação da matéria orgânica, e discutir, de forma objetiva, seu potencial de risco associado à inflamabilidade/explosividade. A interpretação, nesse contexto, baseia-se na comparação das leituras

com o Limite Inferior de Explosividade (LIE) do metano, reconhecido como 5% (v/v) no ar, a partir do qual a mistura passa a apresentar condição potencialmente inflamável (faixa típica até 15%). Assim, valores inferiores a 5% (v/v) caracterizam ausência de condição explosiva por insuficiência de combustível na mistura gasosa.

As medições foram efetuadas nos poços operacionais, registrando-se as concentrações de metano e parâmetros associados ao potencial de explosividade, consolidando-se os resultados na Tabela 2.

Tabela 1 - Síntese das medições de metano em poços de vapor.

Poço	HEX (% LEL)	HEX (% LEL ME)	Medição de metano (%) – LIE	Risco de explosão (5–15%)	Observaç ões
PV-01	–	–	–	–	Obstruído
PV-02	0%	0%	0%	Não	–
PV-03	0%	0%	0%	Não	–
PV-04	3%	2%	1%	Não	–
PV-05	–	–	–	–	Obstruído
PV-06	–	–	–	–	Obstruído
PV-07	–	–	–	–	Obstruído
PV-08	0%	0%	0%	Não	–

Nota: HEX = hexano; LEL/LIE = Lower Explosive Limit (Limite Inferior de Explosividade).
Fonte: Autora.

Embora os resultados não indiquem condição explosiva na janela temporal avaliada, o monitoramento de vapores permanece relevante no modelo conceitual do sítio, uma vez que a geração e a migração de gases dependem da disponibilidade de matéria orgânica, do teor de umidade, das condições redox locais e da conectividade do meio poroso. Assim, a interpretação mais adequada é a de ausência de evidência de risco explosivo no período monitorado, e não de descarte definitivo dessa hipótese para toda a área.

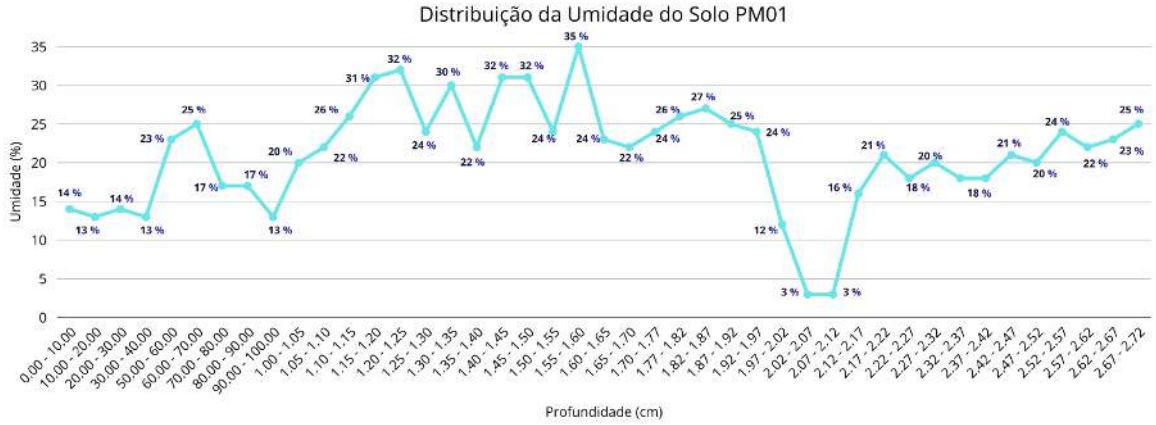
3.5 ENSAIOS DE BANCADA: CONTROLES FÍSICO-QUÍMICOS DO MEIO POROSO E SUA RELAÇÃO COM A FASE DISSOLVIDA

Os ensaios de bancada evidenciaram meio poroso heterogêneo e predominantemente arenoso, com oscilações abruptas de umidade e forte variabilidade de carbono total. Essas propriedades são fundamentais para explicar o comportamento do sítio: um material com baixa fração de finos e maior conectividade de poros tende a favorecer infiltração e transporte em fase dissolvida, enquanto lentes

localizadas com maior umidade ou maior carbono atuam como compartimentos retentivos e criam microambientes geoquímicos distintos.

No PM-01, a umidade gravimétrica apresenta variação moderada, com oscilações suficientes para indicar compartimentação hidráulica em pequena escala (figura 10)

Figura 10 - Distribuição da umidade gravimétrica do solo ao longo do perfil – PM-01.

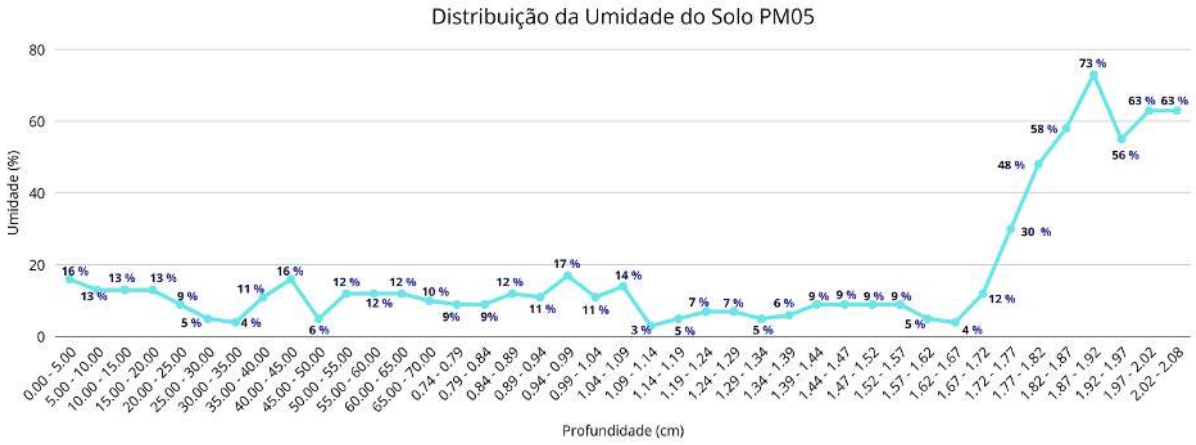


Fonte: Autora.

No PM-01, a umidade gravimétrica apresentou variação de 2,8% a 35,5%, totalizando amplitude de 32,7 pontos percentuais ao longo do perfil. Os máximos ocorreram em trechos intermediários, enquanto os menores valores se concentraram no pacote superficial e em intervalos específicos em profundidade. Essa distribuição indica contraste hidráulico relevante em pequena escala e sustenta a interpretação de heterogeneidade vertical do meio poroso, com implicações diretas para retenção de água, conectividade de poros e transporte no meio não saturado.

No PM-05, representado na figura 11, a resposta é mais contrastante, com pico acentuado na porção inferior do perfil.

Figura 11 - Distribuição da umidade gravimétrica do solo ao longo do perfil – PM-05



Fonte: Autora.

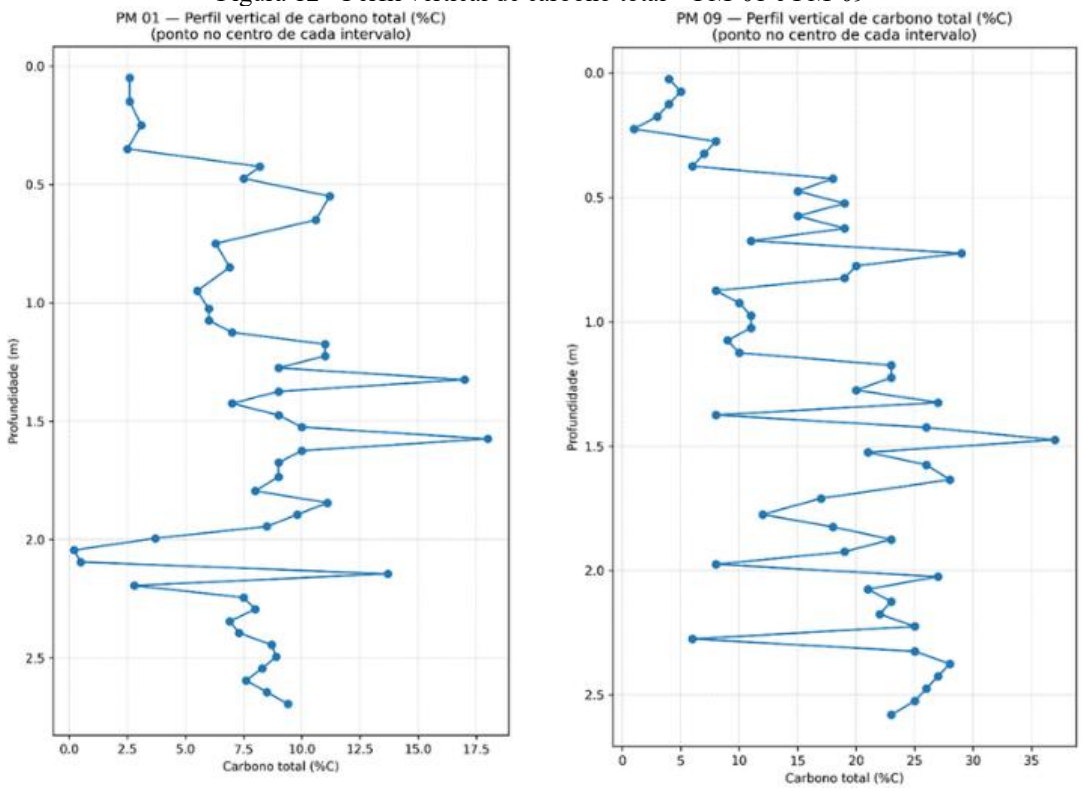
No PM-05, a umidade gravimétrica variou de 3,3% a 72,8%, com média de 17,4%, evidenciando forte contraste vertical. Até cerca de 1,67 m, predominam valores baixos a moderados, em geral entre 4% e 17%; a partir de 1,72 m, ocorre elevação abrupta, com aumento de 12% para 30%, seguido por valores de 48%, 58% e pico de 72,8% em torno de 1,90 m, mantendo-se elevada até 2,08 m. Esse comportamento indica a presença de um horizonte inferior mais retentivo, com implicações diretas para a compartimentação hidráulica do perfil.

Em continuidade à análise da umidade gravimétrica, os perfis de carbono total foram utilizados para verificar se a heterogeneidade hídrica observada também correspondia a mudanças composicionais ao longo da profundidade. Para isso, foram destacados os poços PM-01 e PM-09, por representarem dois comportamentos contrastantes e didáticos dentro do conjunto analisado (figura 12).

No PM-01, o carbono total variou de 0,2% a 18,0%, com valores mais baixos na porção superficial, incremento entre 0,40 e 0,70 m (8,2–11,2%) e novo patamar enriquecido entre 1,15 e 1,60 m, com máximos de 17–18%. Esse comportamento acompanha a variabilidade da umidade no mesmo perfil, que variou de 2,8% a 35,5%, indicando que mudanças composicionais e hídricas ocorrem em curtas distâncias verticais.

O PM-09 foi destacado como contraste por apresentar compartimentação mais intensa, com carbono total entre 1% e 37%, incluindo picos de 29% em 0,70–0,75 m e máximo de 37% em 1,45–1,50 m. Nesse mesmo ponto, a umidade gravimétrica variou de 13,0% a 73,3%, reforçando a presença de horizontes mais retentivos e composicionalmente distintos.

Figura 12 - Perfil vertical de carbono total – PM-01 e PM-09



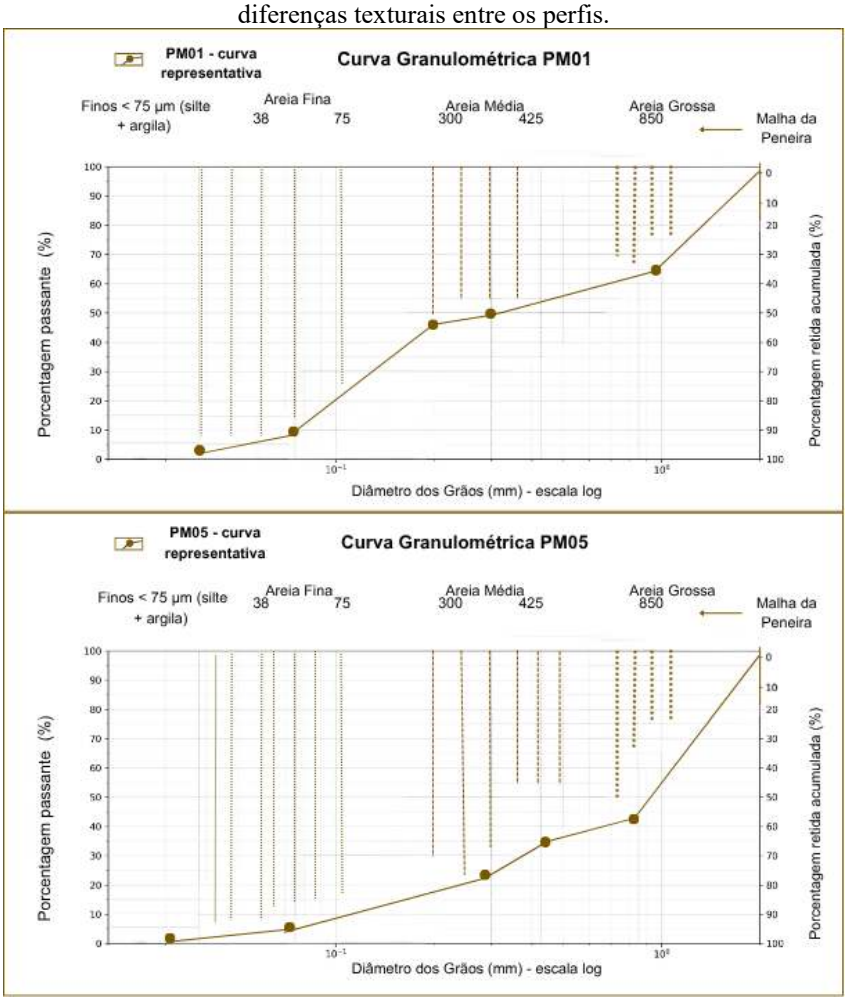
Fonte: Autora.

A apresentação desses dois poços, portanto, busca sintetizar a lógica observada na Etapa 2: o PM-01 representa um perfil heterogêneo com picos moderados, enquanto o PM-09 evidencia transições mais abruptas e amplitudes mais elevadas. Em conjunto, ambos mostram que o meio não saturado é compartimentado e que essa compartimentação pode alterar, em pequena escala vertical, a retenção hídrica, a conectividade de poros e a interação solo-solução.

Como continuidade da análise, a granulometria é apresentada para complementar a interpretação do meio.

A apresentação dos poços PM-01 e PM-05, evidenciado na figura 13, foi selecionada por seu caráter representativo dos extremos texturais identificados na área de estudo. O PM-01 representa um perfil com maior predominância de frações arenosas mais grossas e comportamento mais drenante, enquanto o PM-05 caracteriza um meio com maior influência de frações finas e maior capacidade de retenção. Dessa forma, ambos apontam os principais padrões granulométricos observados, permitindo evidenciar a variabilidade do meio sem necessidade de apresentação exaustiva de todos os poços.

Figura 13 - Distribuição percentual acumulada em função do diâmetro dos grãos (escala logarítmica), evidenciando diferenças texturais entre os perfis.



Fonte: Autora.

As curvas granulométricas dos poços PM-01 e PM-05 sinalizam diferenças texturais relevantes no meio não saturado. O PM-01 apresenta distribuição mais bem graduada, com cerca de 45–50% passante na faixa de areia média (≈0,3–0,5 mm) e 65–70% na fração de areia grossa, indicando maior conectividade de poros e menor retenção hídrica. Já o PM-05 apresenta maior participação de finos, com apenas 25–35% na faixa de areia média e cerca de 40–45% na fração grossa, sugerindo maior retenção hídrica e menor permeabilidade relativa. Esse contraste reforça a heterogeneidade do meio e indica controle granulométrico relevante sobre a mobilidade de solutos e a dinâmica de fluxo.

4 CONCLUSÕES

O solo não se configurou como principal linha de evidência de excedências para VOC, SVOC, metais totais e TPH no recorte avaliado, comportamento consistente com a elevada heterogeneidade de áreas com disposição irregular de resíduos, nas quais a distribuição de contaminantes tende a ocorrer de forma pontual e descontínua (KJELDSEN et al., 2002; UNEP, 2024).

Em contraste, a água subterrânea apresentou assinatura ambiental mais consistente na fração dissolvida, corroborando estudos que indicam maior integração espacial do sinal hidrogeoquímico em meios heterogêneos (FREEZE; CHERRY, 1979; APPELO; POSTMA, 2018). O bário exibiu padrão mais localizado, com núcleos principais em PM-14, PM-13 e PM-05, enquanto o cobalto apresentou distribuição mais abrangente, atuando como principal marcador da extensão espacial do impacto, comportamento associado à maior mobilidade relativa em condições geoquímicas específicas (ALLOWAY, 2019; ATSDR, 2024).

As unidades de exposição mostraram-se fundamentais para estruturar a interpretação técnica, ao integrar cenários de uso, valores orientadores e distribuição espacial das plumas, reforçando a coerência entre avaliação de risco e modelo conceitual, conforme recomendado em abordagens baseadas em risco (CETESB, 2022; IAEA, 2024).

As leituras de metano permaneceram abaixo do limite inferior de explosividade, em concordância com estudos que apontam variabilidade temporal significativa na geração e migração de gases em áreas com resíduos (KJELDSEN et al., 2002; IPCC, 2019). Ainda assim, a limitação de cobertura espacial recomenda cautela e continuidade do monitoramento.

Os ensaios de bancada confirmaram meio poroso heterogêneo, compartimentado e predominantemente arenoso, com baixa fração de finos, o que favorece a percolação e reduz a retenção, explicando a maior expressão do sinal ambiental na fase dissolvida, padrão amplamente descrito na literatura para meios granulares (HILLEL, 2004; EMBRAPA, 2018).

Em conjunto, os resultados indicam que o refinamento do modelo conceitual deve priorizar a integração entre estratigrafia, propriedades físico-químicas do solo, unidades de exposição e plumas dissolvidas, com destaque para o cobalto como principal elemento de delimitação espacial do impacto,

consolidando uma abordagem multievidência alinhada às práticas internacionais de investigação de áreas contaminadas (CETESB, 2022).

REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 4. ed. Cham: Springer, 2019.

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. Geochemistry, groundwater and pollution. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

ATSDR. Toxicological profile for cobalt. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2024.

CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2022.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

HILLEL, D. Introduction to environmental soil physics. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.

IAEA. Integrated approaches for the management of environmental liabilities. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2024.

IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.

KJELDSEN, P. et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.

UNEP. Global waste management outlook 2024: beyond an age of waste. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2024.