

Artigo:

**USO DO SOLO COMO BARREIRA AMBIENTAL EM ATERROS
SANITÁRIOS NO SEMIÁRIDO: ANÁLISE INTEGRADA A PARTIR DO
MONITORAMENTO AMBIENTAL DA CENTRAL DE TRATAMENTO DE
RESÍDUOS DE SOBRAL**

*Use of soil as an environmental barrier in landfills in the semi-arid region: An
integrated analysis based on environmental monitoring at the Sobral waste
treatment facility*

*El uso del suelo como barrera medioambiental en los vertederos de residuos del
semiárido: análisis integrado a partir del seguimiento medioambiental de la planta
de tratamiento de residuos de Sobral*

Data de recebimento: 04/05/2026

Data de publicação: 30/07/2026

Luiz Carlos Marques Costa¹
Simone Ferreira Diniz²
Joanatha Vidal Gomes³

RESUMO

Este estudo analisou a dinâmica ambiental associada ao uso do solo como barreira em aterros sanitários no semiárido, a partir de uma abordagem integrada dos dados de monitoramento de solo, águas superficiais e águas subterrâneas da Central de Tratamento de Resíduos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS). A metodologia baseou-se na análise de série histórica (2020–2026), considerando parâmetros físico-químicos e sua comparação com os limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA nº 420/2009, nº 396/2008 e nº 357/2005. Os resultados indicaram que o solo e o subsolo mantiveram-se em conformidade normativa ao longo do período, evidenciando sua capacidade de retenção geoquímica. Em contrapartida, as águas subterrâneas apresentaram elevação significativa de sólidos dissolvidos totais, cloretos e nitratos, indicando transporte subsuperficial de contaminantes. As águas superficiais apresentaram comportamento heterogêneo, com maior criticidade em pontos a jusante. A análise espacial evidenciou a influência de passivos ambientais localizados em cotas altimétricas superiores, incluindo o antigo lixão de Sobral e um curtiúme, que contribuem para a dinâmica de contaminação observada. Adicionalmente, a limitação de dados em parte dos piezômetros, associada à baixa recarga hídrica do semiárido, revelou a heterogeneidade do sistema aquífero. Conclui-se que o solo atua como barreira ambiental de eficiência parcial, sendo a água subterrânea o compartimento mais vulnerável, e que a interpretação dos impactos deve considerar a interação entre fatores naturais, operacionais e passivos preexistentes.

Palavras-chave: Uso do solo. Vulnerabilidade ambiental. Águas subterrâneas.

¹Doutorando em Geografia, Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA). E-mail: luizcarlosmc@hotmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7341-2055>

²Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA).
E-mail: difersim@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8359-5553>

³ Secretário Executivo do Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral – CGIRS-RMS. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9071-3191>

ABSTRACT

This study analyzed the environmental dynamics associated with the use of soil as a barrier in landfills in the semi-arid region, using an integrated approach that combined soil, surface water, and groundwater monitoring data from the Waste Treatment Plant of the Sobral Metropolitan Region (CGIRS-RMS). The methodology was based on the analysis of time series data (2020–2026), considering physicochemical parameters and their comparison with the limits established by CONAMA Resolutions No. 420/2009, No. 396/2008, and No. 357/2005. The results indicated that the soil and subsoil remained in regulatory compliance throughout the period, demonstrating their geochemical retention capacity. In contrast, groundwater showed a significant increase in total dissolved solids, chlorides, and nitrates, indicating subsurface transport of contaminants. Surface waters exhibited heterogeneous behavior, with greater criticality at downstream points. Spatial analysis highlighted the influence of environmental liabilities located at higher elevations, including the former Sobral landfill and a tannery, which contribute to the observed contamination dynamics. Additionally, the limited data from some of the piezometers, combined with the low groundwater recharge typical of the semi-arid region, revealed the heterogeneity of the aquifer system. It is concluded that the soil acts as a partially effective environmental barrier, with groundwater being the most vulnerable compartment, and that the interpretation of impacts must consider the interaction between natural, operational, and pre-existing passive factors.

Keywords: Land use. Environmental vulnerability. Groundwater.

RESUMEN

Este estudio analizó la dinámica ambiental asociada al uso del suelo como barrera en los vertederos de residuos en la región semiárida, a partir de un enfoque integrado de los datos de seguimiento del suelo, las aguas superficiales y las aguas subterráneas de la Central de Tratamiento de Residuos de la Región Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS). La metodología se basó en el análisis de series históricas (2020–2026), teniendo en cuenta parámetros físico-químicos y su comparación con los límites establecidos por las Resoluciones CONAMA n.º 420/2009, n.º 396/2008 y n.º 357/2005. Los resultados indicaron que el suelo y el subsuelo se mantuvieron en conformidad normativa a lo largo del período, lo que pone de manifiesto su capacidad de retención geoquímica. Por el contrario, las aguas subterráneas presentaron un aumento significativo de sólidos disueltos totales, cloruros y nitratos, lo que indica el transporte subsuperficial de contaminantes. Las aguas superficiales presentaron un comportamiento heterogéneo, con mayor gravedad en puntos aguas abajo. El análisis espacial puso de manifiesto la influencia de pasivos ambientales situados en cotas altimétricas superiores, incluyendo el antiguo vertedero de Sobral y una curtiduría, que contribuyen a la dinámica de contaminación observada. Además, la escasez de datos en parte de los piezómetros, unida a la escasa recarga hídrica del semiárido, reveló la heterogeneidad del sistema acuífero. Se concluye que el suelo actúa como una barrera ambiental de eficacia parcial, siendo el agua subterránea el compartimento más vulnerable, y que la interpretación de los impactos debe tener en cuenta la interacción entre factores naturales, operativos y pasivos preexistentes.

Palabras clave: Uso del suelo. Vulnerabilidad ambiental. Aguas subterráneas.

INTRODUÇÃO

A intensificação da geração de resíduos sólidos urbanos, associada ao crescimento populacional e à expansão das atividades econômicas, tem ampliado a demanda por soluções ambientalmente adequadas para sua disposição final. No Brasil, os aterros sanitários constituem a principal tecnologia empregada para esse fim, sendo reconhecidos como alternativa viável do ponto de vista técnico e normativo, desde que implantados e operados conforme critérios estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes.

Em que pese o entendimento anterior, a eficiência desses empreendimentos está diretamente condicionada às características do meio físico em que se inserem, com destaque para o solo, que exerce papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais decorrentes da disposição de resíduos. Nesse contexto, o solo atua como uma barreira natural, desempenhando funções de retenção, adsorção e transformação de contaminantes, especialmente aqueles oriundos do material lixiviado gerado durante a operação dos aterros sanitários. Essa capacidade de proteção, contudo,

213

USO DO SOLO COMO BARREIRA AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS NO SEMIÁRIDO: ANÁLISE INTEGRADA A PARTIR DO MONITORAMENTO AMBIENTAL DA CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SOBRAL

não é homogênea nem ilimitada, sendo influenciada por atributos físico-químicos, como textura, estrutura, porosidade, capacidade de troca catiônica e condições de umidade.

Atenta-se que em regiões semiáridas, tais interações tornam-se ainda mais complexas. Caracterizadas por baixos índices pluviométricos, elevada evapotranspiração, irregularidade na distribuição das chuvas e presença de sistemas de drenagem intermitentes, essas áreas apresentam limitações naturais à dispersão e diluição de contaminantes. De acordo com Falcão Sobrinho (2006), o semiárido nordestino configura-se como um ambiente de elevada sensibilidade geoambiental, no qual alterações antrópicas podem resultar em impactos significativos sobre os sistemas naturais. Nesse cenário, a dinâmica do solo e da água assume papel estratégico na manutenção do equilíbrio ambiental.

Convém salientar ainda que, a baixa recarga dos aquíferos e a tendência à concentração de sais e substâncias dissolvidas tornam os recursos hídricos subterrâneos particularmente vulneráveis à contaminação. Conforme Caracristi (2013), a variabilidade climática e a sazonalidade hídrica do semiárido condicionam os processos de infiltração, percolação e transporte de poluentes, influenciando diretamente o comportamento dos contaminantes no ambiente. Dessa forma, a avaliação da eficiência do solo como barreira ambiental em aterros sanitários requer uma abordagem integrada, que considere simultaneamente os compartimentos edáfico, hídrico e operacional.

No horizonte dessa reflexão, a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS), localizada no norte do estado do Ceará, constitui um importante estudo de caso, por estar inserida em ambiente semiárido e operar como sistema integrado de gestão de resíduos para diversos municípios da região. A análise do desempenho ambiental desse empreendimento, especialmente no que se refere à qualidade do solo, subsolo e recursos hídricos associados, permite compreender de forma mais precisa as interações entre uso do solo e processos de contaminação em condições semiáridas.

No campo de estudo em tela, o monitoramento ambiental contínuo emerge como ferramenta essencial para a avaliação do comportamento dos sistemas naturais frente às pressões antrópicas, possibilitando a identificação de alterações na qualidade ambiental e a verificação da eficácia das medidas de controle adotadas. Segundo Diniz (2012), a análise integrada de indicadores ambientais constitui elemento fundamental para a compreensão dos processos de degradação e para o desenvolvimento de estratégias de gestão mais eficientes e sustentáveis.

À luz do exposto, o presente estudo tem como objetivo analisar o uso do solo como barreira ambiental em aterros sanitários no semiárido, a partir de uma abordagem integrada baseada no monitoramento ambiental da Central de Tratamento de Resíduos de Sobral. Busca-se avaliar a

eficiência do solo na contenção de contaminantes, discutir a vulnerabilidade dos recursos hídricos associados e contribuir para o aprimoramento das práticas de gestão ambiental em regiões semiáridas.

O SOLO COMO COMPONENTE ESTRATÉGICO DA DINÂMICA AMBIENTAL

O solo constitui um sistema natural dinâmico, resultante da interação entre fatores como clima, relevo, material de origem, organismos e tempo, sendo responsável por funções essenciais à manutenção do equilíbrio ambiental, como a ciclagem de nutrientes, infiltração de água e retenção de contaminantes (Lepsch, 2011). Em áreas submetidas à intensa ação antrópica, como os aterros sanitários, essa funcionalidade torna-se ainda mais relevante, uma vez que o solo passa a atuar como elemento de contenção entre a fonte de poluição e os demais compartimentos ambientais.

A abordagem sistêmica da geografia física reforça que os elementos naturais não podem ser analisados de forma isolada, mas sim como partes interdependentes de um sistema ambiental complexo (Guerra; Cunha, 2008).

No cenário analisado, a capacidade do solo de atenuar impactos ambientais depende não apenas de suas propriedades intrínsecas, mas também das condições geomorfológicas, hidrológicas e climáticas da paisagem em que se insere.

No contexto do semiárido nordestino, Falcão Sobrinho (2006) destaca que o solo representa um dos componentes mais sensíveis da organização espacial, pois responde rapidamente às alterações provocadas pelo uso inadequado e pela intensificação das atividades humanas. Essa sensibilidade reforça a necessidade de estudos que avaliem sua capacidade de suporte diante de pressões ambientais específicas, como a disposição de resíduos sólidos.

O SOLO COMO BARREIRA AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS

Nos aterros sanitários, o solo desempenha papel fundamental como barreira ambiental, atuando na retenção e transformação de contaminantes oriundos do processo de lixiviação. Essa função está relacionada a processos físico-químicos como adsorção, troca iônica, precipitação e degradação de compostos orgânicos (EMBRAPA, 2018). A eficiência desses processos depende diretamente das características do solo, como granulometria, teor de argila, matéria orgânica, pH e capacidade de troca catiônica.

De acordo com Ker et al. (2012), solos com maior teor de argila e maior capacidade de troca catiônica tendem a apresentar maior eficiência na retenção de metais pesados e outros

contaminantes. Por outro lado, solos rasos, pouco desenvolvidos ou excessivamente drenados apresentam menor capacidade de retenção, favorecendo a percolação de poluentes.

Do ponto de vista normativo, a Resolução CONAMA nº 420/2009 estabelece valores orientadores de qualidade do solo, que permitem avaliar se o ambiente mantém condições adequadas de proteção ambiental (BRASIL, 2009). Esses parâmetros são amplamente utilizados como referência em estudos de monitoramento e avaliação de áreas potencialmente contaminadas.

Não obstante, conforme ressalta Jucá (2014), a presença de valores dentro dos limites legais não implica necessariamente ausência de risco ambiental, sendo fundamental analisar o comportamento dinâmico dos contaminantes e sua possível migração para outros compartimentos, como as águas subterrâneas.

SEMIÁRIDO: LIMITAÇÕES AMBIENTAIS E VULNERABILIDADE GEOECOLÓGICA

O semiárido brasileiro apresenta características ambientais que condicionam fortemente os processos de uso e ocupação do solo. Entre essas características destacam-se a baixa pluviosidade, a irregularidade das chuvas, a elevada evapotranspiração e a presença de sistemas de drenagem intermitentes (Falcão Sobrinho, 2006).

Por seu turno, Caracristi (2013) ressalta que os sistemas ambientais do semiárido devem ser compreendidos a partir de sua dinâmica integrada, na qual fatores climáticos, hidrológicos e geomorfológicos interagem de forma complexa. Essa dinâmica influencia diretamente os processos de infiltração, percolação e transporte de contaminantes.

Em acréscimo ao exposto, a baixa recarga dos aquíferos e a elevada concentração de sais dissolvidos tornam os recursos hídricos subterrâneos particularmente vulneráveis à contaminação. Segundo Cortez (2010), a hidrologia em regiões semiáridas apresenta forte dependência da sazonalidade climática, o que limita a capacidade de diluição de poluentes e favorece sua concentração.

Diniz (2012) complementa essa análise ao afirmar que a qualidade ambiental em regiões semiáridas está diretamente relacionada ao uso do solo e à capacidade dos sistemas naturais de absorver impactos antrópicos, sendo o monitoramento ambiental uma ferramenta essencial para compreender esses processos.

ATERROS SANITÁRIOS E RISCO AMBIENTAL

Os aterros sanitários são estruturas projetadas para minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição de resíduos sólidos, por meio de sistemas de impermeabilização, drenagem de lixiviados e monitoramento ambiental (ABNT, 1992). No entanto, mesmo com esses mecanismos de controle, permanece a possibilidade de ocorrência de impactos ambientais, especialmente quando há falhas operacionais ou limitações naturais do meio físico.

O conceito de risco ambiental envolve a interação entre a fonte de perigo, a vulnerabilidade do meio e a exposição dos sistemas naturais (Leff, 2001). No caso dos aterros sanitários, o principal risco está associado à geração de lixiviado e sua possível infiltração no solo e contaminação das águas subterrâneas.

Estudos indicam que os primeiros sinais de contaminação geralmente são detectados nas águas subterrâneas, por meio do aumento de parâmetros como nitrato, cloreto e sólidos dissolvidos totais (Jucá, 2014). Isso ocorre porque, embora o solo atue como barreira inicial, sua capacidade de retenção pode ser limitada, especialmente em ambientes semiáridos.

MONITORAMENTO AMBIENTAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE GEOAMBIENTAL

O monitoramento ambiental consiste em um conjunto de procedimentos sistemáticos destinados a acompanhar a qualidade dos componentes naturais ao longo do tempo, permitindo identificar alterações, tendências e possíveis impactos ambientais (BRASIL, 2005). Em áreas de aterros sanitários, o monitoramento assume papel fundamental na avaliação da eficiência dos sistemas de controle e na detecção precoce de contaminação.

Consoante Diniz (2012), a análise integrada de indicadores ambientais é essencial para compreender os processos de degradação e subsidiar ações de gestão ambiental.

No caso do solo, o monitoramento permite verificar a manutenção de suas propriedades físico-químicas e sua capacidade de retenção de contaminantes. Já no monitoramento hídrico, os dados possibilitam identificar a migração de poluentes e avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos.

Essa abordagem integrada está alinhada à perspectiva sistêmica da geografia ambiental, que considera a interação entre os diferentes compartimentos naturais como elemento central para a compreensão dos problemas ambientais (Guerra; Cunha, 2008).

SUSTENTABILIDADE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

217

USO DO SOLO COMO BARREIRA AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS NO SEMIÁRIDO: ANÁLISE INTEGRADA A PARTIR DO MONITORAMENTO AMBIENTAL DA CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SOBRAL

A sustentabilidade da gestão de resíduos sólidos em regiões semiáridas depende da integração entre planejamento territorial, conhecimento geoambiental e monitoramento contínuo. Segundo Leff (2001), a gestão ambiental deve considerar os limites ecológicos dos sistemas naturais, evitando a sobrecarga e a degradação dos recursos.

Milton Santos (2006) destaca que o uso do território deve ser analisado a partir de suas funções e das relações entre técnica e natureza, sendo fundamental compreender como as infraestruturas, como os aterros sanitários, se inserem na dinâmica espacial.

No semiárido, essa discussão ganha maior relevância, uma vez que a capacidade de suporte dos sistemas naturais é limitada. Assim, a análise do solo como barreira ambiental não deve ser dissociada das condições territoriais e da gestão do empreendimento.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CTR-RMS), localizada no distrito de Jordão, no município de Sobral, no estado do Ceará. A área encontra-se inserida no domínio climático semiárido, caracterizado por baixos índices pluviométricos, elevada evapotranspiração e forte irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ano.

Do ponto de vista geomorfológico, o empreendimento está situado no sopé da Serra do Rosário, unidade de relevo associada ao conjunto de elevações residuais do noroeste cearense. Essa posição topográfica condiciona processos de escoamento superficial e subsuperficial, influenciando diretamente a dinâmica de infiltração, percolação e transporte de contaminantes no solo.

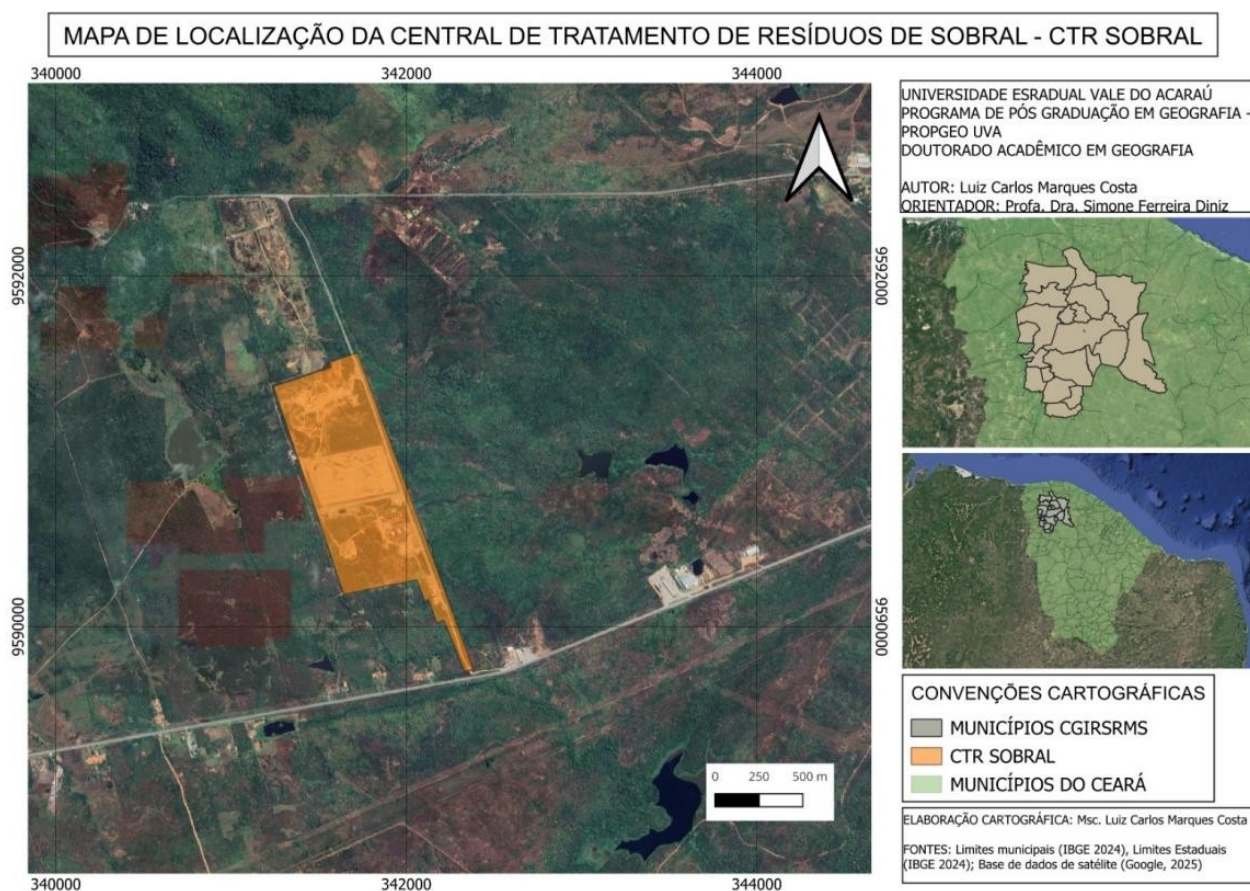
A área de estudo localiza-se nas proximidades da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra do Rosário, unidade de conservação de uso sustentável instituída com o objetivo de proteger os recursos naturais e disciplinar o uso e ocupação do território. Embora o empreendimento não esteja inserido formalmente nos limites da APA, sua proximidade espacial confere relevância ambiental adicional, uma vez que eventuais alterações nos compartimentos naturais — especialmente solo e recursos hídricos — podem gerar efeitos indiretos sobre áreas protegidas.

Sob o ponto de vista geológico, o sítio está inserido em uma depressão estrutural (vale geológico), caracterizada por relevo suavemente ondulado e materiais intemperizados, que podem apresentar variações na permeabilidade e na capacidade de retenção de contaminantes. Essa condição geológica influencia a dinâmica de fluxo subsuperficial e a vulnerabilidade dos aquíferos, sendo um fator determinante na análise da eficiência do solo como barreira ambiental.

A rede hidrográfica local apresenta caráter predominantemente intermitente, típica de regiões semiáridas, composta por canais temporários e reservatórios superficiais (açudes), que atuam como receptores da drenagem da área. Esses elementos são fundamentais para o monitoramento ambiental, permitindo avaliar possíveis influências da operação do aterro sanitário sobre os recursos hídricos superficiais.

A localização do empreendimento encontra-se representada na Figura 1, elaborada a partir de base cartográfica georreferenciada.

Mapa 01 – Mapa de localização da Central de Tratamento de Resíduos de Sobral (CE)



Fonte: Autor, 2026.

MATERIAL E MÉTODOS

Delineamento Da Pesquisa

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza descritiva, analítica e documental, baseada na interpretação de dados secundários provenientes de relatórios de monitoramento ambiental realizados no âmbito da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS).

Os dados utilizados correspondem ao período compreendido entre os anos de 2020 e 2026, contemplando informações relativas aos compartimentos ambientais:

- Solo e subsolo
- Águas subterrâneas
- Águas superficiais

A análise foi conduzida sob uma abordagem integrada, considerando a interação entre os diferentes elementos do sistema ambiental, conforme os pressupostos da Teoria Geral dos Sistemas, que compreende o ambiente como um conjunto de componentes interdependentes, cujas dinâmicas não podem ser analisadas de forma isolada (Bertalanffy, 1977; Guerra; Cunha, 2008).

Fonte Dos Dados E Procedimentos De Monitoramento

Os dados analisados foram obtidos a partir de relatórios técnicos elaborados por empresas especializadas contratadas pelo CGIRS-RMS, responsáveis pela execução do monitoramento ambiental do empreendimento, em atendimento às condicionantes estabelecidas pelos órgãos ambientais competentes.

Dessa forma, a definição dos pontos de coleta, bem como os procedimentos de amostragem seguiram critérios técnicos previamente estabelecidos por essas empresas, considerando:

Direção de fluxo hídrico superficial e subterrâneo

Localização a montante e jusante do empreendimento

Proximidade de áreas potencialmente influenciadas pela operação do aterro

Condições geomorfológicas e hidrológicas locais

No monitoramento de águas subterrâneas, os dados foram obtidos por meio de uma rede de poços piezométricos distribuídos no perímetro do empreendimento, conforme (figura 01, a seguir)

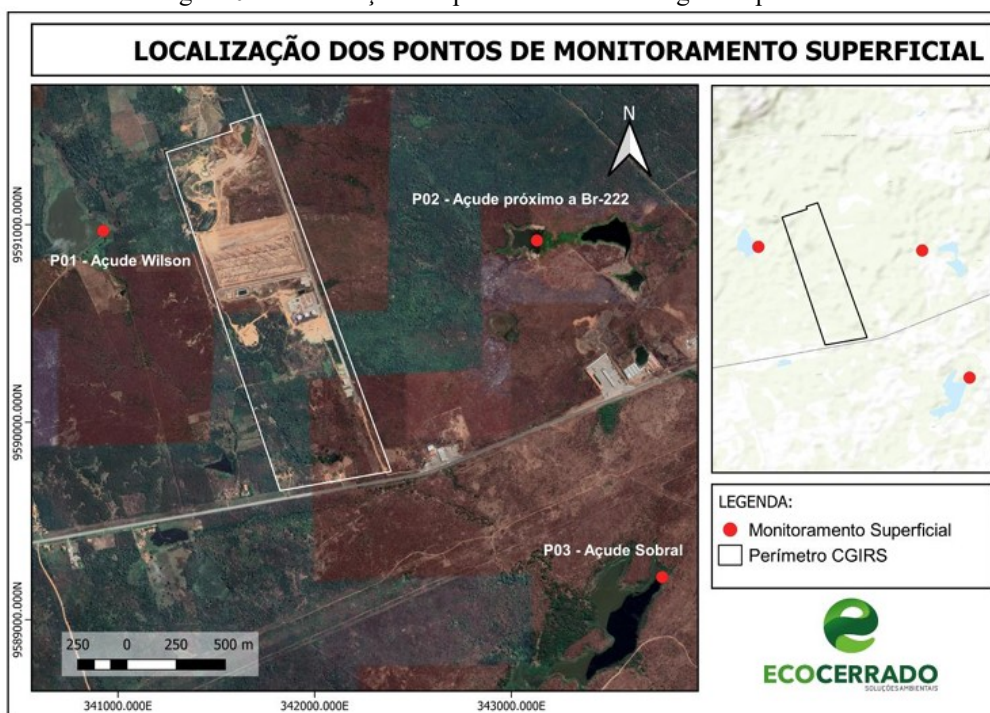
Figura 01: Localização dos Poços Piezométricos (Pontos de Coleta de águas subterrâneas)



Fonte: ECOSERRADO, 2026.

Para as águas superficiais, foram considerados pontos localizados em reservatórios e canais de drenagem associados ao sistema hídrico local, fora do perímetro da CTR, mas em uma área de abrangência direta, conforme figura 02.

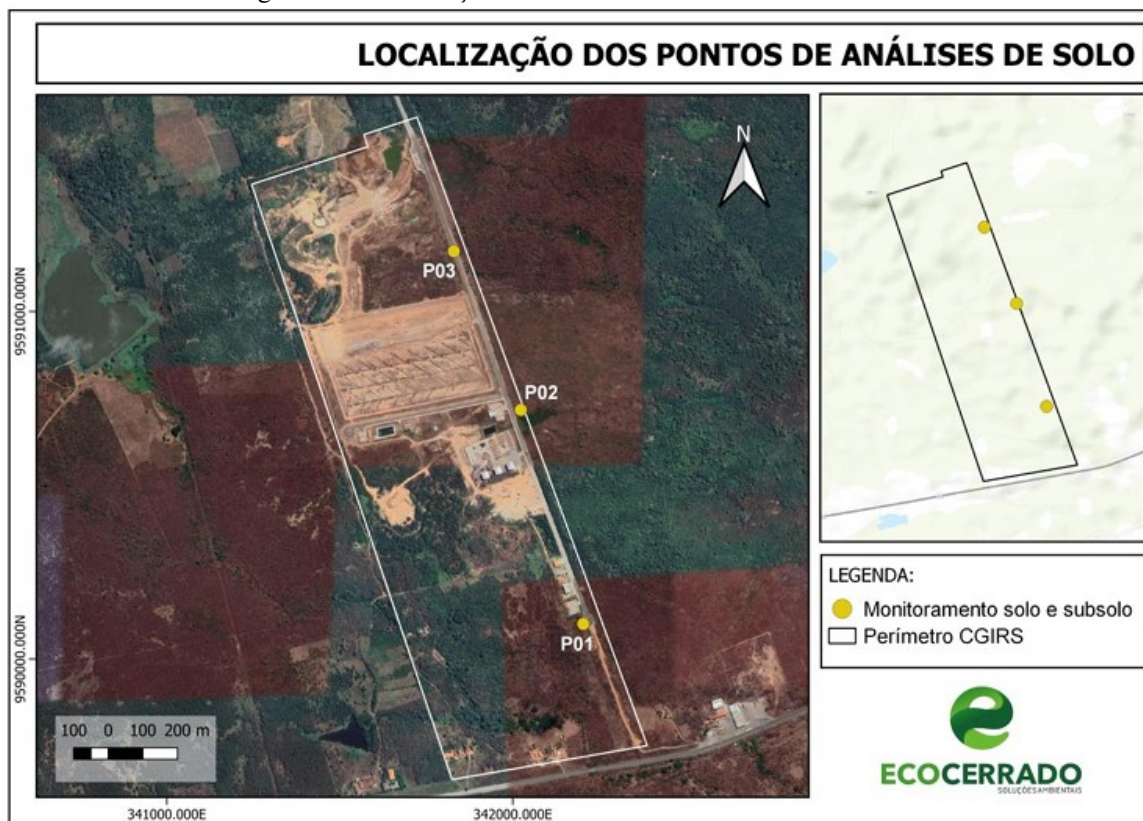
Figura 02: Localização dos pontos de coleta de águas superficiais



Fonte: ECOSERRADO, 2026.

Já o monitoramento do solo e subsolo foi realizado em pontos estratégicos, conforme figura 03, foram definidos com base no potencial de influência da disposição de resíduos.

Figura 03 – Localização dos Pontos de Coleta de Solo e Subsolo



Fonte: ECOSERRADO, 2026

Importante destacar que, por se tratar de dados secundários, não houve interferência direta dos autores na definição dos pontos de coleta ou na execução das campanhas de campo, sendo a análise restrita à interpretação dos resultados apresentados nos relatórios técnicos.

PARÂMETROS ANALISADOS

Os parâmetros avaliados variaram de acordo com o compartimento ambiental monitorado, conforme o Quadro 01 abaixo, incluindo:

Quadro 01: Quadro de Análises

Compartimento ambiental	Parâmetros analisados	Referência normativa
Solo e subsolo	Metais pesados; parâmetros físico-químicos; compostos potencialmente contaminantes	CONAMA nº 20/2009
Águas subterrâneas	pH; condutividade elétrica; sólidos dissolvidos totais; nitrato; nitrito; cloretos; sulfatos; metais	CONAMA nº 96/2008
Águas superficiais	Condutividade elétrica; sólidos dissolvidos; nutrientes; parâmetros físico-químicos gerais	CONAMA nº 357/2005

Fonte: Autor, 2026

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos a procedimentos de análise estatística, temporal e comparativa, visando à interpretação da qualidade da água nos pontos amostrais ao longo do período investigado.

Inicialmente, realizou-se a estatística descritiva dos parâmetros analisados, contemplando os valores mínimos, máximos, médias e demais medidas de tendência central e dispersão consideradas pertinentes à caracterização dos dados.

Em seguida, os resultados foram comparados aos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação ambiental vigente, especialmente pelas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aplicáveis à classificação dos corpos hídricos, permitindo verificar a conformidade dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos em relação aos limites legais.

Também foi realizada uma análise espacial comparativa, considerando a localização dos pontos de coleta a montante e a jusante das áreas de influência antrópica, possibilitando identificar possíveis alterações na qualidade da água associadas às atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica.

Complementarmente, procedeu-se à análise temporal dos dados, buscando identificar tendências, oscilações e variações dos parâmetros monitorados ao longo do período de estudo, permitindo avaliar a dinâmica da qualidade da água em diferentes momentos de amostragem.

Para subsidiar a interpretação e a apresentação dos resultados, foram elaboradas representações gráficas, destacando-se:

- gráficos de barras, para comparação dos valores observados com os limites estabelecidos pela legislação ambiental;
- gráficos de linhas, para análise da evolução temporal dos parâmetros monitorados;

- gráficos comparativos, evidenciando as diferenças entre os pontos localizados a montante e a jusante da área de estudo.

Esses procedimentos analíticos permitiram uma avaliação integrada da qualidade da água, considerando simultaneamente os aspectos estatísticos, espaciais, temporais e normativos, fornecendo subsídios consistentes para a interpretação dos impactos ambientais identificados na área de estudo.

ABORDAGEM INTEGRADA E INTERPRETAÇÃO SISTÊMICA

A análise dos dados foi fundamentada em uma abordagem integrada dos sistemas ambientais, considerando as interações entre solo, água e atividades antrópicas associadas ao aterro sanitário.

Essa perspectiva baseia-se na Teoria Geral dos Sistemas (Bertalanffy, 1977), que entende o ambiente como um sistema aberto, no qual os diferentes componentes estão interligados por fluxos de matéria e energia. No campo da geografia ambiental, essa abordagem é amplamente utilizada para compreender processos de degradação e dinâmica ambiental (Guerra; Cunha, 2008).

De tal modo, a interpretação dos resultados não se restringiu à análise isolada de cada parâmetro, mas buscou identificar:

Relações entre solo e qualidade da água subterrânea

Possíveis rotas de migração de contaminantes

Influência das condições ambientais do semiárido na dinâmica dos poluentes

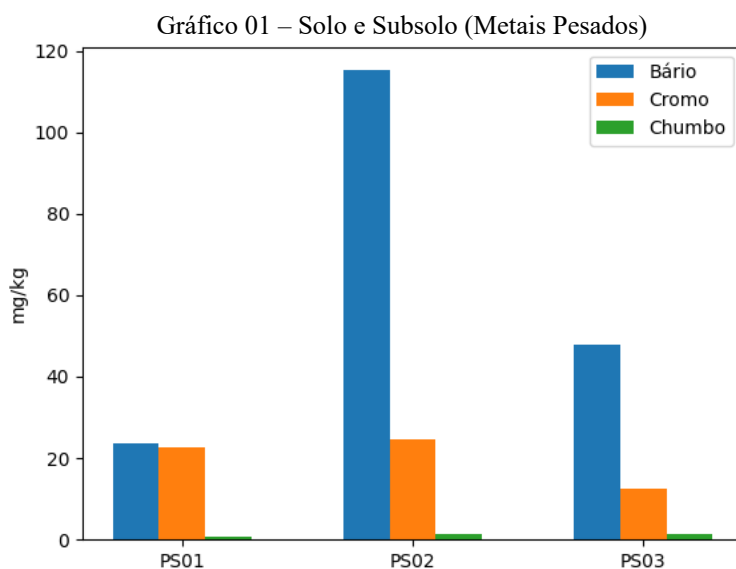
Indicativos de funcionamento ou limitação do solo como barreira ambiental

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A série histórica disponível (2020 - 2026) demonstra consistência no comportamento do solo e subsolo, mantendo-se em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009. Os dados mais recentes (2026) indicam baixa variabilidade espacial e ausência de acúmulo significativo de contaminantes, inclusive nos pontos mais próximos da área operacional do aterro.

Os resultados indicam que os metais analisados permanecem abaixo dos limites normativos, evidenciando ausência de contaminação significativa. O gráfico 01 demonstra estabilidade espacial e baixa variabilidade, indicando capacidade de retenção do solo.

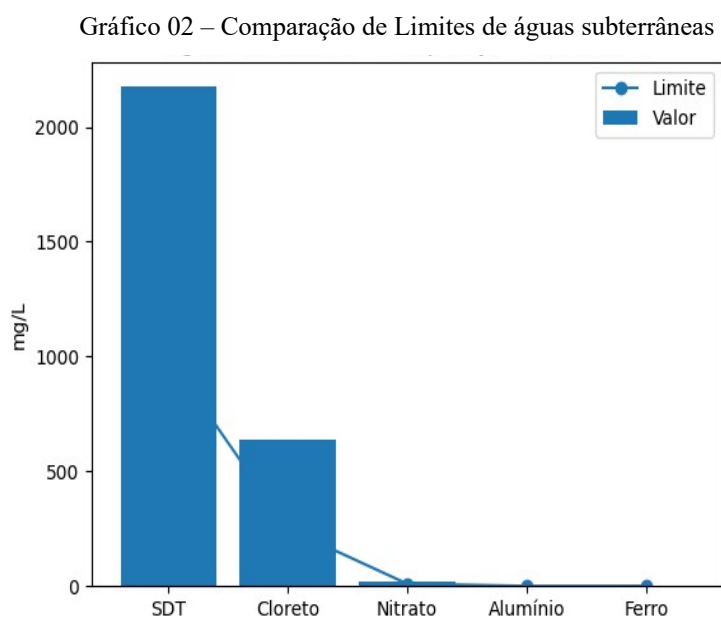




Fonte: Autor, 2026

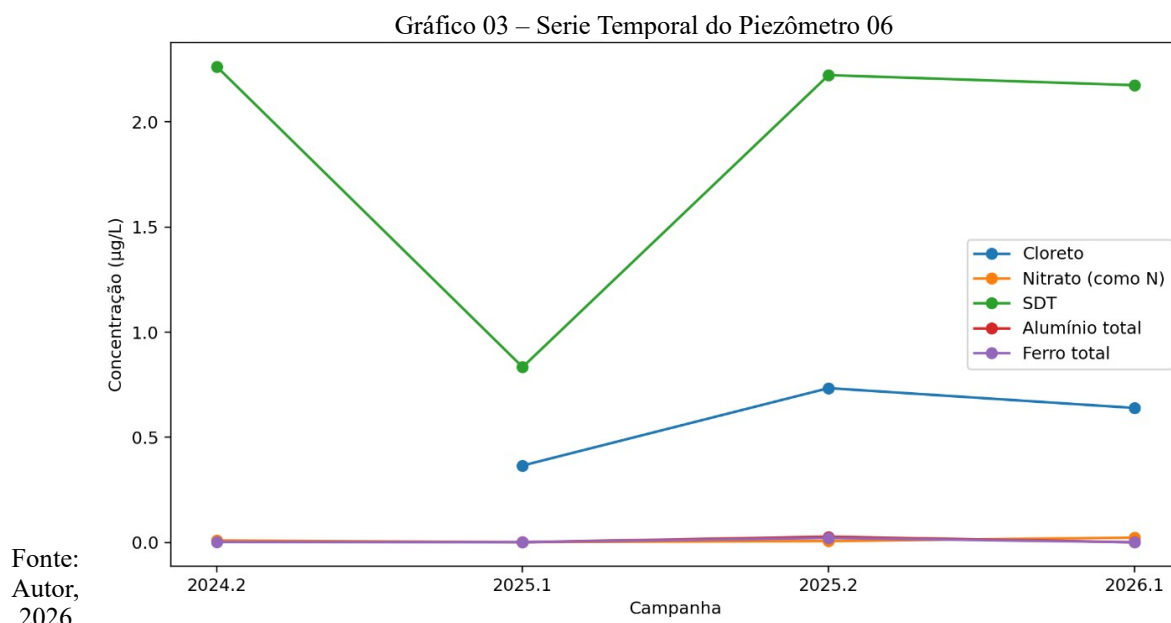
Do ponto de vista geográfico, esse comportamento indica que o solo exerce função reguladora no sistema ambiental, atuando como barreira geoquímica e física. Essa estabilidade sugere que os processos de adsorção e retenção estão sendo eficazes, ainda que não absolutos.

Considerando a análise temporal (Gráfico 02) das águas subterrâneas, revela-se um padrão distinto. Enquanto os dados de 2022 indicavam conformidade pontual, os resultados de 2026 evidenciam elevação significativa de parâmetros como sólidos dissolvidos totais, cloretos e nitrato, acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008.



Fonte: Autor, 2026.

Conforme ilustrado no Gráfico 03, que sintetiza a disponibilidade hídrica e a condição de monitoramento dos sete piezômetros instalados (PZ01 a PZ07) na área de estudo, observa-se que, em diferentes campanhas, a maioria dos pontos não apresentou nível d'água suficiente para coleta, restringindo a obtenção de dados quantitativos a um número reduzido de unidades amostrais, com destaque para o piezômetro PZ06.

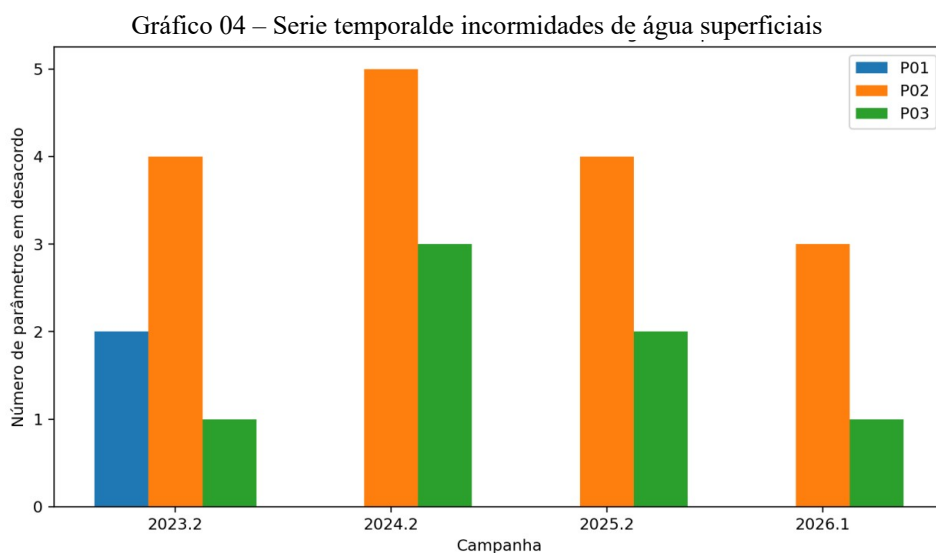


A limitação de dados quantitativos para a maioria dos piezômetros, associada à ausência de água em diferentes campanhas, evidencia a forte influência das condições semiáridas sobre a dinâmica hidrogeológica local, caracterizada por baixa recarga, elevada evapotranspiração e comportamento descontínuo do aquífero. Nesse contexto, a presença de dados consistentes apenas no PZ06 não deve ser interpretada como fragilidade metodológica, mas como um indicativo da heterogeneidade espacial do sistema aquífero, no qual a disponibilidade hídrica se distribui de forma irregular no território.

O gráfico evidencia, portanto, uma concentração funcional do monitoramento em pontos hidraulicamente ativos, refletindo zonas de maior conectividade subsuperficial, onde os fluxos de percolação e transporte de contaminantes tendem a se manifestar com maior intensidade. Essa configuração reforça a compreensão de que o sistema opera sob condições de recarga limitada e fluxo preferencial, nas quais a ausência de água em determinados piezômetros não implica ausência de impacto, mas sim restrição hidrológica, dificultando o monitoramento contínuo e potencializando a vulnerabilidade pontual do aquífero. Essa evolução temporal indica um processo de acúmulo progressivo de contaminantes no aquífero, caracterizando um sistema com retenção

parcial. A presença simultânea desses parâmetros configura assinatura típica de lixiviado, evidenciando transporte subsuperficial ativo.

Em relação as águas superficiais apresentam comportamento intermediário, com não conformidades pontuais registradas no período de 2023. Observa-se heterogeneidade espacial, com maior número de parâmetros alterados em pontos específicos, indicando influência difusa da área de disposição de resíduos.



Fonte: Autor, 2026

O comportamento temporal reforça que P02 é o ponto mais crítico, com cloreto e SDT persistentemente elevados e pico expressivo de DBO em 2025.2. Em 2024.2, o próprio relatório já apontava inconformidades em P02 para cloretos, clorofila, fósforo total, oxigênio dissolvido e SDT, enquanto P03 apresentava inconformidades para fósforo total, manganês total e oxigênio dissolvido, e P01 não apresentava inconformidades naquele período.

A série histórica confirma uma resposta espacialmente desigual dos corpos hídricos superficiais. O padrão mais estável em P01, a montante, contrasta com a maior criticidade em P02 e a condição intermediária de P03, ambos a jusante. Isso sugere que a qualidade da água superficial não é controlada apenas por um fator pontual, mas pela interação entre posição no sistema de drenagem, conectividade hidrológica, sazonalidade do semiárido e possíveis influências antrópicas cumulativas no entorno. O próprio relatório de 2026.1 menciona, como hipótese explicativa, a proximidade do antigo aterro/lixão de Sobral, além de indústrias e postos de gasolina nas proximidades dos pontos de coleta.

Insere-se que a dinâmica hidrológica do semiárido, marcada por intermitência e elevada evapotranspiração, intensifica a concentração de contaminantes, reforçando a sensibilidade desse compartimento.

A análise integrada evidencia uma organização funcional do sistema ambiental. O solo atua como compartimento de retenção, enquanto as águas subterrâneas funcionam como receptor final dos fluxos contaminantes. As águas superficiais, por sua vez, refletem a dinâmica intermediária, condicionada por eventos sazonais.

Sob a perspectiva geográfica, esse comportamento confirma que os impactos ambientais não se distribuem de forma homogênea, mas seguem fluxos e conexões espaciais, influenciados por relevo, solo, clima e hidrologia.

Os resultados demonstram que o sistema ambiental apresenta eficiência parcial no controle da contaminação. O solo mantém estabilidade, enquanto a água subterrânea revela vulnerabilidade crescente. Essa diferença entre compartimentos confirma a necessidade de abordagens integradas e contínuas de monitoramento, especialmente em ambientes semiáridos.

CONCLUSÕES

A análise integrada dos dados de monitoramento ambiental da CTR Sobral evidencia que o comportamento do sistema ambiental é condicionado por interações complexas entre fatores naturais e antrópicos, não podendo ser interpretado de forma isolada em relação ao empreendimento em operação.

No marco desta investigação, os resultados demonstram que o solo e o subsolo mantêm, ao longo da série histórica, parâmetros abaixo dos valores de prevenção estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009, indicando preservação da qualidade geoquímica e funcionamento efetivo como barreira ambiental. Esse comportamento reforça a capacidade do sistema edáfico em atuar como compartimento regulador, ainda que com eficiência parcial e caráter dinâmico.

Por outro lado, as águas subterrâneas apresentaram elevação significativa de parâmetros como sólidos dissolvidos totais, cloretos e nitratos, acima dos limites da Resolução CONAMA nº 396/2008, evidenciando alteração da qualidade hídrica. Entretanto, a interpretação desses resultados exige uma abordagem mais abrangente, considerando o contexto territorial e os passivos ambientais existentes na área de influência.

Conforme observado ao longo do estudo, existem dois importantes passivos ambientais localizados em cotas altimétricas superiores à área do empreendimento, sendo eles o antigo lixão de Sobral e um curtume instalado na região. A posição topográfica desses passivos é um fator determinante, uma vez que favorece a ocorrência de fluxos gravitacionais e subsuperficiais, potencializando o transporte de contaminantes em direção às áreas mais baixas, incluindo a região do CGIRS-RMS.

No quadro teórico apresentado, a presença de parâmetros alterados na água subterrânea não pode ser atribuída de forma direta e exclusiva à operação do aterro sanitário, uma vez que o sistema hidrogeoquímico local está sujeito à influência cumulativa de múltiplas fontes de contaminação. Essa condição caracteriza um cenário de sobreposição de impactos ambientais, no qual diferentes empreendimentos e usos pretéritos do solo contribuem simultaneamente para a qualidade ambiental observada.

Adicionalmente, destaca-se que, durante o período analisado, o CGIRS encontrava-se submetido a um processo de auditoria ambiental externa, com o objetivo de avaliar e comprovar a origem dos parâmetros alterados identificados nos monitoramentos. Esse procedimento reforça o compromisso institucional com a transparência e a rastreabilidade ambiental, bem como evidencia a necessidade de distinção entre impactos gerados pelo empreendimento e aqueles decorrentes de passivos preexistentes.

Denota-se que a correlação entre solo e água subterrânea reforça essa interpretação, uma vez que o solo permanece em conformidade normativa enquanto a água apresenta alterações. Esse comportamento sugere que o sistema edáfico atua como barreira parcial, mas também indica que os contaminantes podem estar sendo transportados por vias subsuperficiais provenientes de áreas externas ao empreendimento.

As águas superficiais, por sua vez, apresentaram comportamento heterogêneo, com maior criticidade em pontos específicos, especialmente aqueles com maior conectividade hidrológica com áreas potencialmente impactadas. Essa distribuição espacial reforça a influência de fatores geomorfológicos e hidrológicos na dinâmica de dispersão dos contaminantes.

Importa registrar que as condições climáticas do semiárido — caracterizadas por baixa recarga hídrica, elevada evapotranspiração e irregularidade das precipitações — intensificam esse cenário, favorecendo a concentração de contaminantes e reduzindo a capacidade de diluição do sistema. Esse contexto amplifica os sinais de impacto ambiental e dificulta a interpretação isolada das fontes de contaminação.

Sob a perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas, o ambiente estudado pode ser caracterizado como um sistema aberto com múltiplas entradas de matéria e energia, no qual os impactos ambientais resultam da interação entre diferentes fontes e processos. Dessa forma, a dinâmica observada não representa exclusivamente o efeito de um único empreendimento, mas sim a expressão de um sistema ambiental complexo e interdependente.

Diante desse cenário, conclui-se que a qualidade ambiental da área de estudo é influenciada por um conjunto de fatores que incluem tanto a operação atual do aterro sanitário quanto passivos ambientais preexistentes. A correta interpretação dos dados de monitoramento depende, portanto, de

uma abordagem integrada, que considere a posição geográfica, a topografia, o histórico de uso do solo e a interação entre diferentes fontes de impacto.

Pautado nas considerações, destaca-se a necessidade de continuidade e ampliação dos programas de monitoramento ambiental, bem como do aprofundamento das análises de rastreabilidade de contaminantes, de modo a subsidiar decisões técnicas mais precisas e garantir a adequada gestão ambiental em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

BERTALANFFY, Ludwig von. **Teoria geral dos sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações**. 5. ed. Petrópolis: Vozes, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 07 abr. 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 03 ago. 2010.

CARACRISTI, Isorlanda. **Geografia e meio ambiente no semiárido brasileiro**. Sobral: Edições UVA, 2013.

CORTEZ, Ernani. **Hidrogeologia e gestão de recursos hídricos no semiárido**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2010.

DINIZ, Simone Ferreira; SOUZA, Maria Cristina Martins Ribeiro de; ALVES, Vanessa Campos. **Estudos ambientais no ambiente semiárido**. Sobral: PROEX/UVA, 2020.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FALCÃO SOBRINHO, José. **Geografia física e dinâmica ambiental**. Sobral: Edições UVA, 2007.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

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

GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

JUCÁ, José Fernando Thomé. **Aterros sanitários e impactos ambientais**. Recife: UFPE, 2014.

KER, João Carlos et al. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.

LEFF, Enrique. **Epistemologia ambiental**. 5. ed. São Paulo: Cortez, 2015.

SOBRAL. Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral (CGIRS-RMS). **Relatório técnico semestral de automonitoramento das águas superficiais**. Sobral: CGIRS-RMS, 2026.

