

A Resistividade Elétrica para a Investigação e o Monitoramento Geoambiental de um Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos

Ana Paula do Nascimento

Doutoranda, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, paula.nascimento@unesp.br

Mariana Barbosa Juarez

Doutoranda, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, mariana.juarez@unesp.br

Heraldo Luiz Giacheti

Professor Titular, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, h.giacheti@unesp.br

Vagner Roberto Elis

Professor Associado Doutor, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, vagner.elis@iag.usp.br

Giulliana Mondelli

Professora Assistente Doutora, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, g.mondelli@unesp.br

RESUMO: O monitoramento geoambiental continuado de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos possibilita a identificação a longo prazo de um planejamento mais sustentável com técnicas de remediação da contaminação do subsolo, e avaliação do comportamento mecânico, hidráulico e ambiental. No Brasil, o encerramento dos lixões é uma questão que arrasta-se sem solução eficaz desde 2014, marco determinado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos para fim deste problema. Em Bauru, interior do estado de São Paulo, desde 2002 estão sendo realizados ensaios para investigação e monitoramento geoambiental do aterro municipal, cuja operação iniciou-se em 1993 e encerrou-se em 2016. Nestas duas últimas décadas, foram realizados os seguintes ensaios: geofísica de superfície (métodos de eletrorresistividade e polarização induzida), piezocone (CPTU), piezocone de resistividade (RCPTU), poço de monitoramento para verificação dos níveis d'água subterrânea e fluxo de contaminantes, e sondagem de simples reconhecimento na fase de implantação do aterro (SPT). Foram realizadas 16 campanhas de sondagens de ensaio de piezocone, sendo algumas dessas com uso do sensor de resistividade (RCPTU) no entorno do aterro. Foram realizadas coleta de solo e água subterrânea para caracterização direta e a resistividade elétrica do solo determinada através dos ensaios RCPTU, geofísica de superfície e das águas subterrâneas por meio de poços de monitoramento. A interpretação dos resultados aponta para a zona não saturada uma faixa de variação de resistividade elétrica entre 200 a 900 ohm.m, para a zona saturada do solo um intervalo de 23 a 111 ohm.m e para as águas subterrâneas valores entre 6,7 e 1041 ohm.m.

PALAVRAS-CHAVE: Encerramento de Lixões, Investigação do Subsolo, Monitoramento Geoambiental, Geofísica de Superfície.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o problema da disposição incorreta de resíduos sólidos urbanos (RSU) persiste há mais de 20 anos de tentativas para o encerramento dos lixões e aterros controlados. Quando da publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305) em 2010, o prazo estabelecido era agosto de 2014. Com o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), este prazo encerra-se em dezembro de 2024. Porém, o que se percebe no Brasil é que não será possível atingir novamente esta meta, visto que existiam em 2023

aproximadamente 2.577 lixões, que são depósitos à céu aberto sem nenhum controle e impermeabilização para evitar a contaminação dos solos (ABREMA, 2023).

Tais depósitos ambientalmente inadequados acarretam problemas à saúde humana, ao meio ambiente e interferem nas condições climáticas. Uma destas mudanças climáticas é o aquecimento global, causado pelo aumento dos gases liberados na atmosfera formando o efeito estufa. Os principais gases liberados por aterros que formam o efeito estufa são o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), sendo os RSU responsáveis por aproximadamente 4% do total destes gases liberados em 2022 no Brasil (Tsai *et al.*, 2023). O metano é um gás 28 vezes mais potente que o dióxido de carbono (EPA, 2023), dessa forma o metano liberado pelos aterros poderiam ser reaproveitados compondo fontes de recuperação de energia, importante tipo de tratamento dos RSU.

Para reduzir os impactos dos RSU destinados incorretamente, é necessário que se intensifique a investigação e o monitoramento geoambiental de aterros controlados e lixões, para que medidas de remediação sejam tomadas, em conjunto com a melhoria no sistema de coleta urbana e implantação de tratamentos de resíduos.

Os aterros sanitários são locais próprios para o descarte dos rejeitos oriundos dos RSU, pois tratam-se de obras de engenharia que são realizadas com impermeabilização da base do solo, e representam atualmente 61,1% da disposição adequada de RSU no Brasil, sendo o restante, 38,9%, ainda disposto em lixões e aterros controlados. As regiões norte, nordeste e centro-oeste foram consideradas as localidades com maiores índices de disposição inadequada (ABREMA, 2023).

Cabe ressaltar que existem no país 18 aterros em 11 estados localizados em Áreas de Preservação Permanente (APPs), sendo considerados locais de disposição inadequada, segundo mapeamento do Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais do IBAMA, devendo também serem encerrados (ABREN, 2024).

O crescimento populacional no Brasil entre os anos de 2010 até o último censo realizado em 2022 foi da ordem de 6,5% de habitantes (IBGE, 2023), o que implicou num aumento da geração de RSU em 4.981.760 toneladas. Porém, na comparação entre 2021 e 2022 a geração per capita no Brasil diminuiu de 1,061 kg/hab/dia para 1,040 kg/hab/dia, ou seja, uma redução de 2%. Isso devido ao padrão de consumo de alimentos pós-pandemia, que voltou a ser realizado fora de casa, e diminuição do poder de compra, em virtude do aumento do desemprego. Estima-se que foram gerados no ano de 2022 aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU e 380 kg/hab/ano, correspondendo a uma geração diária de 211 mil toneladas (ABREMA, 2023).

Para que haja melhoria nos processos de gestão de resíduos municipais, o planejamento e a execução são importantes para atender a PNRS quanto ao encerramento de lixões e aterros controlados, assim como o monitoramento geoambiental continuado, para que seja possível a identificação a longo prazo do planejamento de técnicas de remediação da contaminação do subsolo e avaliação do comportamento mecânico, hidráulico e ambiental do maciço de resíduos.

Em Bauru, interior do estado de São Paulo, desde 2002 estão sendo realizadas investigações e monitoramento geoambiental do aterro municipal, cuja operação iniciou em 1993 e encerrou em 2016. Nestas duas últimas décadas foram realizados os seguintes ensaios: geofísica de superfície (métodos de eletrorresistividade e polarização induzida), piezocone (CPTU), piezocone de resistividade (RCPTU), poço de monitoramento para verificação dos níveis d'água subterrânea e fluxo de contaminantes, e sondagem de simples reconhecimento na fase de implantação do aterro (SPT). Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo reunir e resumir as informações provenientes de mais de 20 anos de ensaios, a fim de orientar métodos de investigação, monitoramento e remediação de lixões e aterros controlados.

2 HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO

O aterro sanitário de Bauru foi projetado pela Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI) da Escola de Engenharia de São Carlos em 1992 e começou a operar em 1993, localizado na cota 560 m, com área total de 268.985 m² e altura de 15m. O revestimento de base do aterro constituiu-se de quatro camadas de solo arenoso argiloso compactado, com 20 cm de espessura, com umidade de 3% acima do teor ótimo, com subcamada de *primer* asfáltico betuminoso diluído em duas demãos.

O estudo de impacto ambiental (EIA-RIMA) do projeto previa três camadas de resíduos, dispostos sobre camadas compactadas de solo arenoso argiloso revestido com emulsão asfáltica (FIPAI, 1992). Estima-se que a primeira e a segunda camadas tenham sido concluídas em uma década, uma vez que as atividades iniciais de disposição de resíduos na terceira camada foram documentadas entre 2003 e 2004 (Lago, 2004; Mondelli, 2004). Em 2011, o plano de encerramento do aterro foi aprovado pela CETESB, incluindo a reconformação da quarta e da quinta camadas e uma área adjacente de expansão (BAURU, 2015). A desativação oficial ocorreu em 2016, quando os RSU do município passaram a ser enviados para um aterro privado em Piratininga - SP.

Por algum tempo, o lixiviado gerado no aterro era direcionado para um reservatório inferior através do sistema de drenagem e bombeado para uma lagoa situada no topo da terceira camada de resíduos, onde parte do fluído se infiltrava na massa de resíduos. Novas lagoas foram construídas fora e a montante do aterro em 2007. Diferentes pesquisas ao longo dos anos delinearão uma pluma de contaminação devido à migração de choro-me para o subsolo, integrando ensaios de laboratório, de campo e métodos geofísicos (Lago, 2006; Mondelli *et al.*, 2007; Ustra *et al.*, 2012; Faria, 2017, 2020). A geologia da área é caracterizada por uma transição de solos coluvionares para solos aluviais e, abaixo destes, solos residuais de arenito e arenito propriamente dito. Poços de monitoramento indicaram a profundidade do nível d'água variando de 30 a 35 metros a montante do aterro e de 5 e 10 metros a jusante (Mondelli, 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Resistividade Elétrica

A resposta elétrica do solo depende de vários fatores, dentre eles o teor de umidade, a permeabilidade, a porosidade e os íons presentes no fluido contido nos poros.

O ensaio de piezocone de resistividade (RCPTU) é um método de investigação geotécnica e geoambiental e foi empregado no entorno do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru entre os anos de 2002 e 2004, para solos saturados e não saturados.

A resistividade elétrica também foi monitorada empregando duas técnicas de geofísica de superfície: o Caminhamento Elétrico (CE), realizado a montante, sobre o maciço de resíduos e a jusante e a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), dentro e fora da área preenchida com resíduos.

Em laboratório, para confirmação dos valores de resistividade obtidos em campo, empregaram amostras de solos Residual de Arenito e Arenito Bauru com variados graus de saturação (S_r) para o choro-me bruto coletado do aterro e água de torneira.

Os ensaios de piezocone de resistividade (RCPTU) totalizaram 16 pontos, analisando a resistividade tanto em solo não saturado como em saturado, utilizando um módulo de resistividade com quatro eletrodos dispostos em arranjo Wenner. Estes 16 ensaios RCPTU ficavam localizados nas seguintes regiões do aterro: sudoeste, parte mais a jusante e próximo ao maciço de resíduos do aterro municipal. A primeira campanha, realizada em fevereiro de 2002 (estação chuvosa), incluiu os ensaios RCPTU 1 a 7. Já, em abril de 2002 foram executadas os ensaios RCPTU 9 a 14, não sendo possível coletar solo e água por problemas operacionais da empresa que realizou o serviço. Porém, em julho de 2002, concluíram-se os 2 últimos ensaios (RCPTU 15 e 16), complementados com coleta de amostras de solo e água próximos aos ensaios RCPTU 13, 14 e 15 (Mondelli, 2004).

Quanto à geofísica de superfície, foram realizadas 5 linhas de Caminhamento Elétrico (CE) de resistividade e polarização induzida, com arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento de 10 m entre os eletrodos, localizadas a montante do maciço (CE 1), sobre o aterro de resíduos (CE 2, CE 3A, CE 3B) e a jusante do maciço de resíduos (CE 4) (Lago, 2006). Em outubro de 2006, foram realizadas mais 14 linhas de CE (120 m de comprimento cada) com arranjo dipolo-dipolo e espaçamento de 5 m, com o equipamento Syscal Pro, localizada na parte oeste do aterro para levantamento 3D (malha retangular de 65 m x 120 m), e 1 linha CE (comprimento total de 500 m) sobre os resíduos na direção Norte-Sul, com espaçamento entre eletrodos de 20 m (Mondelli, 2008).

As Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) totalizaram 9 pontos, denominadas de SEV 1 a SEV 9, realizadas com arranjo Schlumberger e espaçamento máximo de 150 m. As SEVs 1 a 7 foram realizadas fora da área preenchida com resíduos, e as SEVs 8 e 9, sobre a cava de resíduos (Lago, 2006). Também em outubro

de 2006, mais uma SEV 10, próxima ao PM 13 fora da área de resíduos, mais ao norte do aterro (Mondelli, 2008).

Em laboratório, a resistividade elétrica com amostras de solos foram realizadas com corpos de provas saturados através dos ensaios de coluna (Mondelli, 2008).

3.2 Monitoramento Ambiental

Segundo Boscov (2008), o monitoramento ambiental consiste geralmente no acompanhamento da qualidade de águas subterrâneas com amostragem em poços de monitoramento e coletas de amostras de corpos d'água a montante e a jusante do aterro, além da análise físico-química do lixiviado e a caracterização da composição dos resíduos sólidos.

Durante o período de 2002 e 2015, foram instalados 24 poços de monitoramento de águas subterrâneas na área de influência do aterro municipal de Bauru-SP, alguns localizados a montante do aterro e a maioria na região mais crítica a jusante (Faria e Mondelli, 2020).

Em setembro de 2002 foram instalados 9 poços de monitoramento de águas subterrâneas (PM1 a PM9), em 2006 mais 7 poços (PM 3A, PM 5A, PM 5B, PM 10 a PM 13), e em 2014, 8 poços (PM 14 a PM 20, PM 19A). Deste total, 6 poços estão localizados a montante do aterro e os outros na região mais crítica a jusante. Para escolha dos poços de monitoramento basearam-se nos resultados das campanhas de ensaios geofísicos e RCPTU. A altitude destes poços varia da cota 554,10 m a 523,44 m (Faria e Mondelli, 2020).

As dificuldades encontradas para comparar os valores de resistividade foram a falta destas informações na literatura, idealmente antes da implantação do aterro de resíduos sólidos, a fim de se conhecer os valores naturais do solo do entorno. Por isso, durante as campanhas de RCPTU foram realizadas algumas coletas de água subterrânea e solo, possibilitando uma caracterização geoambiental direta *in situ*. Para a amostragem da água utilizou-se o sistema de perfuração hidráulico *Geoprobe* e poços de monitoramento temporários abertos com trado. As amostras de solo foram obtidas utilizando o sistema *direct-push*, consistindo de um tubo de PVC rígido e transparente, com uma ponteira cônica maciça e outra de PVC flexível, ambas instaladas na extremidade inferior do tubo (Mondelli, 2004).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, observam-se as resistividades medidas através dos ensaios de piezocone de resistividade (RCPTU) para o solo saturado e não saturado. Nota-se uma faixa de valores de resistividade de 200 a 900 ohm.m aproximadamente, para a zona não saturada, ou seja, localizados acima do nível d'água medido na época. Para o solo saturado, a variação deu-se no intervalo de 23 a 111 ohm.m. O nível d'água nos 7 ensaios RCPTU realizados, cuja profundidade máxima foi de 15,04 m, variou entre 3,12 e 7,12 m.

Tabela 1. Valores médios de resistividade encontrados para os solos saturado e não saturado localizados no entorno do aterro de RSU de Bauru (adaptado de Mondelli, 2008).

| Zona do solo | Ensaio | Profundidade (m) | Resistividade (ohm.m) |
|--------------|----------|------------------|-----------------------|
| Não saturada | RCPTU 1 | 0,12 a 4,88 | 371,1±249,9 |
| | RCPTU 4 | 0,12 a 3,62 | 352,8±217,3 |
| | RCPTU 8 | 0,12 a 7,12 | 430,8±362,0 |
| | RCPTU 10 | 0,12 a 3,12 | 893,6±874,5 |
| | RCPTU 13 | 0,12 a 6,12 | 861,1±1392,0 |
| | RCPTU 14 | 0,12 a 5,12 | 200,4±212,7 |
| | RCPTU 15 | 0,12 a 5,12 | 231,8±200,8 |
| Saturada | RCPTU 1 | 4,88 a 7,50 | 111,5±52,8 |
| | RCPTU 4 | 3,62 a 12,02 | 62,7±35,2 |
| | RCPTU 8 | 7,12 a 11,02 | 30,7±8,6 |
| | RCPTU 10 | 3,12 a 6,92 | 100,5±47,5 |
| | RCPTU 13 | 6,12 a 15,04 | 80,6±69,6 |

| | | |
|----------|-------------|-----------|
| RCPTU 14 | 5,12 a 8,32 | 48,7±10,9 |
| RCPTU 15 | 5,12 a 8,70 | 23,1±6,6 |

Todos os ensaios RCPTU apresentaram diminuição na resistividade quando atingiram a zona saturada e, em muitos deles, a variação do parâmetro a partir de tal profundidade parece ser afetada pelo tipo de solo. A predominância de valores entre 23 e 49 ohm.m medidos no solo saturado dos ensaios RCPTU 14 e 15, nas quais a distinção de camadas arenosas e argilosas não foi tão clara, foram associados à possível presença de lixiviado do aterro diluído na água subterrânea.

Os resultados das 5 linhas de Caminhamento Elétrico (CE), localizadas a montante do maciço (CE 1), e sobre o aterro de resíduos (CE 2, CE 3A, CE 3B), apresentaram valores de resistividade para os RSU variando entre 4 e 40 ohm.m, enquanto na região à jusante do maciço de resíduos (CE4) os valores variaram entre 13 a 1796 ohm.m (Lago, 2006).

O CE realizado no sentido Norte-Sul mostraram o comprometimento da qualidade das águas subterrâneas entre as distâncias 150 e 250 m (12 ohm.m) e 450 e 500 m (89 ohm.m). Nesta extremidade mais ao sul ocorreu descarte de resíduos de serviço de saúde.

Os resultados das Sondagens Elétricas Verticais (SEVs), para o grupo de SEVs 1 a 7, realizadas fora da área preenchida com resíduos, a resistividade variou: de 26,4 a 3136 ohm.m na primeira camada (solo superficial); de 24,3 a 670 ohm.m na segunda camada (solo não saturado); de 11,0 a 11,7 ohm.m na terceira camada (solo não saturado contaminado, SEVs 2, 4 e 5); de 17,4 a 81,3 ohm.m na quarta camada (zona de capilaridade); e de 10,4 a 22,3 ohm.m na quinta camada (zona saturada) (Lago, 2006).

Os resultados das SEVs dentro da área preenchida com resíduos (SEVs 8 e 9) indicaram valores de resistividade entre 28,8 e 166 ohm.m na primeira camada (material de cobertura do aterro), entre 18,3 e 18,8 ohm.m na segunda camada (resíduos), entre 10,2 e 10,4 ohm.m na terceira camada (resíduos e lixiviado) e entre 28,9 e 29,9 ohm.m na quarta camada (base do aterro) (Lago, 2006).

Na SEV 10, na cota 528,5 m, a resistividade elétrica indicou um decréscimo de 11 ohm.m e nível d'água a 16,0 m de profundidade (Mondelli, 2008).

De acordo com a Tabela 2, os ensaios de resistividade elétrica realizados em amostras de solos Residual de Arenito e Arenito Bauru em laboratório, com diferentes graus de saturação (Sr), apontaram valores muito baixos (1,50 a 204,4 ohm.m) para aquelas contendo lixiviado ou chorume bruto coletado no aterro.

Tabela 2. Valores de resistividade elétrica determinados para as amostras de solo analisadas em laboratório com lixiviado e água de torneira (Mondelli, 2008)

| Amostra | Lixiviado | | Água de Torneira | |
|---------|---------------|-------------|------------------|-------------|
| | R (ohm.m) | Sr (%) | R (ohm.m) | Sr (%) |
| 1 | 1,91 – 50,3 | 20,7 – 98,7 | 559 – 1019 | 34,6 – 80,2 |
| 2 | 28,84 – 204,4 | 10,2 – 97,4 | 190 – 510 | 32,2 – 82,7 |
| 3 | 3,44 – 11,1 | 28,7 – 99,6 | - | - |
| 4 | 1,79 – 44,8 | 21,7 – 98,5 | 2960 – 6589 | 41,8 – 97,1 |
| 5 | 1,50 – 41,6 | 16,6 – 99,6 | 1165 – 2230 | 29,5 – 88,2 |

A Tabela 3 apresenta os resultados do monitoramento de águas subterrâneas com as médias anuais obtidas para a resistividade elétrica.

Tabela 3. Resistividade elétrica (ohm.m) da água subterrânea, obtida nos poços de monitoramento permanente (adaptado de Mondelli, 2008).

| Ano | PM 1 | PM 2 | PM 4 | PM 7 | PM 8 | PM 9 | PM 11 | PM 12 | PM 13 |
|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 2003 | 18,4 | 189,4 | 42,3 | 33,3 | 54,4 | 29,6 | - | - | - |
| | ±4,4 | ±33,0 | ±21,5 | ±8,0 | ±10,9 | ±7,6 | - | - | - |
| 2004 | 42,5 | 70,1 | 28,4 | 20,5 | 41,3 | 17,4 | - | - | - |
| | ±23,5 | ±38,5 | ±2,8 | ±0 | ±0 | ±0 | - | - | - |
| 2005 | 89,5 | 46,9 | 24,7 | 21,4 | 48,1 | 71,2 | - | - | - |
| | ±13,2 | ±10,5 | ±4,7 | ±3,3 | ±6,7 | ±6,0 | - | - | - |

| | | | | | | | | | |
|-------|---------------|----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|
| 2006 | 63,4 ±0 | 20,5 ±0 | 21,6 ±0 | 39,5 ±0 | 39,1 ±0 | 62,3 ±0 | 53,1 ±0 | 28,7 ±0 | 72,4 ±0 |
| 2007 | 50,4 ±10,8 | 29,8 ±1,3 | 22,7 ±0,5 | 32,2 ±6,8 | 55,0 ±7,4 | 64,8 ±3,2 | 22,5 ±2,1 | 21,4 ±6,1 | 62,0 ±8,1 |
| 2008 | 45,0 ±0 | 34,8 ±0 | 28,3 ±0 | 33,7 ±0 | 59,2 ±0 | 74,6 ±0 | 45,9 ±0 | 21,5 ±0 | 103,7 ±0 |
| 2009 | 29,0 ±0 | 30,5 ±0 | 27,3 ±0 | 22,6 ±0 | 38,0 ±0 | 76,6 ±0 | 52,3 ±0 | 20,6 ±0 | 73,7 ±0 |
| 2010 | 34,0 ±15,6 | 19,9 ±0,7 | 22,4 ±9,1 | - | 67,6 ±0 | 97,6 ±14,0 | 151,5 ±114,6 | 18,5 ±3,0 | 137,9 ±22,6 |
| 2011 | 19,0 ±0 | 17,0 ±0 | 31,9 ±0 | - | 18,5 ±0 | 37,0 ±0 | 54,6 ±0 | 19,9 ±0 | 104, 2±0 |
| 2012 | 17,6 ±0 | 16,9 ±0 | 79,7 ±51,7 | - | 22,9 ±3,0 | 93,0 ±0,6 | 81,0 ±40,9 | 20,3 ±0,2 | 73,0 ±71,3 |
| 2013 | 11,1 ±1,1 | 52,8 ±52,7 | 33,6 ±12,5 | - | 32,1 ±2,0 | 91,4 ±3,0 | 39,2 ±8,6 | 17,9 ±0,3 | - |
| 2014 | 22,0 ±0 | 1041,7 ±0 | 22,4 ±0 | 6,9 ±0 | 33,4 ±0 | 82,6 ±0 | 26,2 ±0 | 20,5 ±0 | - |
| 2015 | 13,8 ±0 | 6,7 ±0 | - | 5,2 ±0 | - | - | 38,5 ±0 | 20,3 ±0 | - |
| Média | 35,1 ±5,3 | 121,3 ±10,5 | 32,1 ±8,6 | 23,9 ±2,0 | 42,5 ±2,5 | 66,5 ±2,9 | 56,5 ±16,6 | 21,0 ±1,0 | 89,6 ±14,6 |

7 CONCLUSÃO

A resistividade elétrica é um indicativo de provável contaminação nas regiões impactadas pela implantação do aterro sanitário de Bauru, especificamente a jusante do maciço de resíduos, uma vez que na época em que o mesmo foi projetado não haviam as tecnologias disponíveis existentes hoje sobre o uso de materiais geossintéticos. Os resultados de ensaios de piezocone de resistividade e métodos de geofísica de superfície mostraram valores baixos, coerentes com a natureza condutiva do lixiviado.

Nos ensaios RCPTU 14 e 15, os valores de resistividade entre 23 e 49 ohm.m na zona saturada foram associados à presença de solos saturados sob influência do lixiviado local diluído na água subterrânea, indicando uma tendência de migração de contaminantes para a região oeste do aterro. Nesses pontos, a resistividade do solo não saturado ficou em torno de 200 a 232 ohm.m. Para os demais ensaios RCPTU, os intervalos foram de 30 a 110 ohm.m na zona saturada e de 350 a 900 ohm.m na zona não saturada. Estes resultados mostraram que na zona saturada a resistividade elétrica é mais baixa, e portanto a condutividade elétrica é maior, possivelmente devido a presença de íons livres dissolvidos na água, que podem ou não indicar a presença de poluentes.

Os valores de resistividade obtidos tanto pelo método do Caminhamento Elétrico (CE) quanto pela Sondagem Elétrica Vertical (SEV) convergiram com os resultados de RCPTU e acrescentaram informações referentes aos resíduos aterrados, cuja resistividade ficou entre 10,2 e 18,8 ohm.m.

A partir da análise da resistividade elétrica de água subterrânea coletadas dos poços de monitoramento, observou-se que no período de coleta entre 2003 a 2015, os valores de resistividade elétrica menor a 50 ohm.m foram obtidos nos poços PM 1, PM 4, PM 7, PM 8, e PM 12, demonstrando uma alta condutividade da água subterrânea, em concordância com os resultados obtidos da geofísica de superfície realizada a jusante do maciço de resíduos (linha de caminhamento elétrico CE 4).

Em laboratório, foi possível fazer a confirmação dessas informações, através da percolação de chorume bruto em amostras de diferentes tipos de solo, mostrando que a resistividade elétrica continua fornecendo valores baixos, variando na faixa de 1,50 a 204,4 ohm.m, ou seja, muito maior que quando da saturação com água de torneira (entre 190 e 6589 ohm.m).

Dessa forma, destaca-se que a combinação de métodos diretos e indiretos e a análise de águas subterrâneas em poços de monitoramento, é eficiente para a investigação e o monitoramento geoambiental de aterros de RSU, reduzindo incertezas durante a interpretação dos resultados. Por fim, ressalta-se a oportunidade de novos estudos na área a fim de estimar os parâmetros geomecânicos e sua variabilidade espacial e temporal e de outros métodos geofísicos no maciço de resíduos, como a sísmica de refração e a amostragem direta para mineração e caracterização dos RSU.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru (EMDURB) e à Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA) pela parceria e apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREMA (2023). *Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. Disponível em: <https://abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2024.
- ABREN (2024). *Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos*. Decisão coloca em xeque unidades em áreas de proteção de 11 estados. Disponível em: <<https://abren.org.br/2024/01/30/stf-retoma-votacao-sobre-aterros-valor-economico/#:~:text=Ao%20longo%20desse%20quatro%20anos,meta%20de%20acabar%20com%20lix%C3%B5es>>. Acesso em: 09 fev. 2024.
- BAURU (2015). Área ampliada do Aterro Sanitário de Bauru inicia operação nos próximos dias. Disponível em: <<https://www2.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=21233>>. Acesso em: 07 fev. 2024.
- Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. E-book. Oficina de Textos. São Paulo. ISBN 978-85-96238-73-4.
- CETESB (2024). *Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Sistema Integrado de Gestão Ambiental (SIGAM)*. Disponível em: <<https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Default.aspx?idPagina=16906>>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- EPA (2023). *Environmental Protection Agency of the United States*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/gmi/importance-methane>>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- Faria, G. M. M., Mondelli, G. (2017). Interaction between municipal solid waste leachate and Bauru aquifer system: a study case in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, p. 27553-27572.
- Faria, G. M. M., Mondelli, G. (2020). Temporal behavior analysis of leachate contamination in a tropical landfill. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 39584-39606.
- FIPAI (1992). *Aterro sanitário da cidade de Bauru-SP*. EIA-RIMA. Relatório de Impacto Ambiental – Relatório de Impacto do Meio Ambiente. v 1 a 5. Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial. São Carlos-SP.
- IBGE (2023). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Agência Notícias IBGE. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em 12 abr. 2024.
- Lago, A. L. (2004) *Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo – SP.
- Lago, A. L., Elis, V. R., Giachetti, H. L. (2006). Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, p. 357-374.

- Mondelli, G. (2004). *Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo - SP. 264p.
- Mondelli, G., Giacheti, H. L., Boscov, M. E. G., Hamada, J. (2007). Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. *Environmental Geology*, v. 52, n.5, p. 871-887.
- Mondelli, G. (2008). *Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos - SP. 392p.
- Mondelli, G., Giacheti, H. L., & Hamada, J. (2016). Avaliação da contaminação no entorno de um aterro de resíduos sólidos urbanos com base em resultados de poços de monitoramento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.21, p.169-182.
- Tsai, D, Potenza, R., Quintana, G., et al. (2023). Sistemas de estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa (SEEG). *Análises das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2022)*.
- Ustra, A. T., Elis, V. R., Mondelli, G., Zuquette, L. V., & Giacheti, H. L. (2012). Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 66, p. 763-772.