

Resistividade no entorno do aterro sanitário municipal de Boa Vista, Roraima, Brasil: implicações ambientais

Electrical resistivity around the sanitary landfill in Boa Vista, Roraima, Brazil: implications for environmental constraints

Lena Simone Barata Souza¹, Guilherme Gonzaga de Andrade¹

¹Universidade Federal de Roraima. Boa Vista, Roraima, Brasil

Resumo: As curvas de resistividade elétrica (ρ_a) definidas para o aterro sanitário de Boa Vista configuraram dois grupos geoeletricos: (1) não contaminado e (2) contaminado. O grupo 1 (N, NE, E, SE, S, SW e W, ao entorno do aterro) definiu quatro zonas de resistividade representativas do litotipo arenoso ($30.000 < \rho_a < 10.000 \Omega.m$), areno-argiloso ($10.000 < \rho_a < 5.000 \Omega.m$), argilo-arenoso ($5.000 < \rho_a < 1.000 \Omega.m$) e argiloso ($1.000 < \rho_a < 700 \Omega.m$). O grupo 2, subdividido em 2A, 2B e 2C, apontou que as anomalias condutivas de 2A ($36 < \rho_a < 250 \Omega.m$) são a pluma de contaminação do aterro, já as zonas condutivas de 2B ($250 < \rho_a < 500 \Omega.m$) estão relacionadas à migração da pluma, indicando concentração dela para NW, N e NE. Os contaminantes tendem a migrar a NE da área, em direção ao igarapé Auaí Grande, sendo, ainda, limitados pelo subgrupo 2C.

Palavras-chave: Aterro sanitário. Contaminação. Sondagem elétrica vertical. Boa Vista.

Abstract: The electrical resistivity curves (ρ_a) defined for the Boa Vista sanitary landfill consisted of two geoelectric groups. The first one is depicted as four zones with graded resistivity values that are related to the lithology: sand-sized grain ($30,000 \Omega.m < \rho_a < 10,000 \Omega.m$), muddy sand-sized grain ($10,000 < \rho_a < 5,000 \Omega.m$), sandy mud-sized grain ($5,000 \Omega.m < \rho_a < 1,000 \Omega.m$), and mud-sized grain ($1,000 \Omega.m < \rho_a < 700 \Omega.m$). The second group is subdivided: 2A ($36 \Omega.m < \rho_a < 250 \Omega.m$) which presents conductive anomalies attributed to a contamination plume of the county garbage disposal area; 2B ($250 \Omega.m < \rho_a < 500 \Omega.m$) which is related to the migration of the contamination plume and is concentrated in the NW, N, and NE of the study area while the contaminants tend to migrate toward the NE portion. There, the risk is intensified because the Auaí Grande creek is located in this portion. The last group 2C is the borderline for the first two groups 2A and 2B. In the NE portion, group 2C presents resistivity values ranging from $2,000 \Omega.m$ to $7,000 \Omega.m$, acting as natural trapping for the contaminants.

Keywords: Sanitary landfill. Contamination. Vertical electrical sounding. Boa Vista city.

SOUZA, L. S. B. & G. G. ANDRADE, 2018. Resistividade no entorno do aterro sanitário municipal de Boa Vista, Roraima, Brasil: implicações ambientais. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* 13(3): 435-452.

Autora para correspondência: Lena Simone Barata Souza. Universidade Federal de Roraima. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. *Campus* Paricarana. Av. Cap. Ene Garcez, 2413 – Aeroporto. Boa Vista, RR, Brasil. CEP 69310-000 (lenabarata@yahoo.com.br).

Recebido em 31/10/2017

Aprovado em 08/04/2018

Responsabilidade editorial: Fernando da Silva Carvalho Filho



INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são, atualmente, o método mais comum utilizado pelas sociedades urbanas para a destinação de resíduos sólidos. Apesar de serem locais específicos para tal propósito, a disposição final dos resíduos nem sempre é realizada de maneira correta, sendo que, por vezes, são desprezadas as condições mínimas exigíveis para o funcionamento do aterro, que se tornam áreas sujeitas à contaminação e, conseqüentemente, à propagação de contaminantes.

Os resíduos sólidos são definidos pelas normas brasileiras NBR 8.419/1992 (ABNT, 1992) e NBR 13.896/1997 (ABNT, 1997), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Segundo texto da ABNT (1992, p. 1), aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é

[...] técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

De acordo com NBR 10.004/2004, os resíduos sólidos são:

[...] resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p. 1).

Nos contaminantes provenientes do lixo, destacam-se os compostos orgânicos que sofrem decomposição bacteriana, os quais, devido à umidade,

desprendem-se e arrastam consigo substâncias sulforadas, nitrogenadas e cloradas tóxicas de odor desagradável, formando o 'chorume'. As estações chuvosas marcam momentos de intensa percolação de água nos depósitos de resíduos, o que proporciona a intensa lixiviação do chorume. Principalmente, se o terreno em subsuperfície tiver alto grau de porosidade, os depósitos migrarão em forma de pluma em direção às águas subterrâneas. Junto ao chorume, ocorre o arraste de substâncias inorgânicas, como cátions de magnésio, de sódio, de cálcio e de amônio, bem como íons de metais pesados, por exemplo de alumínio, de cádmio, de chumbo e de mercúrio (Schalch, 1992; Christensen *et al.*, 2001).

A investigação de contaminações produzidas pelos aterros sanitários engloba uma análise ambiental integrada, envolvendo características hídricas, pedológicas e geológicas da área onde o depósito sanitário está localizado. As pesquisas mais difundidas entre a comunidade acadêmica em relação ao estudo de áreas contaminadas estão relacionadas às formas diretas de investigação, como análises químicas em amostras de solo e de águas superficial e subterrânea (Celere *et al.*, 2007; Korf *et al.*, 2008; Falcão *et al.*, 2012). Contudo, essas técnicas, embora eficientes, têm caráter pontual de investigação, além de desconsiderarem heterogeneidades intrínsecas ao meio geológico.

O uso de ferramentas indiretas em estudos ambientais, como as técnicas geofísicas, é crescente, buscando-se caracterizar e monitorar os contaminantes eventualmente presentes no solo, possibilitando, assim, um prognóstico quanto à direção de fluxo e aos possíveis efeitos no meio ambiente. Tais técnicas contam, ainda, com a rapidez de investigação em profundidade e custo relativamente menor, quando comparados a outras estratégias. A investigação dos métodos geofísicos é feita por meio de medidas das propriedades físicas dos materiais geológicos em subsuperfície, como resistividade elétrica, cargabilidade, susceptibilidade magnética,

permissividade dielétrica, entre outras (Hasselström, 1969; Ali & Whiteley, 1981; Verma & Bischoff, 1989; Geissler, 1989; Carrasquila *et al.*, 1991; Souza & Verma, 2005; Souza & Carvalho, 2017a, 2017b; Souza & Paz, 2018). A aquisição de dados em grande escala a um custo relativamente baixo e a carência de dados diretos possibilitam a aplicação de metodologias geofísicas em estudos ambientais (Elis & Zuquette, 2002; Moura & Malagutti Filho, 2003; Gallas *et al.*, 2005; Lago *et al.*, 2006; Nunes & Luiz, 2006; Moura *et al.*, 2007; Braga, 2016; Kearey *et al.*, 2009; Bortolin & Malagutti Filho, 2010; Souza *et al.*, 2017, 2018).

Dessa forma, a proposta deste trabalho é estabelecer a distinção do comportamento elétrico da possível contaminação advinda do aterro sanitário municipal de Boa Vista, estado de Roraima, por meio da associação do método elétrico (levantamento eletrorresistivo - ER, com uso da técnica de sondagem elétrica vertical - SEV) com imagens de sensoriamento remoto (SR) e mapeamento geológico local. A avaliação dos resultados desses estudos será útil para subsidiar a idealização de um modelamento geoelétrico da área contaminada em decorrência da presença do chorume produzido pelo aterro, a fim de indicar o quão afetados estão os corpos hídricos superficial e subterrâneo, além da verificação do solo adjacente. O estudo também avalia uma possível tendência de contaminação de corpos que cortam o município de Boa Vista e desaguam na bacia hidrográfica do rio Branco, principal afluente que corta o estado da região NE para a SW.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Boa Vista, capital do estado de Roraima, está situada à margem esquerda do rio Branco, que é o principal manancial hídrico regional (Figura 1A) e tem como fronteiras municipais Amajari, a norte, Alto Alegre, a oeste, e Mucajaí, a sul. As vias de acesso são

feitas por rodovias federais e municipais: BR-174, BR-401 e RR-205.

A capital roraimense tem 320.714 habitantes e produz mais de 9.000 toneladas de lixo por mês. Tem como principal fonte de abastecimento hídrico as águas subterrâneas provenientes do Sistema Aquífero Boa Vista (Wankler *et al.*, 2012). No entanto, o nível de conhecimento sobre essas águas e de prováveis processos de contaminação ainda é muito pequeno (Souza & Carvalho, 2017b). O aterro sanitário de Boa Vista (área-tema deste estudo) está localizado adjacente a BR-174/km 1.378 494, a 11 km do centro da capital, posicionando-se na bifurcação do igarapé Auai Grande (Figuras 1B, 2, 3A, 3B).

CONTEXTOS GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO SIMPLIFICADOS

Boa parte do estado de Roraima, principalmente a porção centro-norte, está recoberta por uma vasta cobertura sedimentar cenozoica, denominada de Formação Boa Vista, sendo englobada no domínio Cinturão Guiana Central. Tal formação está assentada sobre o *Hemi-Graben* do Tacutu, com sedimentação decorrente à reativação de estruturas regionais (Reis *et al.*, 2003), e aflora em forma de morros suaves de aproximadamente 200 m de altura. Ela é composta essencialmente por argilitos, siltitos, arenitos, arenitos arcoseanos e conglomerados, apresentando, ainda, concreções lateríticas, cuja sedimentação corresponde a ambiente flúvio-aluvionar de idade Terciária (Reis *et al.*, 2003; Riker, 2005; Wankler *et al.*, 2012) (Figura 4).

As compartimentações geomorfológicas das unidades de relevo que se destacam nas porções norte, central e sul do estado são denominadas de unidades morfoestruturais. Entre estas, a área de estudo está localizada na porção central, na unidade pediplano Rio Branco-Rio Negro. Segundo Beserra Neta & Tavares Junior (2008), esta unidade é descrita por extensas superfícies aplainadas, com altitudes variando de 80 a 160 m e suaves declividades.

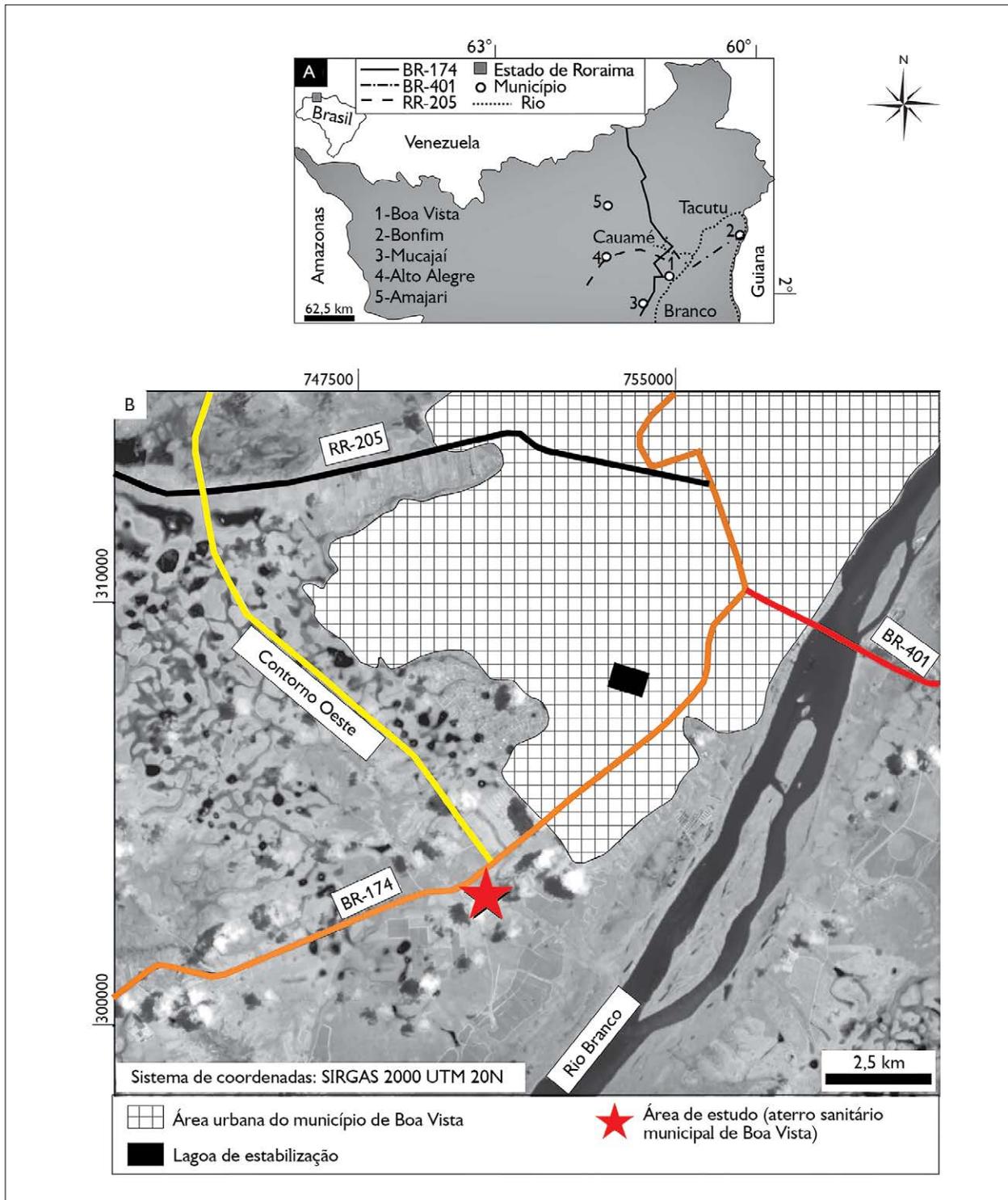


Figura 1. Área de estudo: A) limites municipais da cidade de Boa Vista; B) posicionamento do aterro sanitário municipal de Boa Vista. Fonte: modificado de Andrade (2015).

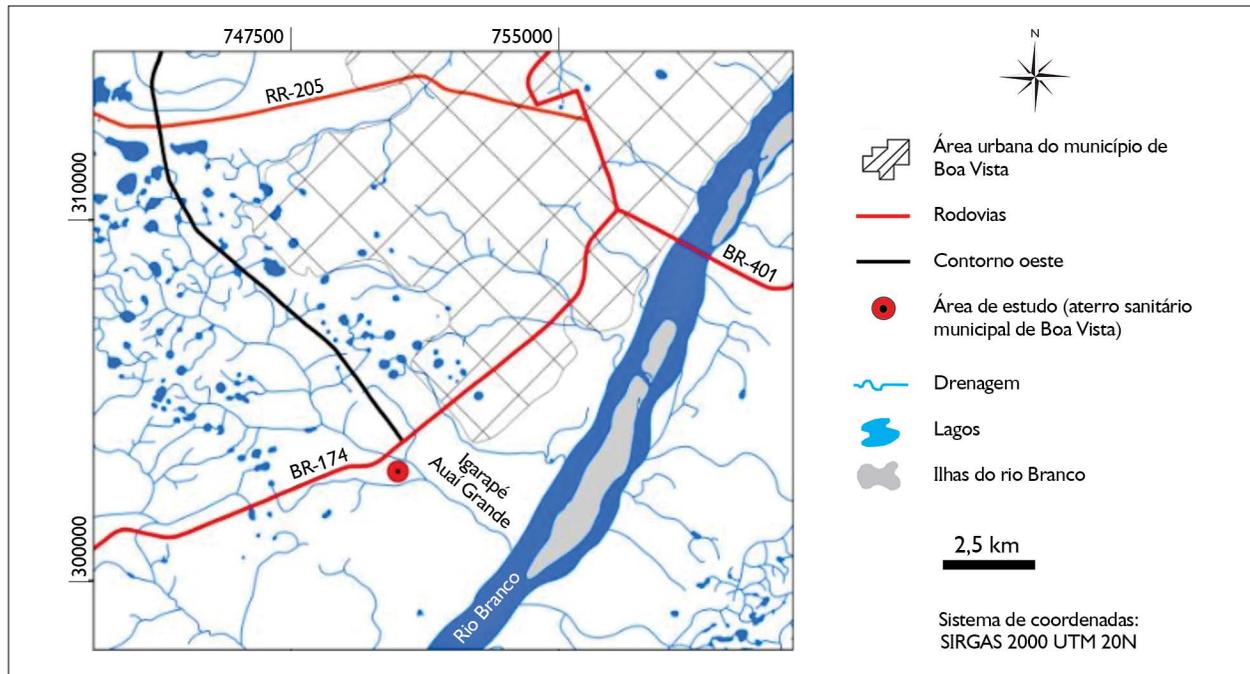


Figura 2. Rede de drenagem da área de estudo. Fonte: modificado de Andrade (2015).

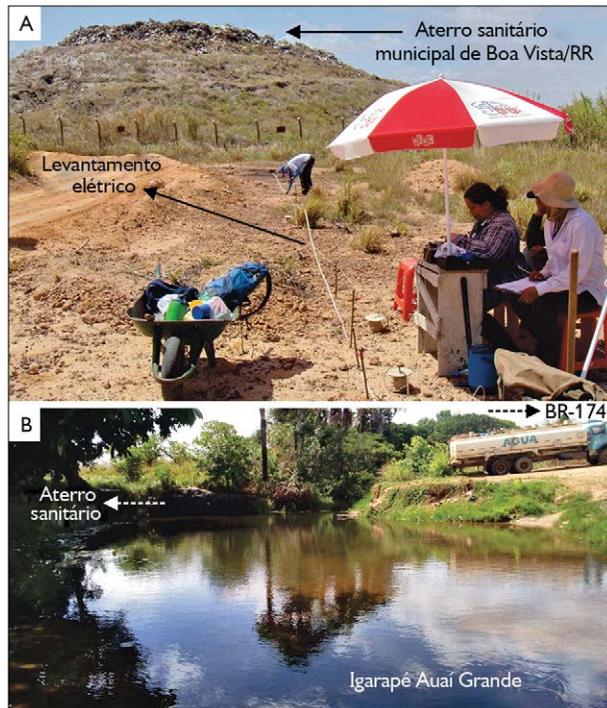


Figura 3. Aterro sanitário municipal de Boa Vista: A) visão geral; B) corpo hídrico localizado a 100 m do aterro. Fotos: F. W. S. Carvalho (2016).

METODOLOGIAS

O estudo na área de deposição dos resíduos sólidos no município de Boa Vista fez uso das metodologias indiretas (geofísica e sensoriamento remoto), buscando o discernimento acerca do comportamento da possível contaminação advinda do aterro municipal.

Os produtos de sensoriamento remoto (SR) utilizados consistiram nas imagens do satélite Landsat 8, disponíveis pelo Serviço Geológico Americano (USGS, s. d.) e pelo *software Google Earth Pro*. As imagens do Serviço Geológico Americano foram adquiridas em 23/09/2013, georreferenciadas e corrigidas referente à cena 232/058 (órbita/ponto). Os produtos das imagens resultaram da composição de bandas *red, green, blue* (RGB) (R7G6B5), com resolução espacial de 30 m, bem como da fusão das bandas R7G6B5 com a banda 8 (pancromática), resultando na resolução espacial de 15 m. Os produtos do *Google Earth Pro* consistiram em imagens capturadas em outubro de 2014. O processamento ocorreu no Laboratório de Ensino de Geociências, da Universidade

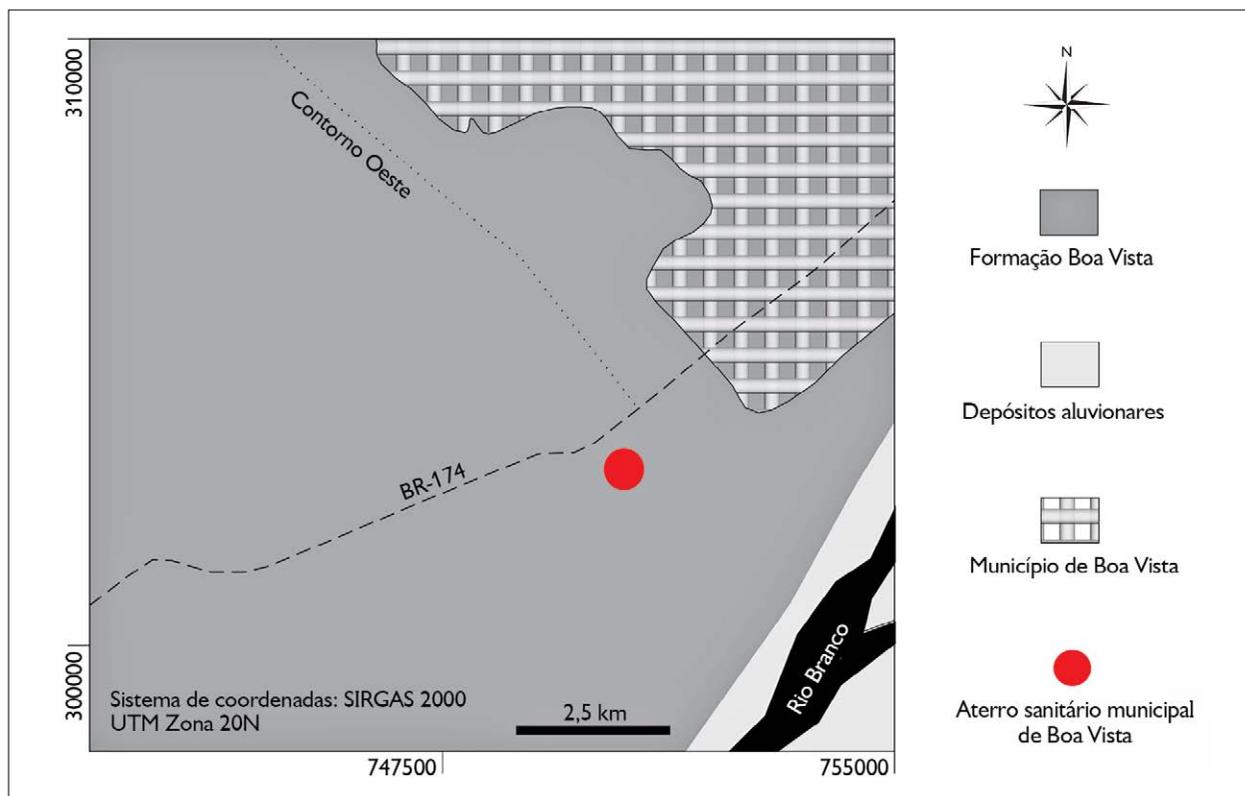


Figura 4. Mapa geológico da área. Fonte: modificado de Andrade (2015).

Federal de Roraima (LABENGEO/UFRR), com auxílio dos *softwares* ArcGis e ENVI. Esses produtos serviram de base para a extração manual da rede de drenagem e, conseqüentemente, para a confecção do mapa de drenagem vigente na área em apreço (Figura 2). Tal atributo auxiliou na observação da possível tendência do contaminante na área.

No período de 21 a 27/01/2015, foi executado, de modo sistemático, o ensaio eletrorresistivo (ER), através da técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) com arranjo *Schlumberger*. No trabalho de campo, utilizou-se o resistímetro pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Amazonas (IG/UFAM). Maior detalhamento de execução desta metodologia pode ser encontrado em Parasnis & Orellana (1970), Parasnis (1971), Orellana (1972), Telford *et al.* (1990), Kearey *et al.* (2009), Souza (2005, 2010), Braga (2016), entre outros.

A boa conduta do levantamento por SEV requer que as estações estejam distribuídas de forma regular na superfície do terreno, cuja marcação da área investigada deve ser feita por vias lineares extensivas por centenas de metros, não asfaltadas, a fim de permitir a instalação dos eletrodos, sendo necessário, para isso, que haja baixo fluxo de automóveis e de pedestres, com o intuito de evitar que os cabos sejam rompidos ou que alguém possa vir a ter contato direto com os eletrodos quando da injeção de corrente.

Dessa forma, o ensaio elétrico na área mostrou excelente disposição para execução da sondagem, já que se trata de local afastado do centro urbano e que possui topografia plana. Foram realizadas vinte e seis SEV no aterro sanitário de Boa Vista, com distâncias mínimas entre os eletrodos de corrente igual a 2 m ($AB/2 = 1$ m) e máxima de 48 m ($AB/2 = 24$ m). Desse total, vinte e três

foram realizadas na porção externa ao aterro e apenas três, nas porções internas próximas à bancada mais externa de descarte dos resíduos sólidos (Figuras 5A, 5B e 6). Posteriormente, os dados elétricos foram processados com auxílio dos programas IPI2Win (desenvolvido pela GEOSCAN-M Ltd.) e Surfer 11, no LABENGEO/UFRR. Contudo, devido à rasa profundidade prospectada, não foram feitas inversões das curvas de ρ_a . Mesmo assim, os valores de resistividade elétrica serviram de base para fornecer uma visualização geoeletrica, ou seja, para a verificação das extensões vertical e lateral do pacote rochoso associado à Formação Boa Vista, levando-se em consideração os valores associados a contaminantes, permitindo, assim, analisar a expressão em subsuperfície do comportamento e da tendência do fluxo contaminador resultante do aterro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ASSINATURA ELÉTRICA

A integralização do contexto geológico, os períodos de inundação do igarapé Auá Grande e o relevo pertinente à área mapeada permitiram distinguir o comportamento elétrico da área, reunindo as curvas de resistividades em dois grupos geoeletricos, de acordo com o local de realização do ensaio, com a faixa de variação da resistividade e com o comportamento geométrico da curva, além de indicarem um modelo hipotético sobre a tendência do fluxo contaminador.

Grupo geoeletrico 1

Este grupo abrangeu quatorze levantamentos de ER (SEV 6 e 14-26), efetuados nas porções norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste e oeste em relação ao entorno do aterro, com leituras atingindo 24 m de profundidade (Figuras 6 e 7). Na área, os terrenos superficiais compreendem texturas entre areno-argilosas e argilo-arenosas, com presenças pontuais de concreções lateríticas ferruginosas. As curvas do grupo exibiram seis geometrias peculiares:

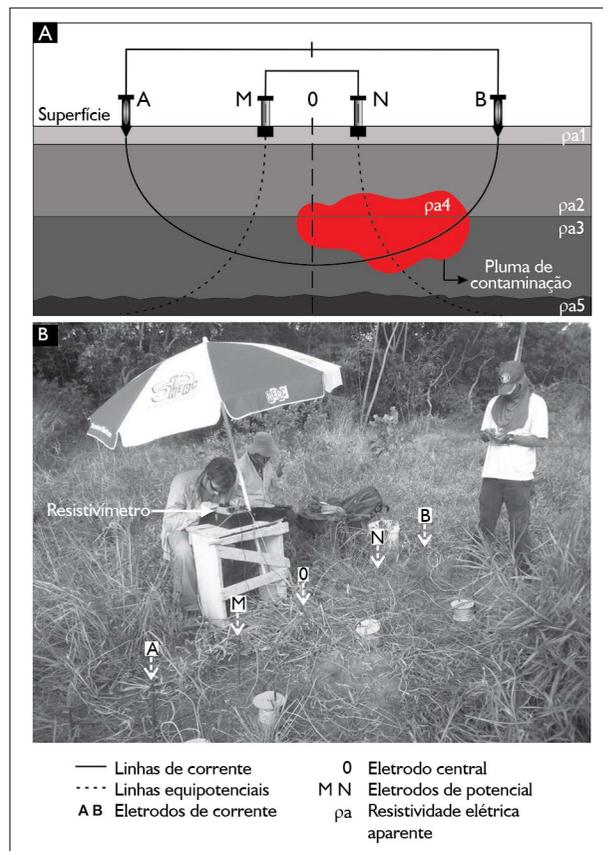


Figura 5. Exemplificação do ensaio geofísico: A) modelo hipotético (modificado de Braga, 2016); B) sondagem elétrica vertical com arranjo *Schulumberger*. Fotos: F. W. S. Carvalho (2016).

- Ascendente (SEV 6): resistividades com valores na faixa de 1.302 a 13.027 $\Omega.m$ a profundidades superiores a 1 m;
- Convexa e ascendente (SEV 16): a convexidade restringe-se às profundidades de 1,3 a 2,4 m, com ρ_a entre 4.088 a 3.938 $\Omega.m$. A ascendência ocorre a profundidades maiores de 2,4 m, com ρ_a alcançando até 20.000 $\Omega.m$;
- Côncava e convexa (SEV 14, 15, 18-21 e 23): faixas de valores totais entre $700 < \rho_a < 30.000 \Omega.m$. Ao longo da curva da SEV 15, são exibidas três convexidades e duas concavidades. A maior convexidade limita-se às profundidades de 1 a 4,2 m, com ρ_a de 18.966 e 6.734 $\Omega.m$. A concavidade mais explícita fica entre 10 e 18 m,

- com ρ_a de 6.844 a 1.404 $\Omega.m$. Já na SEV 20, estas geometrias são acentuadas, expondo dois vales e um pico. O maior vale está entre 5,5 a 24 m, com ρ_a de 3.794 a 14.320 $\Omega.m$. O pico ocorre nas profundidades de 3,2 a 5,5 m, com ρ_a de 5.116 a 3.794 $\Omega.m$;
- d) Levemente côncava (SEV 24 e 25): embora as duas sondagens apresentem similaridades em suas geometrias, as resistividades são estritamente distintas, pois a SEV 24 varia de $6.200 < \rho_a < 18.000 \Omega.m$, enquanto que a SEV 25 mostra oscilação de $1.200 < \rho_a < 2.100 \Omega.m$;
- e) Côncava, convexa e descendente (SEV 22 e 26): de forma geral, estas sondagens têm ρ_a de 18.546 a 1.015 $\Omega.m$. A SEV 22 expõe duas concavidades e uma convexidade, tais formatos estão restritos às profundidades de 1 a 4,2 m. A partir de 4,2 m, a curva demonstra decréscimo de 10.709 para 1.539 $\Omega.m$. Aos 10 m de profundidade, a curva exhibe geometria do tipo serrilhada, cujas oscilações variam em torno de $1.000 < \rho_a < 2.500 \Omega.m$. Ao contrário da SEV 22, a SEV 26 mostra decaimento abrupto de 2,4 m até 24 m de profundidade, com $13.604 < \rho_a < 2.506 \Omega.m$;

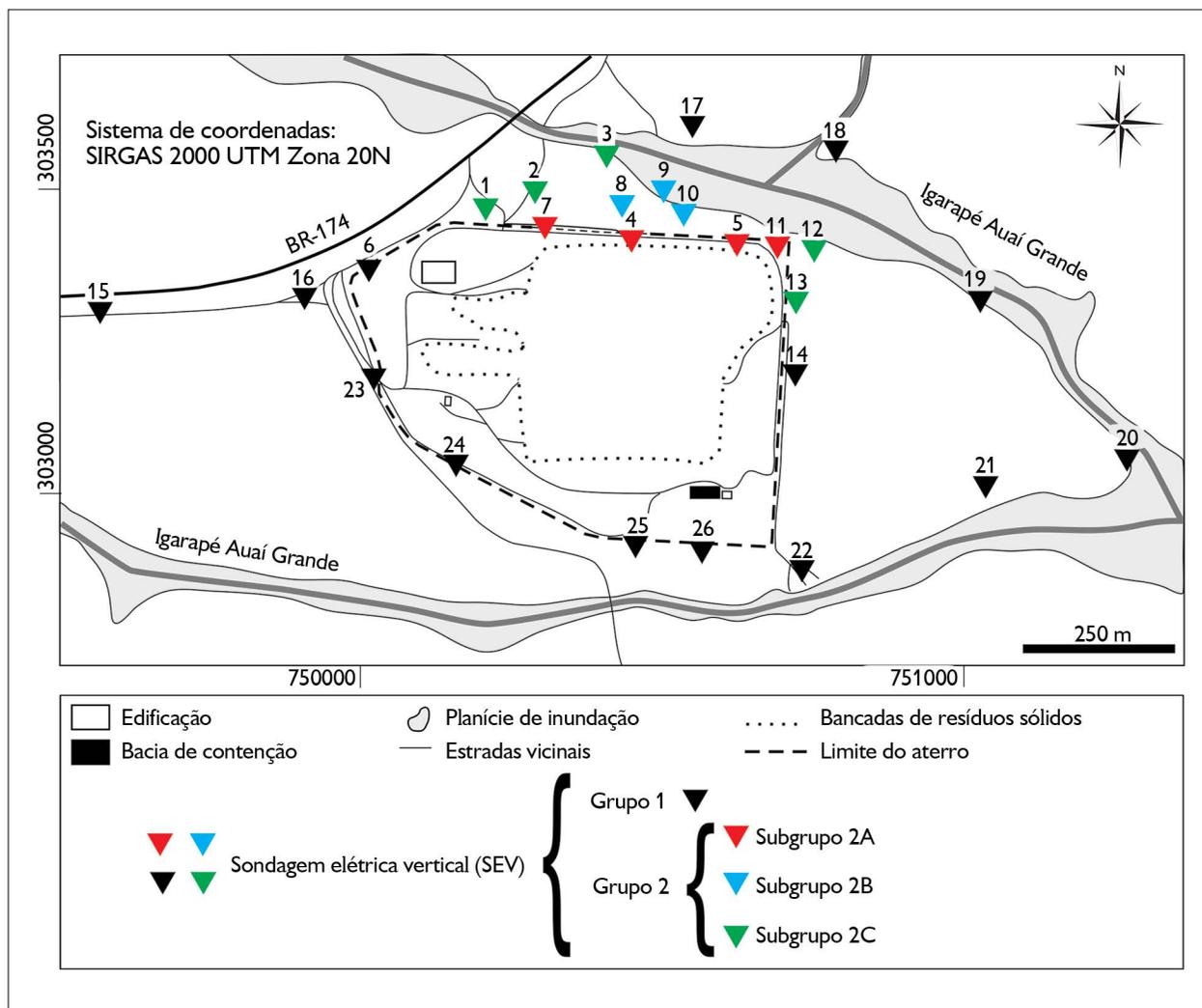


Figura 6. Mapa de pontos das sondagens elétricas verticais (SEV). Fonte: modificado de Andrade (2015).

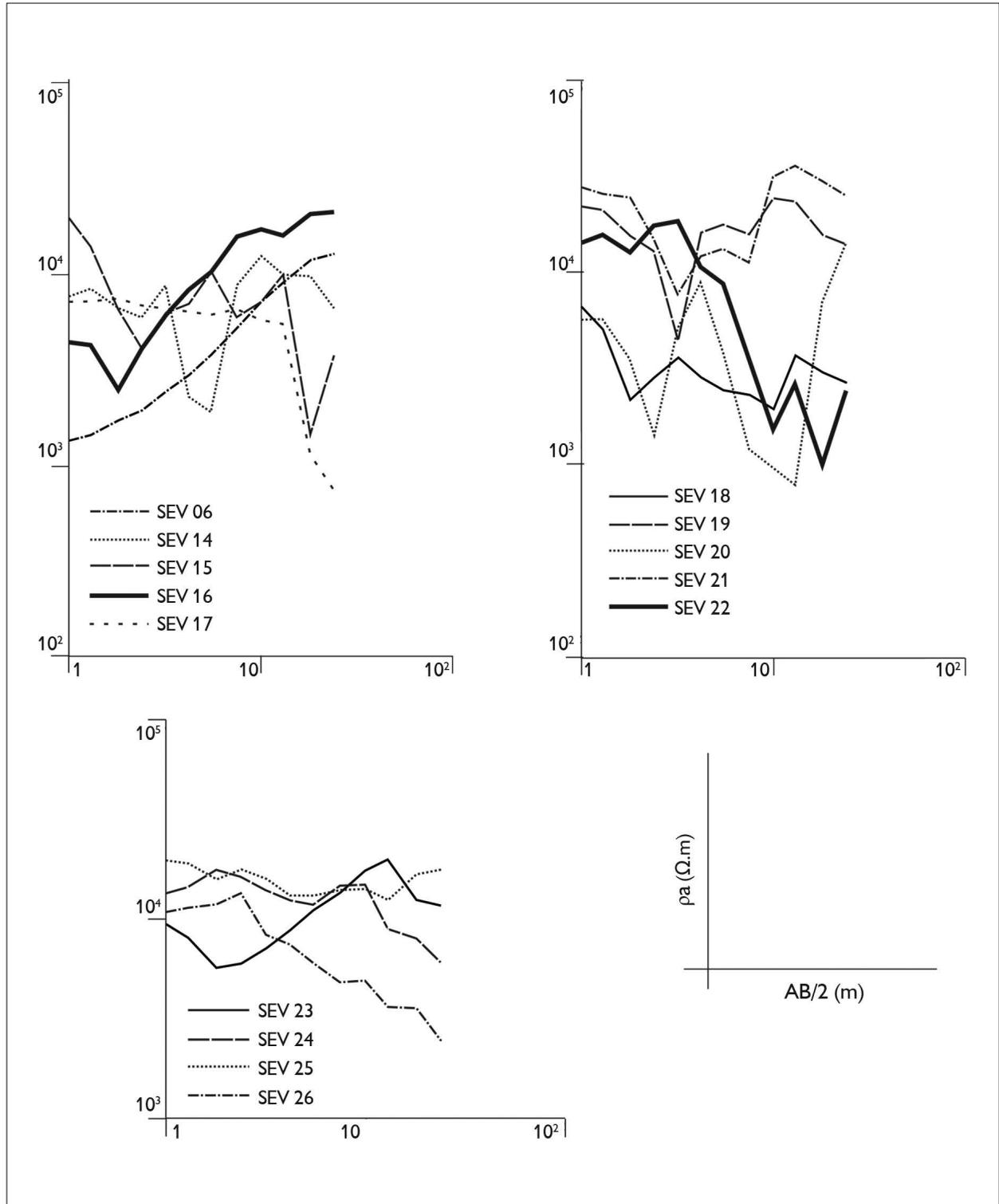


Figura 7. Curvas de resistividade aparente do grupo geolétrico 1.



- f) Retilínea e descendente (SEV 17): a retilinearidade varia de 1 a 13 m de profundidade, com ρ_a de 6.950 a 5.331 Ω .m. A descendência inicia-se aos 13 m, com valores de $5.000 < \rho_a < 750 \Omega$.m.

Grupo geoeletrico 2

Este grupo englobou doze levantamentos elétricos (SEV 1-5 e 7-13) (Figura 6), executados nas porções noroeste, norte e nordeste da área de estudo, com leituras alcançando profundidades de 24 m, com exceção da SEV 9, que alcançou 18 m. Os ensaios foram divididos em três subgrupos.

Subgrupo geoeletrico 2A

Trata-se de um subgrupo composto por quatro sondagens (SEV 4, 5, 7 e 11) efetuadas nas porções noroeste, norte e nordeste da área (Figuras 6 e 8A). Todos os levantamentos foram realizados com direção paralela às bancadas do aterro e situaram-se a cerca de 5 a 30 m próximos dessas bancadas.

Os resultados das sondagens conferiram caráter areno-argiloso a argilo-arenoso às zonas superficiais do terreno. As baixas resistividades observadas neste subgrupo são notórias conforme a profundidade de investigação é aumentada, de modo que no intervalo de 13 a 24 m os valores de ρ_a foram sempre inferiores a 318 Ω .m. As curvas apresentam dois comportamentos predominantes: (a) ascendente – ρ_a com valores na faixa de 636 a 3.312 Ω .m, com profundidades variando entre 1 a 4,2 m; e (b) descendente – ρ_a com valores na faixa de 2.757 a 36 Ω .m e profundidades de 1,3 a 24 m.

Embora a SEV 11 esteja inserida neste subgrupo, seu comportamento merece destaque, visto que possui dois momentos distintos de retilinearidade, separados por um pico com ρ_a de 297 Ω .m. Estas características retilíneas, são distinguidas nas profundidades de 1 a 1,8 m e de 3,2 a 18 m, com valores de ρ_a entre 254 a 168 Ω .m e 109 a 61 Ω .m, respectivamente. Em profundidades superiores a 18 m, há ascendência de 190 Ω .m de resistividade.

Subgrupo geoeletrico 2B

Subgrupo constituído por três ensaios (SEV 8 a 10) (Figura 8B) efetuados na porção norte da área de estudo (Figura 6), nas imediações das bancadas do aterro e da planície de inundação do igarapé Auai Grande a cerca de 50 a 60 m e 17 a 60 m, respectivamente. As SEV 8 e 10 foram executadas sobre terrenos de solos areno-argilosos, enquanto a SEV 9 foi efetivada em solos areno-argilosos a argilo-arenosos. Ressalta-se que a profundidade máxima de leitura atingida para a SEV 9 foi de 18 m. As curvas apresentaram características similares às do subgrupo 2A, com dois comportamentos: (a) ascendente – ρ_a na faixa de 471 a 11.040 Ω .m e com profundidades variando de 1 a 7,5 m; e (b) descendente – ρ_a com valores de 7.811 a 72 Ω .m e profundidades em torno de 3,2 a 24 m.

As profundidades de investigações e os valores de resistividade das sondagens merecem destaque. A SEV 8 apresenta ρ_a de 398 a 619 Ω .m nas profundidades de 18 a 24 m e a SEV 9 evidencia os valores de 265 a 376 Ω .m, a 10 a 18 m. A SEV 9 tem uma peculiaridade em relação às demais: a partir de 7,5 m de profundidade, há queda abrupta de resistividade de 10.379 para 265 Ω .m. A SEV 10 se sobressai em relação às outras sondagens por exibir valores menores de resistividade, de 72 a 700 Ω .m nas profundidades de 10 a 24 m.

Subgrupo geoeletrico 2C

Trata-se do subgrupo que compreendeu cinco sondagens elétricas verticais efetuadas nas porções noroeste (SEV 1 a 3) e nordeste (SEV 12 e 13) (Figuras 6 e 8C) da área estudada. Os terrenos superficiais demonstraram texturas arenosas a areno-argilosas e presenças pontuais de concreções lateríticas ferruginosas *in situ*. Os levantamentos deste subgrupo apontaram três geometrias distintas (Figura 8C):

- Côncava (SEV 2, 12 e 13): valores na faixa de $2.000 \leq \rho_a \leq 14.000 \Omega$.m;
- Levemente côncava e descendente (SEV 3): a concavidade está restrita às profundidades de 1 a 3,2 m e ρ_a entre 12.958 a 14.069 Ω .m. A descendência

nas profundidades superiores está a 3,2 m, atingindo ρ_a de 1.391 $\Omega.m$;

- c) Fortemente côncava e descendente (SEV 1): a concavidade é limitada ao intervalo de 1 a 3,2 m de

profundidade, com ρ_a de 13.841 a 5.756 $\Omega.m$. A partir de 3,2 m, o gráfico ascensionna até 27.048 $\Omega.m$; de 4,2 a 24 m, a descendência alcança valores de ρ_a de 1.897 $\Omega.m$.

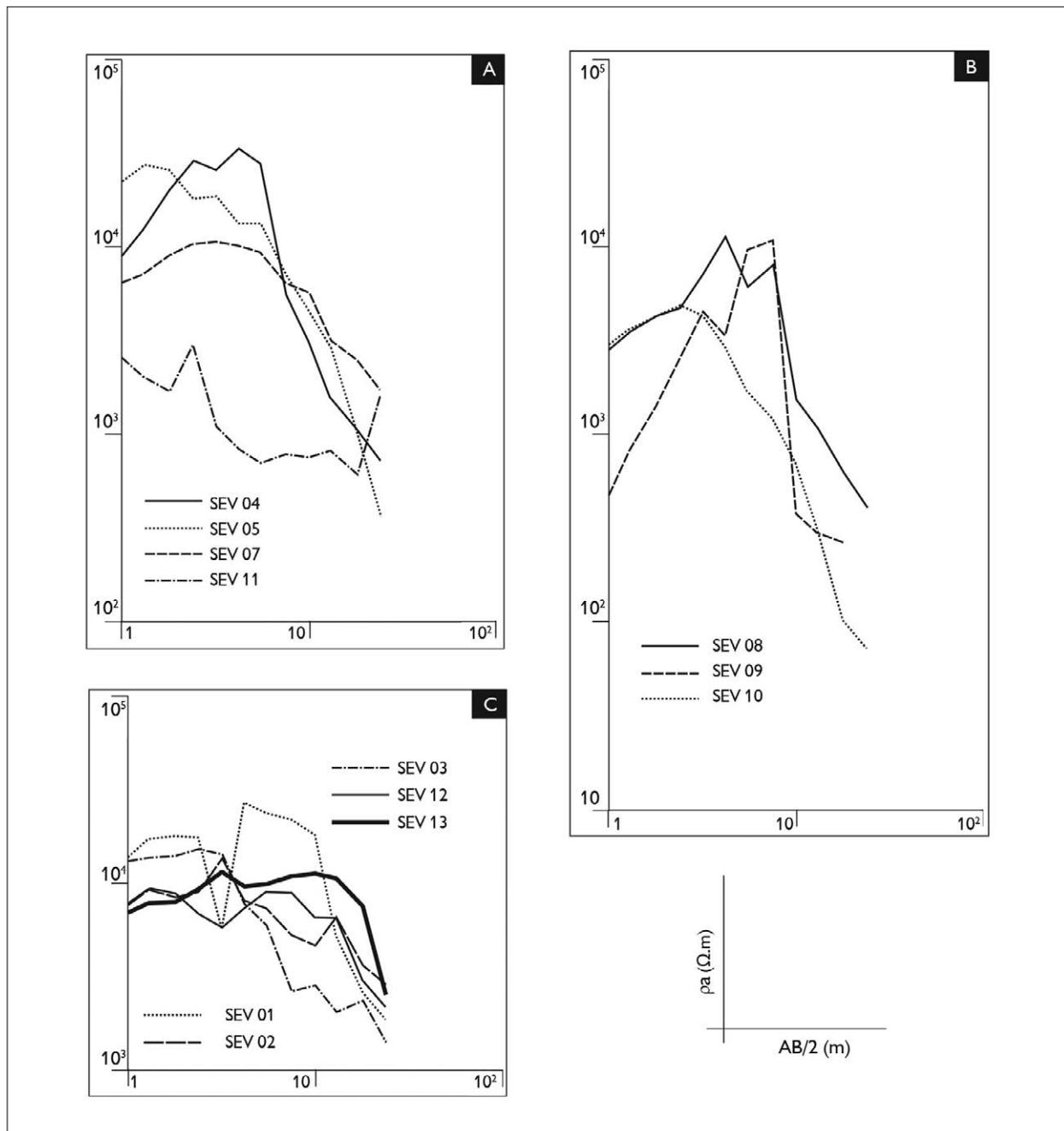


Figura 8. Curvas de resistividade aparente do grupo geoeletrico 2: A) subgrupo 2A; B) subgrupo 2B; C) subgrupo 2C.

AMBIENTAÇÃO GEOELÉTRICA

A configuração elétrica distinguida para área do aterro sanitário de Boa Vista obedeceu a parâmetros amplamente difundidos na literatura (Parasnis & Orellana, 1970; Kearey *et al.*, 2009; Bortolin & Malagutti Filho, 2010; Braga, 2016), sendo as altas resistividades elétricas atribuídas a tipos litológicos arenosos, enquanto que as baixas são atribuídas aos argilosos. Segundo Gallas *et al.* (2005), Lago *et al.* (2006), Bortolin & Malagutti Filho (2010) e Souza *et al.* (2017, 2018), em áreas contaminadas, por exemplo em aterros sanitários, a resposta elétrica do material geológico tende a diminuir bruscamente, com registro de valores de resistividade até dez vezes menores do que o normal.

As resistividades elétricas do grupo geoeletrico 1 apontaram valores entre 723 a 29.940 $\Omega.m$. Para Parasnis & Orellana (1970) e Kearey *et al.* (2009), os materiais arenoso e argiloso denotam, respectivamente, resistividade elevada e baixa. Com base nesta premissa, é possível deduzir que os valores de resistividade obtidos para este grupo possivelmente refletem os depósitos fluviais provenientes das planícies de inundação do igarapé Auai Grande, visto que, segundo Grotzinger & Jordan (2013), os sedimentos finos são carregados por toda a área de uma planície e depositados à medida que as águas recuam, o que foi amplamente verificado na área pesquisada.

Nas SEV 14, 17, 19 e 21, foi possível reconhecer camadas argilosas entre os sedimentos arenosos, sendo que a camada argilosa está alocada em maiores profundidades na SEV 17, entre 18 e 24 m, não sendo possível observar sua espessura total. As SEV 15, 20 e 22 possuem forte intercalação de sedimentos argiloso e arenoso, devido à proximidade com a planície de inundação do igarapé Auai Grande, pois estão sujeitas, localmente, à variação da sazonalidade (Figura 2). As SEV 18, 25 e 26 exibem camadas argilosas mais espessas, se comparadas às demais sondagens do grupo 1. As SEV 6, 16, 23 e 24 indicaram litologias predominantemente arenosas a areno-argilosas. A baixa quantidade de argila nestes pontos de sondagens pode sugerir antigas cicatrizes deixadas pelas planícies de

inundação do igarapé. Assim, foi possível distinguir vestígios da atuação dessas planícies na área de estudo, tendo em vista a associação dos dados de resistividade elétrica e dos materiais geológicos pertinentes à Formação Boa Vista. Desse modo, o ensaio geofísico permitiu contextualizar localmente quatro zonas de resistividades distintas, sendo cada uma representativa de um tipo litológico específico, característico desta formação: arenosos ($30.000 \leq \rho_a \leq 10.000 \Omega.m$), areno-argilosos ($10.000 \leq \rho_a \leq 5.000 \Omega.m$), argilo-arenosos ($5.000 \leq \rho_a \leq 1.000 \Omega.m$) e argilosos ($1.000 \leq \rho_a \leq 700 \Omega.m$).

Segundo Reis *et al.* (2003) e Riker (2005), os arenitos e os argilitos são as rochas predominantes em razão de a área de estudo estar assentada sobre a Formação Boa Vista. Há inúmeros estudos que tratam do comportamento elétrico de materiais geológicos, a exemplo de Parasnis & Orellana (1970), Kearey *et al.* (2009), Braga (2016), Bortolin & Malagutti Filho (2010), Souza *et al.* (2013), os quais geralmente associam areia e argila às leituras resistiva e condutiva, respectivamente. Estas leituras sofrem modificações quando associadas a contaminantes. Em áreas de aterros sanitários, os contaminantes associados ao chorume, reduzem significativamente a resistividade, pois favorecem a condução de corrente elétrica por serem muito ricos em íons (Gallas *et al.*, 2005). Isso ocorre devido ao fato de o chorume ser intensamente poluidor, atacando os metais contidos nos resíduos (cádmio, chumbo, alumínio e mercúrio), liberando íons que se aglomeram aos materiais geológicos (Christensen *et al.*, 2001; Bortolin & Malagutti Filho, 2010). Assim, os ensaios eletrorresistivos característicos do subgrupo 2A exibem situações condizentes com contaminações relacionadas ao chorume, pois possuem resistividades extremamente baixas, que chegam até 36 $\Omega.m$ em materiais predominantemente argilosos.

As SEV 7 e 11 denotaram as zonas mais condutivas, limitadas a noroeste pelos depósitos aluvionares – oriundos, essencialmente, da planície de inundação do igarapé Auai Grande – e a nordeste pelo relevo da região. Esta situação configura uma trapa natural, pois pode estar limitando

a dispersão dos contaminantes. Porém, os valores de contaminação para as SEV 4 e 5 estão limitados pelas porções mais superficiais do aterro, não ultrapassando 8 m de profundidade. Logo, os contaminantes concentram-se nas regiões mais profundas, com valores de resistividade que não ultrapassam 75 Ω .m. O comportamento inicial ascendente da resistividade característico das SEV 4 e 5 pode estar relacionado à variação de sedimentos predominantemente areno-argilosos insaturados em contaminantes, enquanto que a descendência é vinculada à variação de materiais areno-argilosos a argilo-arenosos saturados em contaminantes. As SEV 7 e 11 apresentam contaminação ao longo de todas as profundidades investigadas, ressaltando-se que esta concentração é mais evidente nos materiais argilo-arenosos.

De modo geral, a contaminação migra para as camadas inferiores, pois a característica arenosa e, conseqüentemente, porosa, possibilita a percolação do chorume. Além disso, a proximidade das sondagens (SEV 4, 5, 7 e 11) com as bancadas do aterro (cerca de 5 a 30 m) permitiu mensurar os valores baixos de resistividade, uma vez que a disposição do chorume tende a se concentrar nas áreas de descarte dos resíduos sólidos, visto que os valores de resistividade diminuem consideravelmente até dez vezes em relação ao que é considerado como normal (Souza *et al.*, 2018). Em vista disso, a região do subgrupo 2A comporta-se como uma típica área relacionada à pluma de contaminação do chorume ($250 \leq \rho_a \leq 36 \Omega$.m) proveniente do aterro. Desse modo, este subgrupo exibe valores com parâmetro total de ρ_a entre 36 a 3.312 Ω .m, os quais são discrepantes ao serem comparados aos ensaios do grupo geoeletrico 1 (723 e 29.940 Ω .m).

A geomorfologia da área de estudo apresenta extensas superfícies aplainadas, com altitudes variando de 80 a 160 m e com suaves declividades (Beserra Neta & Tavares Junior, 2008). A altimetria denota cotas de 80 m para o aterro e 70 m para o norte do igarapé Auá Grande. Portanto, a contextualização geofísica do subgrupo geoeletrico 2B em associação à geomorfologia da área

permitiu ponderar que este desnível, ainda que suave, pode permitir a migração dos fluidos (contaminados ou não), que, por sua vez, foram relacionados à contaminação por chorume. Isso foi confirmado por meio dos dados geofísicos, pois, no intervalo das cotas altimétricas, as resistividades do subgrupo geoeletrico 2B são tão baixas quanto as do 2A, sendo, entretanto, pouco acentuadas.

A migração do chorume é facilitada pela ação gravitacional e pelos terraços aluvionares das planícies de inundação do igarapé Auá Grande. As sondagens 8 e 9 estão intrinsecamente ligadas a essas planícies, permitindo concluir que os valores de resistividade mais baixos na SEV 9 (265 Ω .m) devem-se à sua proximidade com as mesmas. As planícies funcionam como meio de transporte para o chorume, principalmente em períodos chuvosos, pois o volume de água é mais expressivo, resultando em maior carreamento de areia em áreas de planícies (Suguio, 1980; Grotzinger & Jordan, 2013) e, conseqüentemente, em percolação e dispersão dos contaminantes. Nos períodos de inverno, a difusão da pluma torna-se mais intensa, por conta da oscilação do nível do lençol freático, uma vez que no período de estiagem ele varia em torno de 1,35 a 4 m (Ávila, 2007; Souza & Carvalho, 2017b). A soma dessas condições sazonais proporciona o aumento no volume de chorume em direção ao igarapé. Salienta-se que a SEV 10 pode representar o estágio mais avançado de migração em decorrência de possuir o menor valor de resistividade entre os ensaios do subgrupo 2A (72 Ω .m, a 24 m de profundidade), sugerindo que a pluma se estende, preferencialmente, na direção desta sondagem. Portanto, o subgrupo 2B foi denominado de zona de migração do chorume ($250 \leq \rho_a \leq 36 \Omega$.m).

A associação de características geomorfológicas, geológicas e geofísicas da área possibilitou dimensionar os limites da pluma de contaminação do aterro. O limite nordeste foi estabelecido utilizando-se cotas altimétricas, e o noroeste, por meio de materiais provenientes dos depósitos fluviais das planícies de inundação do igarapé Auá Grande. As cotas altimétricas da porção nordeste

consistem no intervalo de 75 a 78 m, e da noroeste, de 71 a 72 m. Esta diferença de 3 a 7 m foi um dos fatores cruciais na delimitação da pluma, haja vista que qualquer fluido sob a ação da gravidade tende a migrar para as porções mais baixas do relevo (Munson *et al.*, 2004; Halliday *et al.*, 2009) e, no caso do presente estudo, para a porção nordeste da área pesquisada. A planície de inundação do igarapé restrita à porção noroeste foi o outro elo que limitou a pluma. Os valores de resistividade foram mais altos para a região noroeste (1.391 a 27.048 $\Omega.m$) do que para nordeste (2.171 a 11.002 $\Omega.m$). A alta resistividade implica o surgimento de porções arenosas (Paranis & Orellana, 1970), logo, a região noroeste estudada funciona como o limite oposto da pluma, devido ao fato de ser predominantemente arenosa e, conseqüentemente, resistiva. Os valores de resistividade exibidos pelos limites não podem ser relacionados a contaminantes, uma vez que, entre todas as outras leituras resistivas do grupo geoeletrico 2, estas são extremamente superiores. Portanto, o relevo e a planície de inundação serviram como trapa natural do chorume, nomeando, assim, o subgrupo 2C de zona limitante do chorume.

MODELO HIPOTÉTICO DE CONTAMINAÇÃO

O modelo hipotético para a área do aterro sanitário de Boa Vista pôde ainda ser dimensionado por meio do mosaico de isovalores, o qual demonstrou a distribuição lateral de resistividade em sete níveis de investigações, apontando onde estão as zonas resistivas ($30.000 \leq \rho_a \leq 10.000 \Omega.m$) e as condutivas ($700 \leq \rho_a \leq 36 \Omega.m$). Constatou-se que as porções anômalas condutivas ocorrem sob os depósitos de resíduos sólidos, com dispersão pronunciada nas profundidades entre 7,5 e 24 m. Entre os níveis de 1,3 a 4 m, são verificadas pequenas faixas condutivas, sugerindo que os contaminantes lixiviam e percolam entre as rochas porosas (arenitos) nas profundidades mais rasas. De acordo com o aumento de profundidade, de 7,5 a 24 m, tais contaminantes tendem a se acumular em subsuperfície, quando encontram materiais mais

argilosos que permitam isso, constituindo, assim, a pluma de contaminação do chorume. É importante enfatizar que a pluma é concordante com as áreas mais rebaixadas referentes ao igarapé Auaí Grande, sugerindo concentração nas porções noroeste, norte e nordeste, e migração para nordeste da área de estudo (Figura 9).

CONCLUSÃO

O estudo geofísico executado no aterro sanitário municipal de Boa Vista, no estado de Roraima, tendo em vista a situação ambiental, identificou dois ambientes geoeletricos. Dessa forma, os ensaios eletrorresistivos associados ao grupo geoeletrico 1 (áreas adjacentes ao aterro) nas porções norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste e oeste permitiram divagar sobre o comportamento elétrico e associá-lo ao contexto litológico pertinente à Formação Boa Vista: materiais arenosos ($30.000 \leq \rho_a \leq 10.000 \Omega.m$), areno-argilosos ($30.000 \leq \rho_a \leq 10.000 \Omega.m$), argilo-arenosos ($5.000 \leq \rho_a \leq 1.000 \Omega.m$) e argilosos ($1.000 \leq \rho_a \leq 700 \Omega.m$). Estes parâmetros serviram de base para estabelecer a diferença entre as zonas contaminadas e as não contaminadas através da discrepância de valores ($36 \leq \rho_a \leq 700 \Omega.m$).

As zonas contaminadas perfazem a porção norte, nordeste e noroeste da área, sendo distinguidas como grupo geoeletrico 2 (subgrupos 2A, 2B e 2C). No subgrupo 2A, as anomalias condutivas ($36 \leq \rho_a \leq 250 \Omega.m$) foram caracterizadas como pertencentes à pluma de contaminação do chorume. A proximidade com as bancadas de descarte de resíduos sólidos foi um dos fatores que propiciou a aglomeração dos contaminantes em subsuperfície, sugerindo migração para as camadas inferiores, por conta da porosidade do material arenoso e pelo potencial gravitacional da área investigada. Nas maiores profundidades (18 a 24 m), os resíduos acumularam-se nas camadas predominantemente argilas.

No subgrupo 2B, correspondente à porção norte e referente ao entorno do aterro, as zonas condutivas ($250 \leq \rho_a \leq 500 \Omega.m$) foram relacionadas à zona de

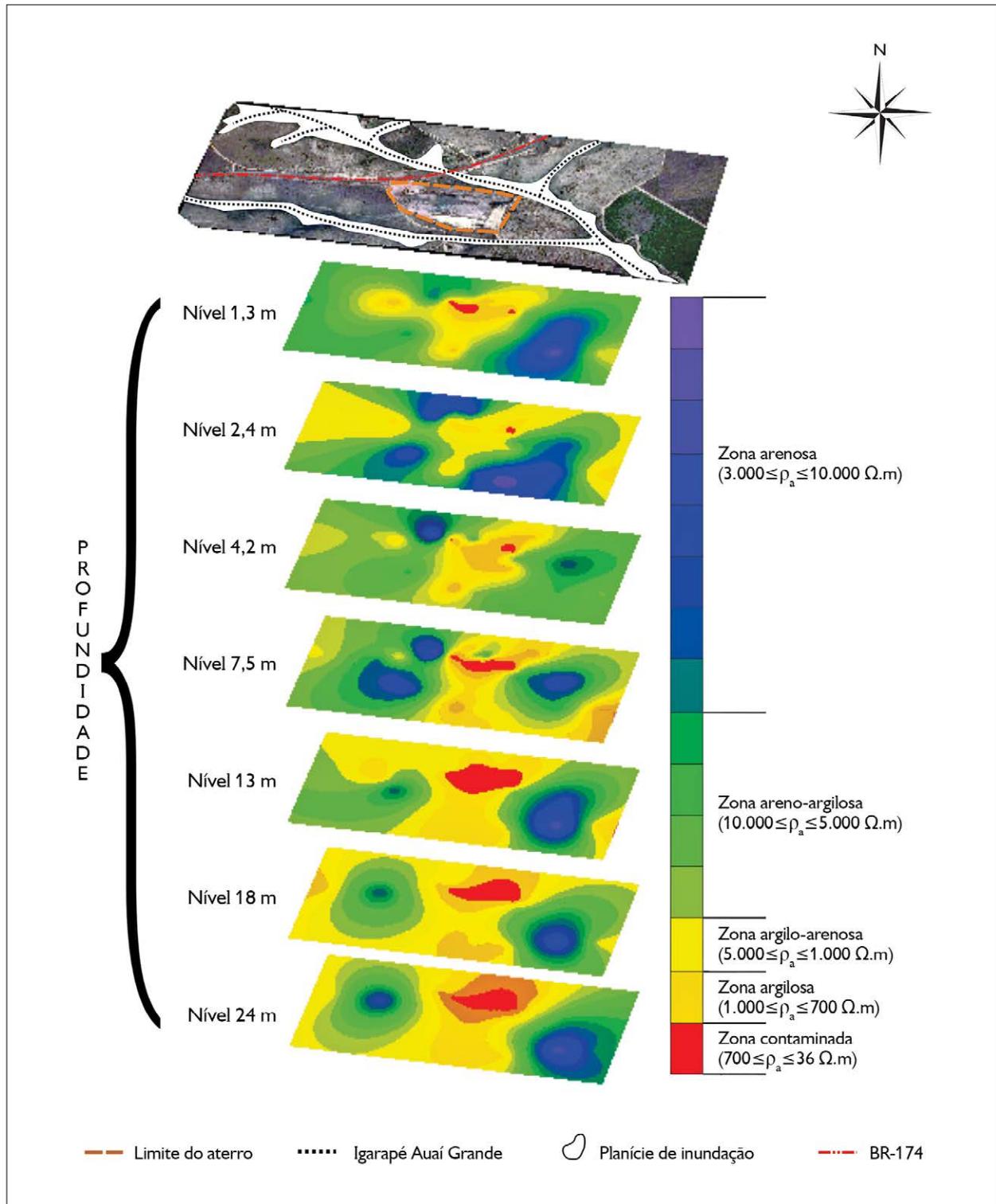


Figura 9. Modelo hipotético da contaminação do aterro sanitário municipal de Boa Vista, em Roraima.

migração do chorume, influenciada, principalmente, pela oscilação do lençol freático (em torno de 4 m) e pelas diferenças altimétricas de aproximadamente 10 m entre o aterro e a porção norte do igarapé Auai Grande. O fluxo preferencial de migração é para nordeste, com direção à porção norte do igarapé. Desse modo, esta porção é afetada diretamente pelos contaminantes produzidos pelo aterro, permitindo uma interligação destes pelo fluxo subterrâneo.

Os subgrupos 2A e 2B estão limitados pelo subgrupo 2C, considerado como trapa natural aos contaminantes (zona limitante do chorume), influenciados pelo relevo (limite a nordeste, $2.000 \leq \rho_a \leq 7.000 \Omega.m$) e pelas planícies de inundação (limite a noroeste, $1.300 \leq \rho_a \leq 5.000 \Omega.m$) do igarapé. Na porção sul do igarapé Auai Grande não foram identificadas anomalias condutivas, o que sugere que os contaminantes não migram para esta porção por permanecerem na mesma cota altimétrica do aterro.

De acordo com as Normas Brasileiras, NBR 8.419/92 (ABNT, 1992) e NBR 13.896/97 (ABNT, 1997), todo projeto de aterro sanitário deve seguir rígidos critérios de segurança e de monitoramento, que, quando ignorados, podem ocasionar problemas irreversíveis ao meio ambiente e, conseqüentemente, à sociedade. Para assegurar adequadas instalação e operação de um aterro, são estabelecidas exigências quanto à sua localização, avaliando-se a possível influência deste espaço na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas próximas. As NBR ditam as condições mínimas de proteção adequada das coleções hídricas superficiais e subterrâneas adjacentes.

O projeto, a implantação e a operação do aterro sanitário municipal de Boa Vista são, contudo, inapropriados, pois a localização de um aterro deve estar no mínimo a uma distância de 200 m de qualquer corpo hídrico, o que não é vigente na área em apreço, visto que o aterro dista aproximadamente 100 m do igarapé Auai Grande, sendo construído na bifurcação deste corpo hídrico. Cabe salientar que este igarapé deságua no principal rio do estado de Roraima (rio Branco), o maior abastecedor do município

boavistense, podendo acarretar em impacto ambiental em escala local e, futuramente, regional.

A integralização da geologia à hidrogeologia (fluxo subterrâneo) e à física (efeito gravitacional) permitiu ponderar a disposição e a migração dos contaminantes na área. Ressalte-se que o ensaio eletrorresistivo tem baixo custo operacional e precisão imediata de resposta.

É de vital importância a elaboração, a implementação, a operacionalização e o monitoramento das etapas do plano de gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo o controle de disposição final ambientalmente adequado dos rejeitos, além da implantação de um sistema de monitoramento (piezômetros) para verificação de escape de gases. Considere-se que, quanto mais elevado for o depósito (células de deposição de resíduos), maior será a pressão sobre a migração desses fluidos residuais no sentido do fluxo das águas subterrâneas. Cabe ao poder público minimizar, corrigir e/ou neutralizar o dano ao meio ambiente, por meio da gestão dos resíduos e de medidas mitigatórias. Vale enfatizar que o levantamento e o monitoramento geofísico auxiliam na identificação dos focos de contaminação e no acompanhamento da evolução da pluma, de modo a facilitar a remediação da área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Geociências, da Universidade Federal do Amazonas, em nome do professor Dr. João da Silva Carvalho, por ceder o resistivímetro. À professora Ma. Lorena M. Feitoza e aos graduandos Ana P. Gauger, Fernando Guareschi, Franklin W. S. Carvalho e Thiago F. Soares, do curso de Geologia, da Universidade Federal de Roraima, pelo auxílio nas etapas de campo.

REFERÊNCIAS

ALI, H. O. & R. J. WHITELEY, 1981. Gravity exploration for groundwater in the Bara basin, sudan. *Geoexploration* 19(2): 127-141. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0016-7142\(81\)90025-9](https://doi.org/10.1016/0016-7142(81)90025-9)>.

ANDRADE, G. G., 2015. *Caracterização geolétrica do aterro sanitário do município de Boa Vista/RR*: 1-16. Relatório de Iniciação Científica. Universidade Federal de Roraima, Boa Vista.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1992. **NBR 8.419**: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: 1-7. ABNT, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1997. **NBR 13.896**: aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação: 1-12. ABNT, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2004. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação: 1-71. ABNT, Rio de Janeiro.
- ÁVILA, I. C. S. S., 2007. **Caracterização preliminar do subsolo da área urbana de Boa Vista-RR, a partir de sondagens de simples reconhecimento**: 1-91. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Roraima, Boa Vista.
- BESERRA NETA, L. C. & S. S. TAVARES JUNIOR, 2008. Geomorfologia do estado de Roraima por imagens de sensores remotos. In: P. R. F. SILVA & R. S. OLIVEIRA (Org.): **Roraima 20 anos**: as geografias de um novo estado: 168-192. EdUFRR, Boa Vista.
- BORTOLIN, J. R. M. & W. M. MALAGUTTI FILHO, 2010. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental** 15(4): 367-374. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000400009>>.
- BRAGA, A. C. O., 2016. **Geofísica aplicada**: métodos geoeletricos em hidrogeologia: 1-159. Oficina de Texto, São Paulo.
- CARRASQUILA, A., L. RIJO & M. PORSANI, 1991. Estudo geofísico regional das águas subterrâneas na Ilha do Marajó-Pará. **Revista Brasileira de Geofísica** 9(2): 187-197. DOI: <<http://dx.doi.org/10.22564/rbgef.v9i2.1110>>.
- CELERE, M. S., A. S. OLIVEIRA, T. M. B. TREVILATO & S. I. SEGURA-MUÑOZ, 2007. Metais presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública. **Cadernos de Saúde Pública** 23(4): 939-947. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-311X2007000400021>>.
- CHRISTENSEN, T. H. L., P. KJELDSEN, P. L. NJERG, D. L. JENSEN, J. B. CHRISTENSEN, A. BAUN, H. ALBRECHSTEN & G. HERON, 2001. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry** 16(7-8): 659-718. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)>.
- ELIS, V. R. & L. V. ZUQUETTE, 2002. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Geociências** 32(1): 119-134.
- FALCÃO, M. T., A. I. C. BUÁS, M. N. PINHEIRO & S. K. S. OLIVEIRA, 2012. Implicações ambientais decorrentes das atividades urbanas em uma microbacia no município de Boa Vista-Roraima. **Revista Geonorte** 3(4): 199-207.
- GALLAS, J. D. F., F. TAIOLI, S. M. C. P. D. SILVA, O. G. W. COELHO & P. S. G. PAIM, 2005. Contaminação por choro e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica** 23(1): 51-59. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2005000100005>>.
- GEISSLER, P. E., 1989. Seismic reflection profiling for ground water studies in Victoria, Austrália. **Geophysics** 54(1): 31-37. DOI: <<https://doi.org/10.1190/1.1442574>>.
- GROTZINGER, J. & T. H. O. JORDAM, 2013. **Para entender a Terra**: 6. ed.: 1-694. Ed. Bookman, Porto Alegre.
- HALLIDAY, D., R. RESNICK & J. WALKER, 2009. **Fundamentos da Física**: gravitação, ondas e termodinâmica: 8. ed.: v. 2: 1-312. Editora LTC, Rio de Janeiro.
- HASSELSTRÖM, B., 1969. Water prospecting and rock-investigation by the seismic refraction method. **Geoexploration** 7(2): 113-132. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0016-7142\(69\)90026-X](https://doi.org/10.1016/0016-7142(69)90026-X)>.
- KEAREY, P., M. BROOKS & I. HILL, 2009. **Geofísica de exploração**: 1. ed.: 1-438. Oficina de Textos, São Paulo.
- KORF, E. P., E. F. R. Q. MELO, A. THOMÉ & P. A. V. ESCOSTEGUY, 2008. Retenção de metais em solo da antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Passo Fundo-RS. **Revista de Ciências Ambientais** 2(2): 43-60. DOI: <<http://dx.doi.org/10.18316/119>>.
- LAGO, A. L., V. R. ELIS & H. L. GIACHETI, 2006. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica** 24(3): 357-374. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300005>>.
- MOURA, H. P. & W. MALAGUTTI FILHO, 2003. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro-SP. **Geociências** 22 (n. especial): 129-139.
- MOURA, H. P., M. J. OLIVEIRA, R. J. V. SACASA, J. M. L. ROSÁRIO, W. MALAGUTTI FILHO, F. A. F. SOUTO & J. R. C. NERY, 2007. Emprego da sondagem elétrica vertical com o método da eletrorresistividade no estudo do lixo de Macapá-AP. **Geociências** 26(3): 279-286.
- MUNSON, B. R., D. F. YOUNG & T. H. OKIISHI, 2004. **Fundamentos da mecânica de fluidos**: 4. ed.: 1-582. Editora Edgard Blucher, São Paulo.
- NUNES, L. P. M. & J. G. LUIZ, 2006. Caracterização geoeletrica de área de curume localizada no Distrito Industrial de Icoaraci, Belém-Pará. **Revista Brasileira de Geofísica** 24(4): 467-481. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400002>>.
- ORELLANA, E., 1972. **Prospeccion geoeletrica en corriente continua**: 1-523. Paraninfo, Madrid.

- PARASNIS, D. S., 1971. **Geofísica mineral**: 1-375. Ed. Paraninfo, Madrid.
- PARASNIS, D. S. & E. ORELLANA, 1970. **Princípios de geofísica aplicada**: v. 1: 1-208. Ed. Paraninfo, Madrid.
- REIS, N. J., L. M. FRAGA, M. S. G. FARIA & M. E. ALMEIDA, 2003. Geologia do estado de Roraima, Brasil. **Geologie de La France** (2-4): 121-134.
- RIKER, S. R. L., 2005. **Argilas da região de Boa Vista – Roraima**: mineralogia, geoquímica e aplicação tecnológica: 1-204. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus.
- SCHALCH, V., 1992. **Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia**: 1-220. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo/Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- SOUZA, L. S. B., 2005. **Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus (AM) - utilizando Perfilagem Geofísica de Poço e Sondagem Elétrica Vertical**: 1-84. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- SOUZA, L. S. B., 2010. **Evidências tectônicas no leste da ilha do Marajó**: integração de dados morfoestruturais e geofísicos: 1-202. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SOUZA, L. S. B. & O. VERMA, 2005. Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus/AM (zonas norte e leste) através de perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. **Revista de Geologia (Fortaleza)** 18(2): 227-243.
- SOUZA, L. S. B., D. F. ROSSETTI & V. R. ELIS, 2013. Neotectonics in Marajó Island, state of Pará (Brazil) revealed by vertical electric sounding integrated with remote sensing geological data. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 85(1): 73-86. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652013000100006>>.
- SOUZA, L. S. B. & F. W. S. CARVALHO, 2017a. Comportamento elétrico do Sistema Aquífero Boa Vista na área do bairro Distrito Industrial Governador Aquilino Mota Duarte (Boa Vista/RR). **Anais do Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, 16: 1. Disponível em: <<http://www.abequa.org.br/anais2017>>. Acesso em: 1 novembro 2017.
- SOUZA, L. S. B. & F. W. S. CARVALHO, 2017b. Contextualização geológica da porção sudoeste do Sistema Aquífero Boa Vista, estado de Roraima, Brasil, a partir de sondagens elétricas verticais rasas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 12(1): 91-107.
- SOUZA, L. S. B., G. G. ANDRADE & G. R. MORAES, 2017. Geofísica rasa em área de despejo de resíduos sólidos, município de Caracaraí/RR. **Anais do Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário** 16: 1. Disponível em: <<http://www.abequa.org.br/anais2017>>. Acesso em: 1 novembro 2017.
- SOUZA, L. S. B. & J. D. S. PAZ, 2018. Geofísica ambiental pontual no Sistema Aquífero Boa Vista e aterro sanitário municipal, Boa Vista/RR. In: E. C. HOLANDA & L. BEZERRA (Org.): **Geociências de Roraima**: 2. ed.: v. 2: 259-283. Editora UFRR, Boa Vista.
- SOUZA, L. S. B., G. G. ANDRADE & G. R. MORAES, 2018. Um lixão sob o ponto de vista da geofísica rasa, município de Caracaraí, Roraima, Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste** 4(1): 21-41.
- SUGUIO, K., 1980. **Rochas sedimentares**: propriedades, gênese, importância e economia: 1-500. Blücher, São Paulo.
- TELFORD, W. M., L. P. GELDART & R. E. HERIFF, 1990. **Applied geophysics**: 2. ed.: 1-770. Cambridge University Press, Cambridge.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), [s. d.]. **EarthExplorer**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 1 novembro 2017.
- VERMA, O. P. & J. H. BISCHOFF, 1989. Laboratory and field studies of the application of electromagnetic prospecting for groundwater on Marajó Island, Brazil. **Geophysics** 54(1): 23-30. DOI: <<https://doi.org/10.1190/1.1442573>>.
- WANKLER, F. L., R. A. O. EVANGELISTA & C. SANDER, 2012. Sistema Aquífero Boa Vista: “estado de arte” do conhecimento e perspectivas. **ACTA Geográfica** 6(12): 21-39. DOI: <<https://doi.org/10.5654/actageo2012.0612.0002>>.