

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**EMPREGO DO MÉTODO DA ELETRO-RESISTIVIDADE NA
CARACTERIZAÇÃO DA LIXEIRA DE PORTO VELHO – RO
ASSENTADA EM MEIO FRATURADO**

ADEILTON FERNANDES DA COSTA

Rio Claro (SP)

2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**EMPREGO DO MÉTODO DA ELETRO-RESISTIVIDADE NA
CARACTERIZAÇÃO DA LIXEIRA DE PORTO VELHO – RO
ASSENTADA EM MEIO FRATURADO**

ADEILTON FERNANDES DA COSTA

Orientador: Dr. Walter Malagutti Filho

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE, *Campus* de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)
2008

551 Costa, Adeilton Fernandes da

C837e Emprego do método da eletro-resistividade na caracterização da área da
lixreira de Porto Velho – RO assentada em meio fraturado / Adeilton Fernandes
da Costa - Rio Claro: [s.n], 2008

128 f. : il., figs., gráf., tabs., fots.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências
e Ciências Exatas

Orientador: Walter Malagutti Filho

1. Geofísica. 2. Geofísica aplicada. 3. Depósito de resíduos sólidos urbanos.
4. Chorume. I. Título

*Dedico este trabalho aos meus pais Augusto e Adelzuita,
minha esposa Socorro, meu filho Ícaro e
minha filha Iuane.*

Agradecimentos

A DEUS por ter permitido mais um desafio e me dado força e coragem para continuar.

Ao meu pai pelo exemplo de homem e minha mãe pelas orações.

A CAPES pela bolsa concedida durante alguns anos.

Ao prof. Dr. Walter Malagutti Filho pela orientação e crédito em mim depositado.

Ao prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga, do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, pelas sugestões e correções no exame de qualificação, que contribuiu para melhora desta tese.

Ao prof. Dr. Jairo Roberto Jimenez Rueda, do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE/UNESP, pelas sugestões e correções no exame de qualificação e pela importante contribuição na análise estrutural da área de estudo.

Ao Sr. Waldison Dias Pinheiro, secretario da SEMUSP, pela autorização de acesso a área do deposito para realização dos estudos.

A Uedre, Aristeu e demais funcionários da SEMUSP, lotados na balança, pela atenção e disposição nas informações prestadas nas varias etapas de visitas ao deposito.

Ao seu Bahia, morador da Vila Princesa, pelos testemunhos sobre a lixeira e poços locais.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), sede de Porto Velho, pela disponibilidade do material sobre a lixeira.

Ao laboratório de Biogeoquímica da Universidade Federal de Rondônia – UNIR, pela ajuda na coleta das amostras das águas dos poços e nascentes.

Aos colegas Flávio Batista Simão, Antonio Cláudio, Siane, Antonio Melo Lisboa, Cezar Martinelli, Cesar Augusto Moreira e F^{co} Manoel Garcia Barreira (Paco), pelas contribuições prestadas.

Ao Departamento de Matemática da UNIR, pela liberação.

Ao INCRA, na pessoa do Sr. Paulo Roberto, por disponibilizar o memorial descritivo da área do deposito.

E todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, na concretização desta tese.

“Sem Ele eu não sou nada, mas com Ele eu posso todas as coisas através de Jesus Cristo, que me fortalece”

Filipenses 4:13

RESUMO

Ensaio geofísico de eletro-resistividade, através das técnicas da sondagem elétrica vertical e imageamento elétrico (configurações Schlumberger e dipolo-dipolo), foram executados na área da lixeira da cidade de Porto Velho, Estado de Rondônia, com o objetivo de identificar a contaminação do subsolo e das águas subterrâneas. A geologia sobre a qual está assentado o aterro de Porto Velho é constituída por sedimentos pleistoceno (argilo-arenosos com concreções lateríticas) assentados sobre rochas graníticas da Formação Santo Antônio. Os resultados mostraram que a aplicação dessas duas técnicas permite identificar locais de ocorrências dos resíduos, zonas de fraturas, diferentes litotipos do subsolo, fluxo das águas subsuperficiais e avaliar o impacto ambiental causado no meio ambiente.

Palavras chaves: Geofísica Aplicada, Geologia Ambiental, Eletro-resistividade, Resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

Resistivity survey, with vertical electrical sounding and electrical imaging (Schlumberger and dipole-dipole configurations), were done at the waste disposal area, in city of Porto Velho, state of Rondônia, Brazil with the objective to identify the contamination of the subsoil and groundwater. The local geology is constituted by pleistocenic sediments (clay-sandy litology with lateritic concretionary) overlies granitic rocks of Santo Antônio Formation. The results showed that integrating this geophysical techniques can identify places of occurrences of waste, fractures zones, different lithotypes the subsoil, underground flow and evaluate the environmental impact caused by the waste disposal.

Keywords: Applied geophysics, Environmental Geology, Resistivity method, Solid domestic wastes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Fluxograma metodológico da tese.....	15
Figura 2.1: Composição média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (ABRELPE, 2006)	17
Figura 2.2: Disposição final dos resíduos sólidos no Brasil (ABRELPE, 2007).....	18
Figura 2.3: Quantidade de RSU e coletados no Brasil em 2007(ABRELPE, 2007).....	19
Figura 2.4: Aquíferos: (A) Granular; (B) Cárstico; e (C) Fraturado (VALLEJO et al., 2002)....	25
Figura 3.1: Localização da lixeira de Porto Velho – RO (adaptado de KREBS et al, 1999 e RIZZOTTO, 2005)	31
Figura 3.2: Balanço hídrico mensal em Porto Velho - 1999 a 2006 (em mm/mês).....	32
Figura 3.3: Mapa geológico do município de Porto Velho (SOUZA, 2006).....	34
Figura 3.4: Mapa pedológico do município de Porto Velho (SOUZA, 2006).....	36
Figura 3.5: Estereograma com famílias de fraturas do maciço Santo Antônio.....	39
Figura 3.6: Unidades geológicas da área de estudo e entorno (adaptado de RIZZOTTO, 2005) .	40
Figura 3.7: Seção geológica proposta para a área do aterro de Porto Velho	42
Figura 3.8: Diagrama 3D com topografia e direção da drenagem superficial da lixeira.....	43
Figura 3.9: Unidades hidrogeológicas da lixeira e entorno (adaptado de RIZZOTTO, 2005)....	44
Figura 4.1: Métodos geofísicos de prospecção	53
Figura 4.2: Cilindro condutor.....	54
Figura 4.3: Fluxo de corrente de um eletrodo na superfície	55
Figura 4.4: Disposição dos eletrodos de corrente (<i>A</i> e <i>B</i>) e potencial (<i>M</i> e <i>N</i>).....	58
Figura 4.5: Ilustração de subsolo heterogêneo (modificado de BRAGA, 2006).....	59
Figura 4.6: Técnicas utilizadas nos métodos geoeletricos (modificado de BRAGA, 2001).....	61
Figura 4.7: Esquema de campo da técnica da SEV (BRAGA, 2001)	62
Figura 4.8: Esquema de campo da técnica do IE (BRAGA, 2001).....	63
Figura 4.9: Disposição do arranjo Schlumberger (modificado de ELIS, 1998)	65
Figura 4.10: Esquema da embreagem em curvas de SEV (BRAGA, 2001)	66
Figura 4.11: Disposição do arranjo dipolo-dipolo (modificado de ELIS, 1998).....	67
Figura 4.12: Plotagem do arranjo dipolo-dipolo proposta por Hallof apud Gandolfo (2007).....	68
Figura 4.13: Arranjo dipolo-dipolo para um levantamento bidimensional e a seqüência de medições usada para construir uma pseudo-seção de IE.....	70

Figura 4.14: Algumas curvas geolétricas (modificada de BRAGA, 2001)	73
Figura 4.15: Modelo de malha de uma pseudo-seção utilizada para inversão dos dados	76
Figura 5.1: Mapa dos lineamentos, com diagrama mostrando a direção das fraturas na lixeira ..	81
Figura 5.2: Localização das SEVs, IEs, poços e nascentes na área da lixeira de Porto Velho....	84
Figura 5.3: Localização das seções de resistividade na área da lixeira de Porto Velho	86
Figura 5.4: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 1, 2, 3 e 4	87
Figura 5.5: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 5, 6, 7 e 8	87
Figura 5.6: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 1, 5 e 6	87
Figura 5.7: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 2, 3, 5 e 9	88
Figura 5.8: Modelo geolétrico interpretado da SEV1	89
Figura 5.9: Modelo geolétrico interpretado da SEV2.....	90
Figura 5.10: Modelo geolétrico interpretado da SEV3	90
Figura 5.11: Modelo geolétrico interpretado da SEV4.....	91
Figura 5.12: Modelo geolétrico interpretado da SEV5	91
Figura 5.13: Modelo geolétrico interpretado da SEV6	92
Figura 5.14: Modelo geolétrico interpretado da SEV9	92
Figura 5.15: Modelo geolétrico interpretado da SEV7	93
Figura 5.16: Modelo geolétrico interpretado da SEV8	93
Figura 5.17: Mapa potenciométrico da área da lixeira	97
Figura 5.18: Seção geolétrica da linha de imageamento IE1	100
Figura 5.19: Seção geolétrica da linha de imageamento IE2.....	101
Figura 5.20: Modelo geolétrico interpretado da linha IE1	102
Figura 5.21: Modelo geolétrico interpretado da linha IE2.....	102
Figura 5.22: Localização das discontinuidades identificadas nos ensaios geofísicos	103

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1: Escoamento do chorume no solo da lixeira de Porto Velho - RO.....	20
Foto 3.1: Lixeira de Porto Velho - RO.....	45
Foto 3.2: Comunidade Vila Princesa.....	46
Foto 3.3: Lixo depositado na célula.....	47
Foto 3.4: Solo de cobertura extraído da formação de uma nova célula.....	47
Foto 3.5: Lixo depositado no vale, avançando à floresta.....	47
Foto 3.6: Nascentes NS1.....	48
Foto 3.7: Nascentes NS2.....	48
Foto 3.8: Sulco erosivo no talude de lixo em direção as nascentes.....	49
Foto 3.9: Queima dos gases na lixeira.....	50
Foto 3.10: Construção da célula para depósito do lixo hospitalar.....	50
Foto 3.11: Célula com lixo hospitalar pronta para isolamento.....	51
Foto 4.1: Equipamento <i>Terrameter</i> SAS 4000 utilizado nos ensaios.....	71
Foto 5.1: Execução da SEV1 sobre uma célula de resíduos.....	85
Foto 5.2: Linha de imageamento IE2 executada fora da lixeira.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição do chorume de aterros novos/antigos (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).....	21
Tabela 4.1: Avaliação de arranjos da eletro-resistividade quanto à resolução (WARD, 1990)	64
Tabela 4.2: Profundidade teórica de investigação para o arranjo Schlumberger.....	69
Tabela 4.3: Profundidade teórica de investigação para o arranjo dipolo-dipolo	69
Tabela 4.4: Profundidade de investigação em função de L , para o arranjo dipolo-dipolo.....	70
Tabela 5.1: Resultados das análises físico-químicos e bacteriológicos das amostras de água dos poços e nascentes, localizados na lixeira de Porto Velho	82
Tabela 5.2: Morfologia das curvas de resistividade das SEVs.....	89
Tabela 5.3: Modelo geoeétrico proposto para a área das SEVs do Grupo I.....	94
Tabela 5.4: Modelo geoeétrico proposto para a área das SEVs do Grupo II	95
Tabela 5.5: Cotas e profundidades da zona saturada, das SEVs, e NA, dos poços	96
Tabela 5.6: Profundidades teóricas obtidas nos imageamentos elétricos IE1 e IE2.....	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações Gerais.....	13
1.2	Justificativas.....	14
1.3	Objetivo da tese.....	14
1.4	Estrutura da tese.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Introdução.....	16
2.2	Resíduos sólidos e meio ambiente.....	16
2.2.1	Chorume.....	19
2.2.2	Solo como filtro natural.....	22
2.2.3	Hidrogeologia em meio fraturado.....	23
2.2.3.1	Água subterrânea e aquíferos.....	23
2.2.4	Métodos geoeletricos aplicados em aterros e aquíferos fraturados.....	26
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	30
3.1	Localização.....	30
3.2	Características regionais.....	30
3.2.1	Clima.....	30
3.2.2	Geologia.....	33
3.2.3	Pedologia e vegetação.....	35
3.2.4	Hidrogeologia.....	37
3.3	Características locais.....	38
3.3.1	Geologia.....	38
3.3.2	Pedologia e vegetação.....	41
3.3.3	Geomorfologia e hidrogeologia.....	42
3.4	Aspectos sociais e histórico da lixeira de Porto Velho.....	45
4	METODOLOGIA DE ESTUDO – CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	52
4.1	Introdução.....	52
4.2	Geofísica aplicada.....	52
4.3	Método geofísico da eletro-resistividade.....	54
4.3.1	Resistividade dos materiais.....	54

4.3.2 Método da eletro-resistividade.....	57
4.3.3 Técnicas de ensaios de campo	60
4.3.3.1 Generalidades.....	60
4.3.3.2 Sondagem elétrica vertical (1D).....	61
4.3.3.3 Imageamento elétrico (2D).....	62
4.3.4 Arranjos de campo	63
4.3.4.1 Arranjo Schlumberger – empregado na Sondagem Elétrica Vertical	64
4.3.4.2 Arranjo dipolo-dipolo – empregado no imageamento elétrico	67
4.3.4.3 Profundidade de investigação	69
4.3.5 Equipamentos utilizados nos ensaios	71
4.4 Interpretação dos dados geoeletricos	72
4.4.1 Interpretação quantitativa uni-dimensional	72
4.4.2 Interpretação quantitativa bi-dimensional	75
4.4.2.1 Método de inversão por mínimos quadrados com vínculo de suavidade.....	77
5 TRABALHOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	80
5.1 Introdução.....	80
5.2 Lineamentos estruturais	80
5.3 Análises físico-químicos e bacteriológicos	82
5.4 Ensaios geofísicos realizados na lixeira.....	83
5.4.1 Interpretação dos ensaios das sondagens elétricas verticais.....	86
5.4.1.1 Mapa potenciométrico	96
5.4.2 Interpretação dos ensaios dos imageamentos elétricos	97
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE.....	117
ANEXO	127

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O crescimento desordenado da maioria das cidades brasileiras nas últimas décadas requer cada vez mais a eficiência dos serviços públicos. Em Porto Velho – RO, como em outras cidades do Brasil, existem graves problemas relacionados com a falta de uma política de preservação ambiental adequada para a limpeza urbana. O lixo, resíduo sólido resultante da atividade das aglomerações humanas, é um desses problemas, o qual se tornou objeto desta pesquisa.

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado (art. 225 “caput” da Constituição Federal de 1988)” (MACHADO, 1994).

O lixo padece de alguns preconceitos culturais na sociedade, de rejeição e exclusão, que faz com que se busque afastá-lo dos olhos e da convivência. Pode ser visto como expressão do desperdício social resultante de um consumo desenfreado. Ele reflete a sociedade, sua cultura e seus valores. A situação mais dramática é a das pessoas que residem nas mediações de depósitos de resíduos sólidos urbanos (RSU), principalmente aquelas que sobrevivem do subproduto.

Ao fim da vida útil do depósito, dependendo do grau de contaminação do solo causada pelos resíduos soterrados, a área não poderá ser usada, de imediato, para determinados fins.

Esta contaminação ocorre por intermédio da percolação do chorume no solo, líquido gerado pela passagem da água através do lixo em processo de decomposição. O chorume possui elevada carga de poluentes orgânicos e inorgânicos que contamina, por lixiviação, as águas superficiais, podendo atingir as águas subterrâneas, comprometendo a qualidade da água e seu uso, influenciando negativamente a qualidade ambiental e a saúde da população.

Ao avaliar a contaminação de solos e águas subterrâneas, deve-se considerar, entre outros, aspectos de natureza geológica-geotécnica e hidrogeológica da área e as características dos poluentes, importantes na determinação de medidas de proteção, conservação e/ou recuperação desse meio.

Neste contexto, alguns métodos geofísicos aparecem como importantes ferramentas que possibilitam de maneira rápida e direta, encontrar subsídios sobre as condições geológicas e hidrológicas de áreas contaminadas pelo chorume.

1.2 Justificativas

Este estudo que aborda a problemática do depósito de resíduos sólidos urbanos (lixeira) de Porto Velho se justifica pelos seguintes motivos:

- A disposição do lixo é feita de forma inadequada desde o ano de 1993;
- No local residem aproximadamente 156 famílias;
- Por estar instalado em local que abriga áreas de nascentes;
- Pela disposição em vale de floresta parcialmente preservada;
- A lixeira estar assentada em meio fraturado;
- Por não haver dados e publicações acerca da contaminação do subsolo e lençol subterrâneo.

1.3 Objetivo da tese

O objetivo principal da pesquisa foi avaliar, a partir de técnicas geofísicas, a contaminação do subsolo e das águas subterrâneas, sob influência da lixeira de Porto Velho, assentada em maciço rochoso fraturado.

Para alcançar este objetivo foi necessária a integração conjunta das seguintes etapas:

- Complementar e adequar as informações geológicas da área de estudo;
- Estabelecer o comportamento estrutural;
- Determinar a direção do fluxo subterrâneo e contaminação;
- Determinar parâmetros físico-químicos e bacteriológicos das águas dos poços e nascentes locais;
- Estabelecer as áreas de concentração dos contaminantes;
- Caracterizar geofisicamente o comportamento dos materiais litológicos e células de lixo; e
- Auxiliar a locação de poços de monitoramento da pluma de contaminação.

1.4 Estrutura da tese

A seqüência metodológica adotada neste trabalho é apresentada na Figura 1.1. Inicialmente é apresentado as justificativas e objetivos da tese, seguido de uma revisão de literatura sobre Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e da aplicação dos métodos geoeletricos em aterros e aquíferos fraturados. Após a caracterização da área de estudo foi feita a descrição da metodologia geofísica utilizada, e finalmente, a exposição dos trabalhos realizados em campo, conclusões e recomendações para monitoramento da área.

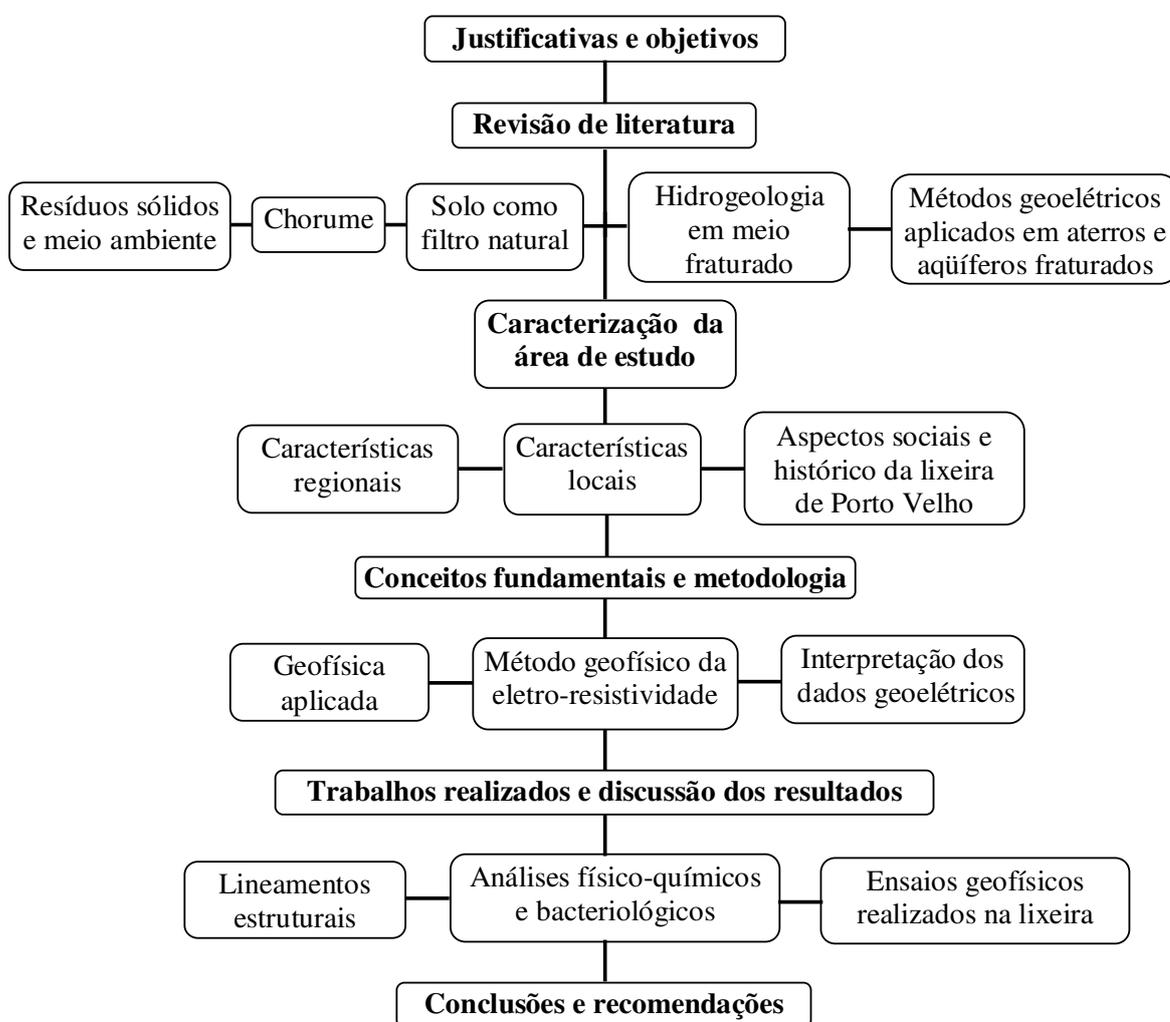


Figura 1.1: Fluxograma metodológico da tese

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta informações sobre os problemas causados pela contaminação do meio ambiente, com ênfase para o lixo e suas conseqüências no ar, solo, água subterrânea e aquíferos e, a aplicabilidade do método geofísico da eletro-resistividade na investigação da contaminação do subsolo, fundamentados em trabalhos realizados em áreas de depósitos de RSU.

2.2 Resíduos sólidos e meio ambiente

Segundo a norma brasileira NBR-10004/87 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, resíduos sólidos no Brasil pode ser definido como:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultem das atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, serviços e varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos, instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2004).

A disposição inadequada destes resíduos contamina o meio ambiente e, além de alterar o ecossistema traz sérios riscos à saúde humana. O lançamento de gases e materiais particulados aumenta o índice da poluição atmosférica e causa problemas respiratórios nos indivíduos; os líquidos produzidos pelo lixo contaminam o solo, subsolo, água superficial e subterrânea.

O problema da contaminação surgiu com o desenvolvimento industrial e tecnológico fruto da Revolução Industrial. A população começou a produzir quantidades de resíduos cada vez maiores, sem se preocupar com a forma de disposição e os impactos ambientais provocados. Nas últimas décadas, o rápido crescimento populacional e a urbanização acelerada resultaram na inadequada utilização dos recursos naturais e na degradação do meio ambiente (SANTOS, 2005).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE no Brasil se coleta aproximadamente 140.911 toneladas/dia de RSU,

com media nacional de produção de resíduos de aproximadamente 0.924 kg/hab/dia. A Figura 2.1 mostra a composição física (media) dos RSU no Brasil (ABRELPE, 2007).

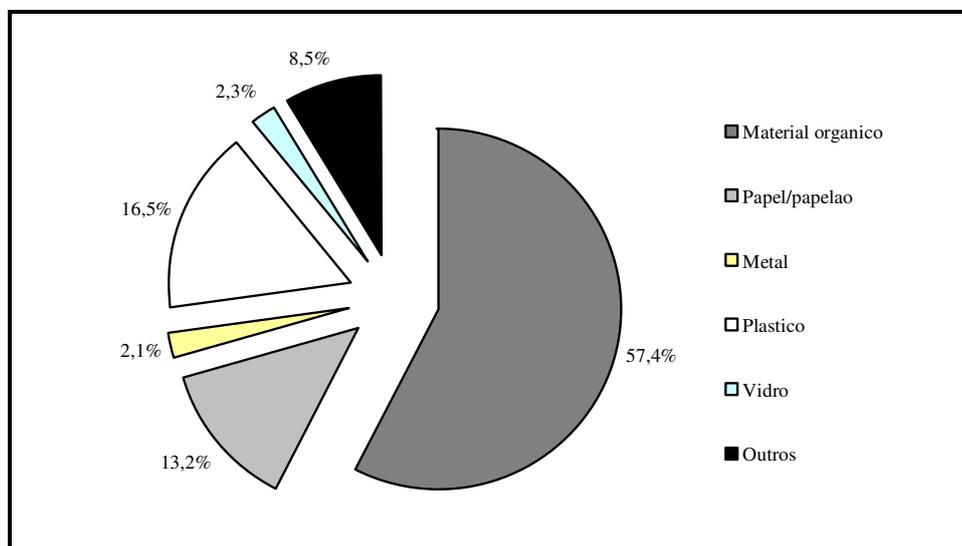


Figura 2.1: Composição média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (ABRELPE, 2006)

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (IPT, 2000) essa disposição ou aterramento do lixo sobre o solo (denominada aterro) é diferenciada, tecnicamente, em três tipos:

- **aterro sanitário**, depósito em que a disposição do lixo segue critérios de engenharia que permitem a confinação segura em termos de controle e poluição ambiental e proteção à saúde pública;
- **aterro controlado**, depósitos que foram convertidos a partir de lixões ou implantados segundo diretrizes de novos projetos, mas que não efetuaram a devida impermeabilização nem dispõem de sistemas efetivos para tratamento dos gases e chorume; e
- **lixão** (ou lixeira), depósito a céu aberto sem nenhum tipo de controle, os resíduos são lançados sem que sejam adotadas quaisquer das providências mínimas de proteção.

De acordo com a norma brasileira NBR-8419/92 o aterro sanitário deve ser instalado a pelo menos 200 metros de cursos d'água, respeitar a distância de 1,5 metro entre a superfície de destinação e a camada de lençol freático, estar em área livre de inundação e de fácil acesso. O solo deve ter baixa condutividade hidráulica e o nível d'água deve ser medido durante a época de maior precipitação pluviométrica da região. A arborização de entorno

adequada, para evitar erosões, espalhamento da poeira e retenção dos odores e para gases e percolados a instalação de sistemas de tratamento (ABNT, 1992).

No aterro controlado a forma de disposição produz, em geral, poluição localizada, pois similarmente ao aterro sanitário, a extensão da área de disposição é minimizada. Geralmente não é feita impermeabilização de base (comprometendo a qualidade das águas dos aquíferos), nem sistemas de tratamento de chorume e gases gerados. Este método é preferível ao lixão, mas, devido aos problemas ambientais que causa e aos seus custos de operação, a qualidade é inferior ao aterro sanitário.

A disposição de resíduos sólidos em lixões é uma forma inadequada que deve ser eliminada e substituída por uma política de gestão de resíduos, compreendendo um conjunto de práticas: coleta seletiva, reuso, reciclagem, incineração, compostagem e aterro sanitário. Para que estas práticas funcionem adequadamente, há necessidade do envolvimento consciente dos munícipes, que é alcançado mediante programas eficientes de educação ambiental (CAMPOS e PACHECO, 2003).

A produção de resíduos sólidos urbanos no Brasil é grave. A maioria dos municípios brasileiros não possui aterro sanitário, aproximadamente 61,4% utilizam aterros controlados e lixões, Figura 2.2.

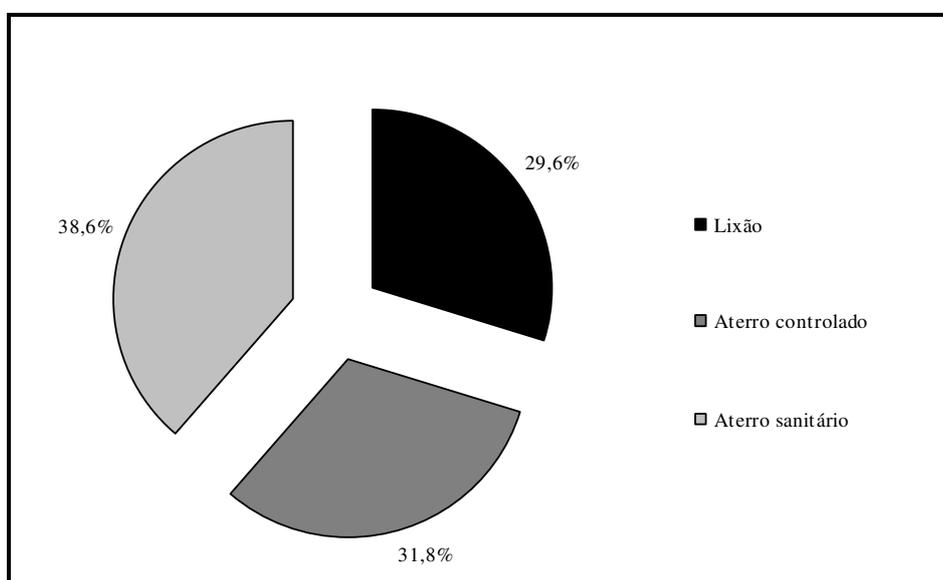


Figura 2.2: Disposição final dos resíduos sólidos no Brasil (ABRELPE, 2007)

Atualmente 10 milhões de toneladas de RSU deixam de ser coletadas tendo um destino absolutamente incerto e certamente inadequado. A Figura 2.3 mostra uma visão geral da situação brasileira de geração e coleta de RSU (ABRELPE, 2007).

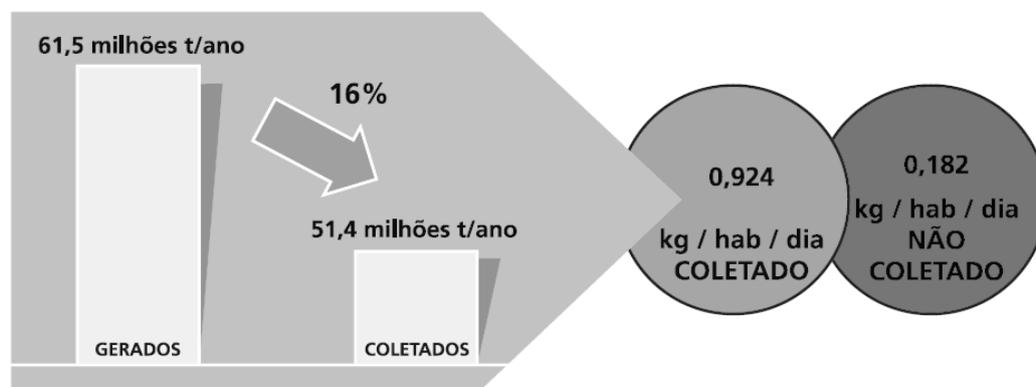


Figura 2.3: Quantidade de RSU e coletados no Brasil em 2007 (ABRELPE, 2007)

2.2.1 Chorume

A destinação final dos RSU é um dos principais problemas de saneamento básico que afetam a maioria das cidades. O alto custo de instalação e manutenção dos aterros sanitários, leva muitas das prefeituras adotarem procedimentos simples e de baixo custo, depositando de forma aleatória e inadequada o lixo sobre o solo, conduzindo à formação de enormes focos de contaminação, e uma das maiores preocupações é o chorume que, devido a seu poder contaminante, poderá atingir os lençóis subterrâneos.

O chorume, líquido escuro que contém alta carga poluidora, tem origem da umidade natural do lixo, da decomposição da matéria orgânica e das bactérias, existentes no lixo, que liberam enzimas responsáveis por dissolver a matéria orgânica na formação de líquido (SERAFIM, 2003).

Ao fim da disposição, o aterro continua a produzir chorume por cerca de 50 anos (ALMUZAINÉ, 1995). A Foto 2.1 apresenta o escoamento do chorume no solo da lixeira de Porto Velho – RO.

A contaminação por chorume advém da lixiviação e também do contato direto da célula do lixo com o solo subjacente, tendo-se então, a infiltração e percolação. Este percolado poderá formar uma pluma de contaminação no solo que poderá comprometer as águas subterrâneas. Sua disposição e evolução são determinadas pelas características do chorume e hidrogeologia local (GOMES, 1989).

O processo de decomposição do lixo é comandado por organismos decompositores de matéria orgânica. Pode ser dar por processo aeróbio ou anaeróbio.



Foto 2.1: Escoamento do chorume no solo da lixeira de Porto Velho - RO

A fase aeróbia ocorre durante o primeiro mês de deposição e recobrimento do lixo na célula. A ação de decomposição é realizada pelas bactérias aeróbias que utilizam o oxigênio presente no interior do aterro, dura de 10 a 100 dias após o aterramento dos resíduos. É mais intensa no início e conforme o oxigênio vai ficando escasso a decomposição se torna mais lenta. A presença de águas pluviais exerce grande influência sobre esta fase, pois facilita a redistribuição de nutrientes e microorganismos ao longo do aterro (GOMES, 1989).

Quando todo o oxigênio é consumido, inicia-se a fase anaeróbia, na qual a decomposição ocorre através dos organismos anaeróbios que hidrolisam e fermentam celulose e outros materiais presentes no resíduo. Esta fase, que pode demorar vários anos para se completar, é caracterizada pela redução da concentração de carbono orgânico, altos níveis de amônia e largo espectro de metais, representando considerável potencial de risco para o meio ambiente.

Diversos fatores contribuem para que o chorume seja complexo e apresente significativas variações em sua composição. Dentre os mais importantes contam-se a dinâmica de decomposição ao longo do tempo, variações na forma de operação do aterro sanitário, na composição dos resíduos depositados, no volume de chuvas e outras alterações climáticas.

O potencial de impacto do chorume está relacionado com a alta concentração de matéria orgânica, reduzida biodegradabilidade, presença de metais pesados e de substâncias recalcitrantes. Em sua fase ácida o chorume apresenta pH baixo e parâmetros como Carbono Orgânico Total (COT), metais pesados, nutrientes, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

e Demanda Química de Oxigênio (DQO) deverão ser altos. Na fase metanogênica o pH varia entre 6.5 e 7.5 e os valores de DBO, COT, DQO e nutrientes serão significativamente menores (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

A biodegradabilidade do chorume varia com o tempo e pode ser determinada pela relação DBO/DQO. Inicialmente essa relação é de aproximadamente 0.5 ou maior. Relações entre 0.4 e 0.6 são indicadores da melhor biodegradabilidade. Em aterros antigos, esta relação normalmente varia de 0.05 a 0.2. Quanto mais rica, em matérias orgânicas, forem as amostras analisadas, maiores serão os índices na relação DBO/DQO (HAMADA, 1997).

Na Tabela 2.1 são apresentados dados representativos da caracterização de chorume em aterros novos e antigos.

Tabela 2.1: Composição do chorume de aterros novos/antigos (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993)

Características	Valores (mg/l)		
	Aterros novos (menos de 2 anos)		Aterros antigos (mais de 10 anos)
	Variação	Típico	Variação
DBO	2.000 a 30.000	10.000	100 a 200
COT	1.500 a 20.000	6.000	80 a 160
DQO	3.000 a 60.000	18.000	100 a 500
Sólidos suspensos totais	200 a 2.000	500	100 a 400
Nitrogênio orgânico	10 a 800	200	80 a 120
Nitrogênio amoniacal	10 a 800	200	20 a 40
Nitrato	5 a 40	25	5 a 10
Fósforo total	4 a 100	30	5 a 10
Alcalinidade como CaCO₃	1.000 a 10.000	3.000	200 a 1.000
pH	4.5 a 7.5	6	6.6 a 7.5
Dureza total como CaCO₃	300 a 10.000	3.500	200 a 500

O tratamento do chorume é dificultado pela dinâmica de suas características durante as estações do ano e sua vida útil. Processos biológicos não são tão eficientes, na remoção de cargas orgânicas, pois exigem grandes bacias de equalização e processos físico-químicos produzem grandes quantidades de lodo e necessitam de maiores recursos para seu manejo. Estes processos exigem o confinamento que deve ser seguido a critérios estabelecidos pela legislação.

Alguns autores, como Forgie (1988) sugerem um critério para permitir a decisão na seleção de processos. Quando o chorume apresentar DQO elevada (> 10.000 mg/l), baixa concentração de nitrogênio amoniacal e uma relação DBO/DQO entre 0.4 e 0.8, e uma

concentração significativa de ácidos graxos voláteis de baixo peso molecular, o tratamento pode ser efetuado por ambos os processos anaeróbio e aeróbio. O tratamento físico-químico neste caso não é indicado.

Quando o chorume não apresenta as características representativas de um aterro novo, com $1.500 < \text{DQO} < 3.000$ e relações $\text{DBO}/\text{DQO} < 0.4$, presume-se que houve um decréscimo significativo de sua fração orgânica biodegradável. Neste caso, espera-se também uma elevada concentração de nitrogênio amoniacal. Isto significa que, tanto o tratamento aeróbio como anaeróbio podem ser limitados na remoção desses compostos orgânicos. Porém para remoção do nitrogênio amoniacal, o tratamento aeróbio pode ser indicado, auxiliando inclusive na remoção de DBO remanescente (HAMADA e MATSUNAGA, 2000).

Para pequenos municípios, o tratamento do chorume é inviável devido à obrigatoriedade de impermeabilização do solo com geomembranas, tornando-se uma operação que demanda um alto custo. Assim, soluções alternativas que substituam ou auxiliem os processos convencionais a custos reduzidos são necessários. Uma alternativa, para pequenos aterros, seria utilizar o próprio solo como elemento filtrante de chorume.

2.2.2 Solo como filtro natural

Como o solo funciona como um filtro é de se esperar que, dependendo do tipo de solo e tempo do aterro, a degradação natural do chorume, quando máxima, minimiza o impacto ambiental. Este processo, de redução dos contaminantes, permite a partir da interação solo/chorume e de processos físicos, químicos e biológicos, reduzir a concentração de contaminantes a níveis aceitáveis.

Dependendo da condutividade hidráulica do solo os contaminantes podem atingir rapidamente o aquífero; entretanto as propriedades naturais do solo, através dos processos de degradação, oxidação e adsorção que são realizados nos horizontes do solo e na zona insaturada, atuam como filtro na depuração dos percolados, fazendo com que a qualidade das águas subterrâneas sob o ponto de vista bacteriológico e químico seja, em geral, melhor que as águas superficiais (SCHUELER, 2005).

A água captada em aquíferos profundos, em geral, dispensa qualquer tratamento antipolvente, exceto os casos de águas subterrâneas em regiões semi-áridas, zonas costeiras e aquíferos rasos de áreas urbanizadas. Isso ocorre pelo fato de que quanto mais raso o aquífero, maior a possibilidade de ser contaminado.

Como a água subterrânea apresenta um fluxo laminar, impedindo que haja uma mistura longitudinal e lateral, a água poluída infiltrada no solo passa a mover-se formando uma pluma de contaminação. Processos de absorção, trocas iônicas, dispersão e decaimento fazem com que esta pluma tenda a se atenuar com o tempo e distância percorrida (GUIMARÃES, 2000).

A maioria das plumas de contaminação são relativamente estreitas e, em quanto a sua espessura, não excedem a do aterro. No entanto se os resíduos sólidos estiverem sendo depositados em solos arenosos, cascalhos ou meio fraturado, o percolado pode produzir uma pluma com espessura maior que a ocupada pelo aterro (CRISTENSEN et al., 2000).

Os processos físico-químicos e bacteriológicos nem sempre são capazes de produzir uma redução significativa das substâncias tóxicas existentes nas plumas. Os sólidos geralmente se dissolvem quando sob ação da água, mas algumas partículas sofrem adsorção pelo solo, absorção ou ambos os fenômenos. Os contaminantes, em geral, são retidos por infiltração, adsorção, coagulação e precipitação no meio poroso, esta retenção esta diretamente relacionada com o tipo de solo (CINTRA, 2004).

2.2.3 Hidrogeologia em meio fraturado

2.2.3.1 Água subterrânea e aquíferos

A origem de quase toda água subterrânea existente no planeta Terra está relacionada ao ciclo hidrológico, processo pelo qual a natureza propicia a circulação das águas superficiais (oceano, lagos, rios...) para a atmosfera através da evaporação e daí para os continentes por meio da precipitação, de onde retorna superficial e subterraneamente aos rios, lagos e oceanos (MANOEL FILHO, 1997). Parte da água que infiltra no solo e nas rochas, pode percolar através dos poros e em fraturas¹ até o nível piezométrico, constituindo a recarga ou recursos renováveis dos aquíferos.

A água subterrânea é a parcela da água que permanece no subsolo, onde flui lentamente até descarregar em corpos de água de superfície, ser interceptada por raízes de plantas ou ser extraída em poços. Tem papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos cursos de água e também responsável pelo fluxo de base dos rios, sendo responsável pela sua perenização durante os períodos de estiagem.

¹ descontinuidades presentes no maciço rochoso (juntas, falhas e fendas), independente de sua formação.

A água infiltrada flui através de solos e rochas com velocidade dependente da permeabilidade do meio, que pode ser primária, quando o fluxo d'água ocorre nos poros interconectados de uma rocha de natureza sedimentar, ou secundária, quando o meio é cristalino e o fluxo de água ocorre ao longo de descontinuidades.

Quanto a menor ou maior facilidade de armazenar e liberar as águas subterrâneas, os materiais geológicos naturais podem ser classificados em Aquífero, Aquitardo, Aquíclode e Aquífugo:

- **Aquífero:** unidade geológica permeável, susceptível de armazenar e transmitir água;
- **Aquitardo:** unidade geológica de baixa permeabilidade que pode armazenar água subterrânea e transmiti-la lentamente de um aquífero para outro;
- **Aquíclode:** unidade geológica de baixa permeabilidade que forma o limite superior ou inferior de um sistema de fluxo subterrâneo; e
- **Aquífugo:** unidade geológica caracterizada por litotipos com pouca ou nenhuma favorabilidade ao armazenamento de água subterrânea.

Quanto à formação geológica, os aquíferos podem ser: livres, confinados e semi-confinados:

- **Livres,** são constituídos por formações geológicas superficiais, aflorantes, portanto com a recarga no próprio local, em toda a extensão da formação.
- **Confinados,** são formações geológicas portadoras de água superpostas por camadas impermeáveis. O seu reabastecimento ou recarga, através das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Neles o nível hidrostático encontra-se sob pressão, causando artesianismo nos poços que captam suas águas.
- **Semi-confinados,** uma das formações do topo e/ou da base, permite a transferência de água para outro aquífero.

Os aquíferos livres e semi-confinados têm a chamada recarga direta e os aquíferos confinados, a recarga indireta.

Em função da composição dos materiais geológicos e a forma como as águas são armazenadas, os aquíferos podem ser classificados em Granulares, Cársticos e Fraturados, Figura 2.4:

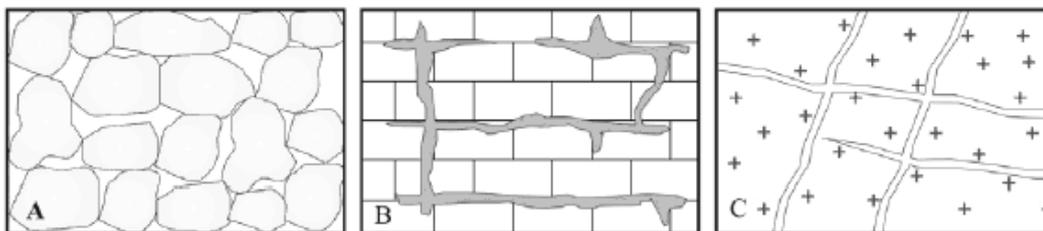


Figura 2.4: Aquíferos: (A) Granular; (B) Cárstico; e (C) Fraturado (VALLEJO et al., 2002)

- **Aquíferos granulares** – Correspondem a formações geológicas onde a água circula nos espaços intergranulares das rochas sedimentares ou sedimentos;
- **Aquíferos cársticos** – Correspondem às rochas sedimentares onde a água circula pelas aberturas ou cavidades causadas pela dissolução de rochas; e
- **Aquíferos fraturados** – Característicos do meio cristalino onde a água circula pelas discontinuidades nas rochas.

Os aquíferos fraturados caracterizam-se por ser um meio hidraulicamente descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. Não apresentam parâmetros hidrodinâmicos constantes, pois a porosidade é meramente função das fraturas, que não se distribuem homogeneamente por todo aquífero. A condutividade hidráulica dependerá do fraturamento e a transmissividade não se aplica, uma vez que a condutividade hidráulica não pode ser extrapolada para uma determinada espessura do aquífero onde predominam zonas não fraturadas (COSTA e BRAS, 1997).

A área de recarga dos aquíferos fraturados relaciona-se à infiltração que ocorre a partir dos cursos d'água que estão encaixados em um sistema integrado de fraturas. O reabastecimento é realizado, também, a partir da infiltração direta das águas das chuvas, através dos solos residuais. Possuem vulnerabilidade natural e riscos de contaminação altos, por armazenarem água em fraturas que se comunicam com a superfície do solo e, portanto, ficam expostas a qualquer fonte de poluição (chorume, necro-chorume, hidrocarbonetos e outros) que se instalar sobre ela.

No entanto, um meio fraturado nem sempre apresenta vantagem. Quando se trata de contaminação, no caso do chorume, as fraturas como são caminhos preferenciais dentro do maciço rochoso, podem espalhar o contaminante rapidamente. A alta percolação deste líquido por estas discontinuidades faz com que em pouco tempo, dependendo da abertura hidráulica das fraturas, o aquífero seja contaminado. Esta contaminação, em geral, é de difícil tratamento, portanto, a redução da concentração de contaminantes dependerá unicamente da atenuação natural.

Este trabalho apresenta não somente a aplicação e interpretação do método geoeletrico geofísico da eletro-resistividade na detecção de meio fraturado, mas, uma análise integrada de dados geológicos de campo; dados de poços e nascentes; fraturas mapeadas a partir de imagens e mapa planialtimétrico; e seções de resistividades aparentes obtidas por técnicas de inversão. Esta integração dos dados permite otimizar os trabalhos de campo identificando as feições estruturais e anomalias de baixas resistividades, associadas à percolação de chorume.

2.2.4 Métodos geoeletricos aplicados em aterros e aquíferos fraturados

Os métodos geofísicos geoeletricos são utilizados com sucesso no conhecimento dos aspectos de natureza geológica, geotécnica e hidrogeológica da área de disposição de resíduos (PORSANI, et al., 2004; MOURA, 2002; VOGELSANG, 1995).

Em seu estudo Kelly (1976) aplicou sondagens elétricas verticais (arranjo Wenner) próximo a um aterro sanitário assentado em solo arenoso, mapeou a extensão da área contaminada, aferida por medidas de condutividade da água contaminada dos poços de monitoramento. O autor ressaltou que existe uma boa correlação entre os valores de condutividade elétrica com os resultados obtidos indiretamente pela eletro-resistividade, e que a metodologia é simples e útil em estudos qualitativos e na verificação de modelos 2D de qualidade da água.

Ellert et al. (1988) apresentaram um resumo das técnicas geofísicas aplicáveis ao estudo da poluição da água subterrânea, ilustrando com resultados obtidos em dois aterros do Estado de São Paulo.

Urish (1983), Elis (1998) e Gallas et al. (2005) aplicando o método da eletro-resistividade na detecção de plumas de contaminação geradas por chorume, mostraram a grande eficiência do método no estudo de depósitos de resíduos sólidos, quando aplicado conjuntamente às técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico.

Franco e Pires (1995) utilizaram o método da eletro-resistividade, com a técnica de sondagem elétrica vertical, na detecção de contaminação de águas subterrâneas oriunda de um aterro sanitário de Brasília – DF. A evidência detectada foi um “*trend*” de baixa resistividade, correlacionável à pluma de contaminação.

Rigoti et al. (1997) empregou a eletro-resistividade com uso simultâneo das técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, no lixão de

Lamenha Pequena (Curitiba – PR). Os resultados permitiram determinar os limites laterais do lixão e a presença da infiltração do chorume em toda área investigada.

Baganha (1997) no estudo do Aterro Sanitário do Parque Santa Bárbara no município de Campinas – SP, fez o mapeamento e monitoramento da pluma de contaminação. Para isso fez análises químicas de amostras de águas locais e comparou os dados com os resultados obtidos nos ensaios geofísicos. Concluindo que a migração do chorume pode provocar uma pluma de contaminação, desde sua faixa insaturada até o nível freático, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas.

Na avaliação do impacto ambiental provocado pelo aterro controlado de Rio Claro – SP, Malagutti Filho et al. (1997) aplicaram os métodos da Eletro-resistividade com técnica de caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo), Polarização Induzida, Sondagens Elétricas, Sísmica de Refração e Eletromagnético Indutivo. Os resultados permitiram caracterizar os materiais geológicos, resíduos, níveis d'água e fluxo subterrâneo.

Estudos realizados por Braga et al. (1999), no lençol freático em Iracemápolis - SP utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical (arranjo Schlumberger) e caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo) em áreas de depósitos de resíduos industriais, mostraram que a pluma de contaminantes tende a diminuir sua faixa de abrangência em função da profundidade restringindo-se a locais isolados. Como também identificou as direções preferenciais do fluxo subterrâneo, duas delas, acompanhavam a topografia local.

Elis e Zuquette (2002) mostraram que a sondagem elétrica vertical e o caminhamento elétrico interpretados conjuntamente com a geologia local, fornecem uma gama de informações sobre a contaminação em áreas de depósitos de resíduos sólidos urbanos.

Shiraiwa et al. (2002) estudaram a área do lixão de Cuiabá-MT, a partir de investigações geofísicas de sondagem elétrica vertical, caminhamento eletromagnético e perfis de radar de penetração no solo, os resultados mostram que a interpretação integrada geofísica-geológica permitiu caracterizar a área do lixão e, conseqüentemente, a pluma de contaminação resultante do chorume originado. De acordo com os resultados, a pluma contaminante atingiu a zona saturada. Da interpretação das sondagens elétricas verticais, foi possível caracterizar a zona de transição solo-rocha, definir a profundidade do topo rochoso, a profundidade do nível d'água e a espessura do pacote de lixo.

Moura e Malagutti (2003), no estudo feito no aterro controlado da cidade de Rio Claro – SP, empregaram a eletro-resistividade e polarização induzida, com as técnicas de sondagem elétrica vertical (arranjo Shulumberger) e caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo). Os resultados das sondagens permitiram definir o sentido do fluxo de água

subterrânea, as profundidades das células de resíduos e identificar litologicamente os materiais em subsuperfície, e os caminhamentos mostraram grande potencial na determinação da presença de descontinuidade laterais das cavas de resíduos e as variações texturais das litologias.

Palma (2004) no estudo feito no lixão de cidade de Poços de Caldas – MG empregou a eletro-resistividade com técnica de caminhamento elétrico. Os resultados apontaram a eletro-resistividade como uma técnica útil na obtenção de dados de contaminação, podendo ser usados na calibração de modelos e monitoramento da área contaminada.

Santos (2005) estudou o lixão de Cuiabá-MT, utilizando a eletro-resistividade com as técnicas de sondagens elétricas verticais e caminhamento elétrico; e caminhamento eletromagnético indutivo. A combinação destes métodos, associados com a integração geológica local, permitiram determinar a extensão e evolução temporal da contaminação provocada pelo chorume.

Xavier (2005), com o objetivo de determinar as características físicas do depósito de resíduos no aterro sanitário da cidade de Blumenau-SC, utilizou o método da eletro-resistividade, com as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico. Os resultados mostraram a eficiência do método nas definições do material de cobertura, da espessura do resíduo, do nível do lençol freático, do fluxo subterrâneo, da profundidade da rocha e da provável pluma de contaminação. Neste trabalho pôde-se projetar corretamente as demais ações de diagnóstico e remediação, orientando os métodos diretos de investigação, assim como, a locação de poços de monitoramento na área, como também, mostrar o método como importante ferramenta no diagnóstico geoambiental, tanto na fase de implantação quanto na fase de desativação de aterros sanitários.

Em estudos ambientais, envolvendo a contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas, as técnicas de sondagem elétrica vertical e o caminhamento elétrico, em conjunto, tem sido utilizadas com grande sucesso, tanto no que se refere à precisão dos resultados obtidos, quanto aos custos e prazos relativamente reduzidos, resultando um excelente apoio nesses tipos de estudos (ELIS, 1998 e BRAGA, 2006).

Na América do Norte, há aproximadamente quatro décadas, as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico começaram a ser aplicadas para definir a profundidade e a extensão de corpos de água subterrânea, contaminados (SANTOS, 2005).

Métodos geoeletricos são utilizados com sucesso na caracterização de aquíferos fraturados, com identificação da espessura do manto de intemperismo, profundidade do topo rochoso, fraturas preenchidas por água e conseqüentemente na determinação de locais para a

perfuração de poços (PALACKY e KADEKARU, 1979; CARRUTHERS e SMITH, 1992; HAZELL et al., 1992; GALLAS, 2000, 2003 e VOUILLAMOUZ et al., 2003).

GALLAS (2003) apresenta um exemplo de aplicação da técnica do caminhamento elétrico na prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos. O autor aconselha que, para este tipo de levantamento, em que se procura mapear/identificar anomalias correlacionáveis à zonas de fraturamento no maciço rochoso, a abertura entre eletrodos deve ser tal que no primeiro ou segundo nível de investigação seja ultrapassada a camada correspondente a solo e rocha alterada. No seu estudo, foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento de 40 m entre eletrodos.

Segundo Braga (2006) em rochas sedimentares (aquíferos cársticos) e cristalinas (aquíferos fraturados), a técnica geofísica mais adequada é o imageamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo), com os métodos de eletro-resistividade e polarização induzida, pois permite obter um estudo lateral das estruturas geológicas, que ocorrem, aproximadamente, de forma descontínua à superfície do terreno, como fraturas, diques e outras. A sondagem elétrica vertical pode ser utilizada em situações específicas, com menor detalhe em relação ao imageamento elétrico.

Nos estudos ambientais, visando obter um diagnóstico dos aquíferos fraturados, frente a contaminantes, em rochas cristalinas, a técnica mais adequada é o imageamento elétrico com os métodos da eletro-resistividade e polarização induzida. Neste caso o Radar de penetração (GPR), pode ser utilizado, no entanto atinge pequenas profundidades em relação ao imageamento elétrico (BRAGA, 2006).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A cidade de Porto Velho, capital do Estado de Rondônia, esta situada à margem do Rio Madeira, no extremo NW do Estado de Rondônia. Ocupa uma área de 34.082,37 km² onde vivem aproximadamente 335.000 habitantes (IBGE, 2000).

A área da lixeira de Porto Velho possui uma rede viária bem estabelecida, de acesso fácil e rápido por estar na margem direita da rodovia BR-364, sentido Rio Branco – AC. Fica a aproximadamente 4 km da margem direita do Rio Madeira, 1 km do Campus da Universidade Federal de Rondônia - UNIR e a 12 km da zona urbana de Porto Velho, Figura 3.1.

3.2 Características regionais

3.2.1 Clima

O clima é um fator importante para qualidade e quantidade das águas subterrâneas. Grandes precipitações influenciam positivamente nas vazões de aquíferos, por fornecer água em abundância para infiltração, além de gerar solos espessos que acabam funcionando como um aquífero poroso ou como uma zona de recarga para as fraturas. Em regiões de clima equatorial, como é o caso da região norte, a alta pluviosidade e a elevada taxa de evaporação propiciam a recarga natural dos aquíferos locais.

Segundo a classificação de Köppen apud Krebs et al. (1999) o Estado de Rondônia possui um clima tropical chuvoso, tipo Aw, com uma estação relativamente seca durante o ano, denominada regionalmente como “verão”.

Em Porto Velho, o clima predominante durante todo o ano é tropical úmido quente, com insignificante amplitude térmica anual e notável amplitude térmica diária, especialmente no inverno. Por estar sob a influência do clima Aw, a média anual da precipitação pluviométrica varia entre 1400 e 2600 mm/ano e a média anual da temperatura do ar varia entre 24 °C e 27 °C.

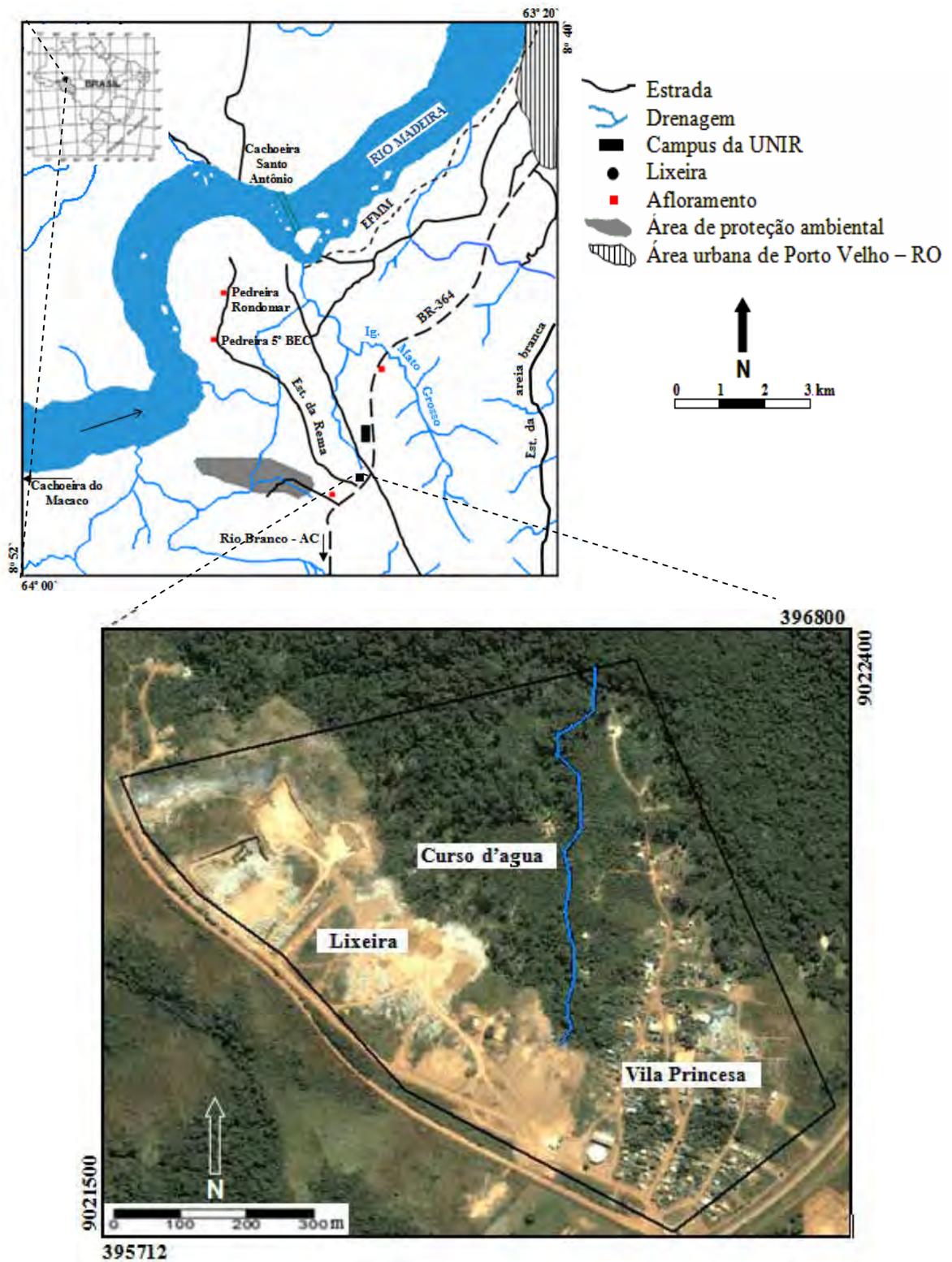


Figura 3.1: Localização da lixeira de Porto Velho – RO (adaptado de KREBS et al, 1999 e RIZZOTTO, 2005)

Porto Velho possui um clima quente, uma vez que todos os meses se mantêm com temperaturas medias superiores a 25 °C, mesmo quando as temperaturas mínimas nos meses de julho a agosto atinjam 18 °C, quando da invasão do anticiclone polar (fenômeno que causa queda de temperatura). Este fenômeno ficou conhecido na região como “friagem”. Segundo as médias mensais de temperatura do ar, setembro, outubro e novembro são os meses mais quentes.

Conforme balanço hídrico² mensal de 1999 a 2006 (Figura 3.2), Porto Velho apresentou média total anual de precipitação de 2415 mm, com media mensal de 201 mm, distribuída em duas épocas distintas: uma chuvosa (inverno) com excedente hídrico no período de novembro a abril, apresentando índices pluviométricos acima de 200 mm/mês e registros de chuvas de até 95.8 mm em um único dia do mês de janeiro/2006 e; um período de estiagem (verão) com deficiência hídrica de maio a setembro, apresentando índice pluviométrico médio de 46 mm/mês no período de junho a agosto. Dezembro/2002 foi o mês que apresentou a maior precipitação deste período com 26 dias de chuva (RONDÔNIA, 2000, 2001, 2002, 2003, 2

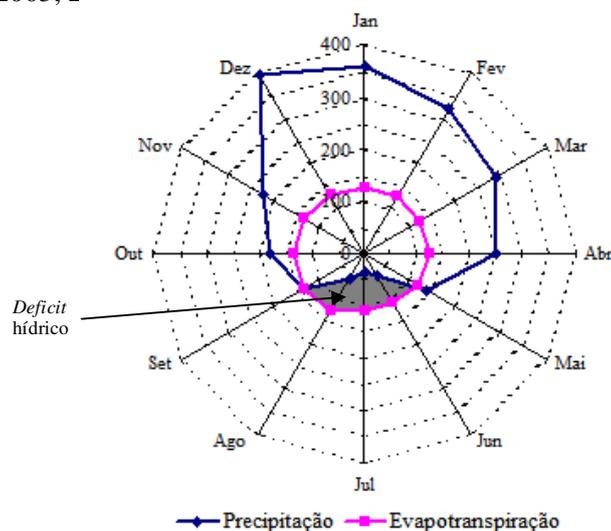


Figura 3.2: Balanço hídrico mensal em Porto Velho - 1999 a 2006 (em mm/mês)

Estas altas precipitações anuais (novembro a abril) além do elevado grau de alteração dos materiais superficiais e os relevos geralmente suaves, garantem elevadas recargas

² indicador climatológico da disponibilidade hídrica em uma região (PEREIRA et al., 1997), fornece estimativas da evapotranspiração potencial, da deficiência hídrica, do excedente hídrico e do armazenamento de água no solo.

naturais dos aquíferos, tanto superficiais como profundos, distribuídas durante todo o ano hidrológico.

3.2.2 Geologia

No contexto geológico, a região de Porto Velho está inserida no chamado Terreno Jamari, onde se grupam os tipos litológicos mais antigos do embasamento regional de Rondônia, além de cinco suítes granitóides intrudidas no embasamento (Santo Antonio, Teotônio, Alto Candeias, São Lurenço / Caripunas, Santa Clara e Granitos Jovens de Rondônia), coberturas metavulcano-sedimentares da Formação Mutum-Paraná e coberturas sedimentares da Formação Palmeiral. As coberturas sedimentares cenozóicas reúnem depósitos continentais terciários e quaternários distribuídos principalmente ao longo do sistema fluvial do Rio Madeira (FERNANDES e GUIMARÃES, 2002), Figura 3.3.

Os depósitos sedimentares cenozóicos encontram-se organizados em coberturas sedimentares indiferenciadas, laterítos imaturos, terraços fluviais pleistocênicos e depósitos de planície de inundação.

A evolução do relevo regional, condicionada a atuação vigorosa de processos erosivos, conduziu a uma sedimentação expressiva, traduzida na pediplanização atual da morfologia, com uma cobertura cenozóica de depósitos associados a drenagens, lagos e coluviões, submetidos ou não a uma lateritização posterior.

Os sedimentos, de idade pleistocênica, denominados de Formação Jaciparaná, foram originados a partir de pediplanos antigos, compostos por argila, silte e areia heterogênea, incipientemente consolidados, aos quais se associavam um ambiente fluvial meandrante e/ou entrelaçado, localmente lacustre raso. Associadas ainda a essa idade, desenvolveram-se coberturas residuais, definidas como laterítos imaturos, constituídos por horizontes concrecionários e mosqueados, oriundos de mudanças climáticas do Pleistoceno. Distribuem-se amplamente pelo município e quando em perfis completos e preservados, modelam grande parte do relevo atual, com sua melhor representação na região de Ariquemes/Porto Velho (REIS et al., 1996).

As coberturas holocênicas correspondem a aluviões atuais, condicionadas às calhas dos rios e respectivas planícies de inundação, destacando-se os sedimentos relacionados ao rio Madeira. São sedimentos detríticos mal selecionados, compostos de cascalho, areia, silte e argila inconsolidados (REIS et al., 1996).

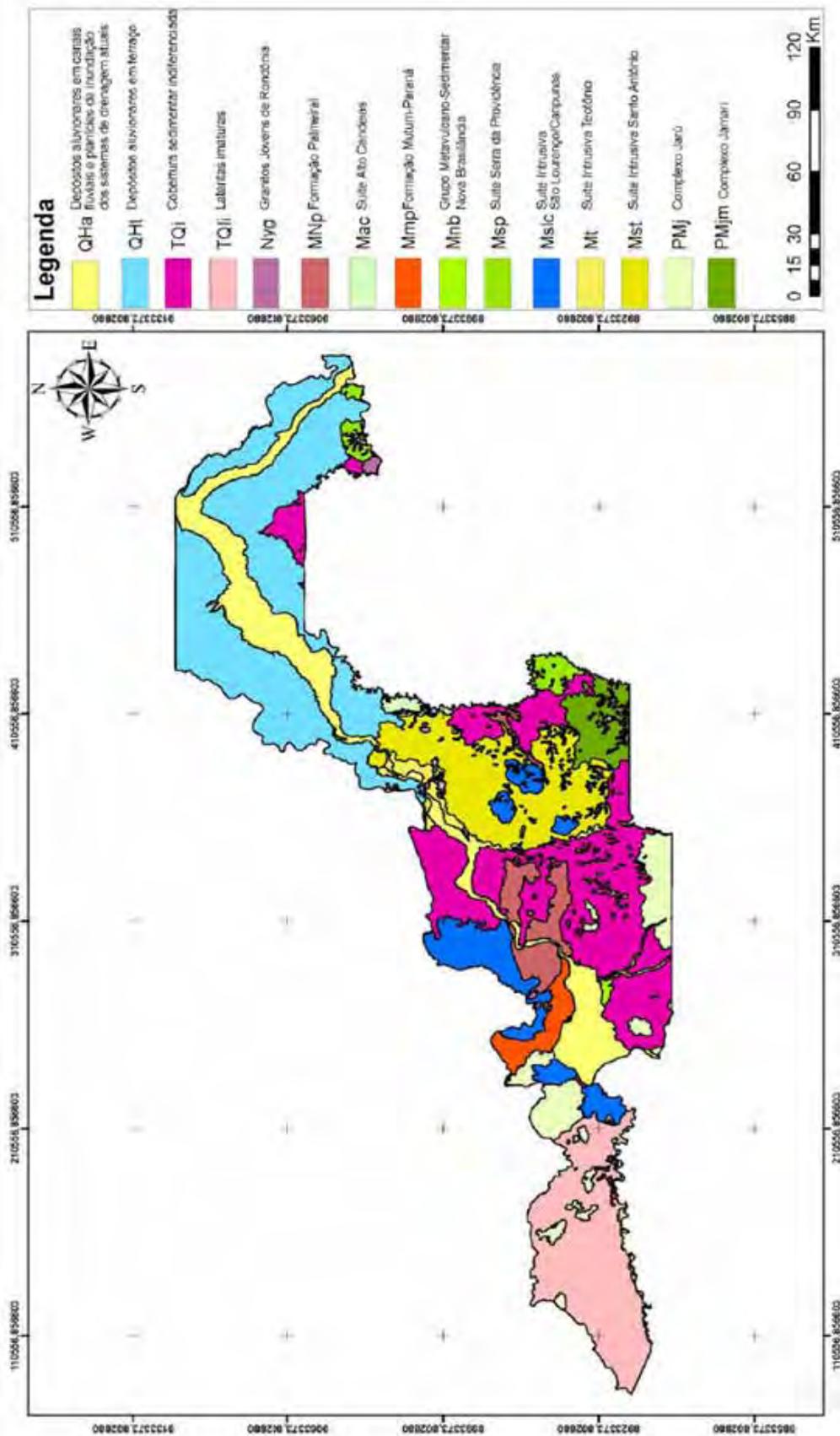


Figura 3.3: Mapa geológico do município de Porto Velho (SOUZA, 2006)

3.2.3 Pedologia e vegetação

O levantamento dos tipos de solo existentes nas imediações de Porto Velho, contido no Zoneamento Socioeconômico-Ecológico do Estado de Rondônia (RONDONIA, 1998), revelou a presença dos seguintes tipos de solos: Neossolo Flúvico, Cambissolo Distrófico, Cambissolo Eutrófico, Neossolo Regolítico, Glaissolo Distrófico, Glaissolo Eutrófico, Cambissolo Concrecionário, Latossolo Amarelo Distrófico, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Latossolos Vermelho-Escuro Distrófico, Argissolo Amarelo Distrófico, Argissolos Vermelho-Amarelo Distrófico, Plintossolo, Neossolo Quartzarênico e Neossolo Litólico, Figura 3.4.

Os latossolos, amplamente dominantes, são comumente bastante intemperizados, constituídos por minerais derivados da argila, caolinita, gibbsita, minerais amorfos e sesquióxidos de ferro e alumínio. Possuem uma boa drenagem, favorecendo o desenvolvimento dos sistemas radiculares, e são resistentes à erosão.

Os argissolos, em relação aos latossolos, são solos menos desenvolvidos por serem moderadamente intemperizados e susceptíveis a erosão quando da presença de mudança textural abrupta.

Os neossolos são constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso, com pequena expressão de processos pedogenéticos. Não apresentam modificações expressivas do material originário em função da baixa intensidade de atuação desses processos, das características do próprio material, pela sua resistência ao intemperismo ou composição química, ou ainda do relevo, que isoladamente ou em conjunto, impediu ou limitou a evolução desses solos.

Os solos hidromórficos, como os Glaissolos e Plintossolos, ocorrem em regiões com excesso de água temporal ou permanente como ao longo da planície aluvial do rio Madeira.

Os cambissolos, de distribuição mais restrita, contendo uma boa proporção de minerais intemperizáveis argilosos e bem drenados. São pouco a moderadamente profundos e ocorrem nas encostas de colinas. São solos muito suscetíveis à erosão quando desprovidos da cobertura vegetal. Ocorrem em duas manchas a oeste do Rio Madeira, além de uma porção restrita no quadrante SW (KREBS et al., 1999).

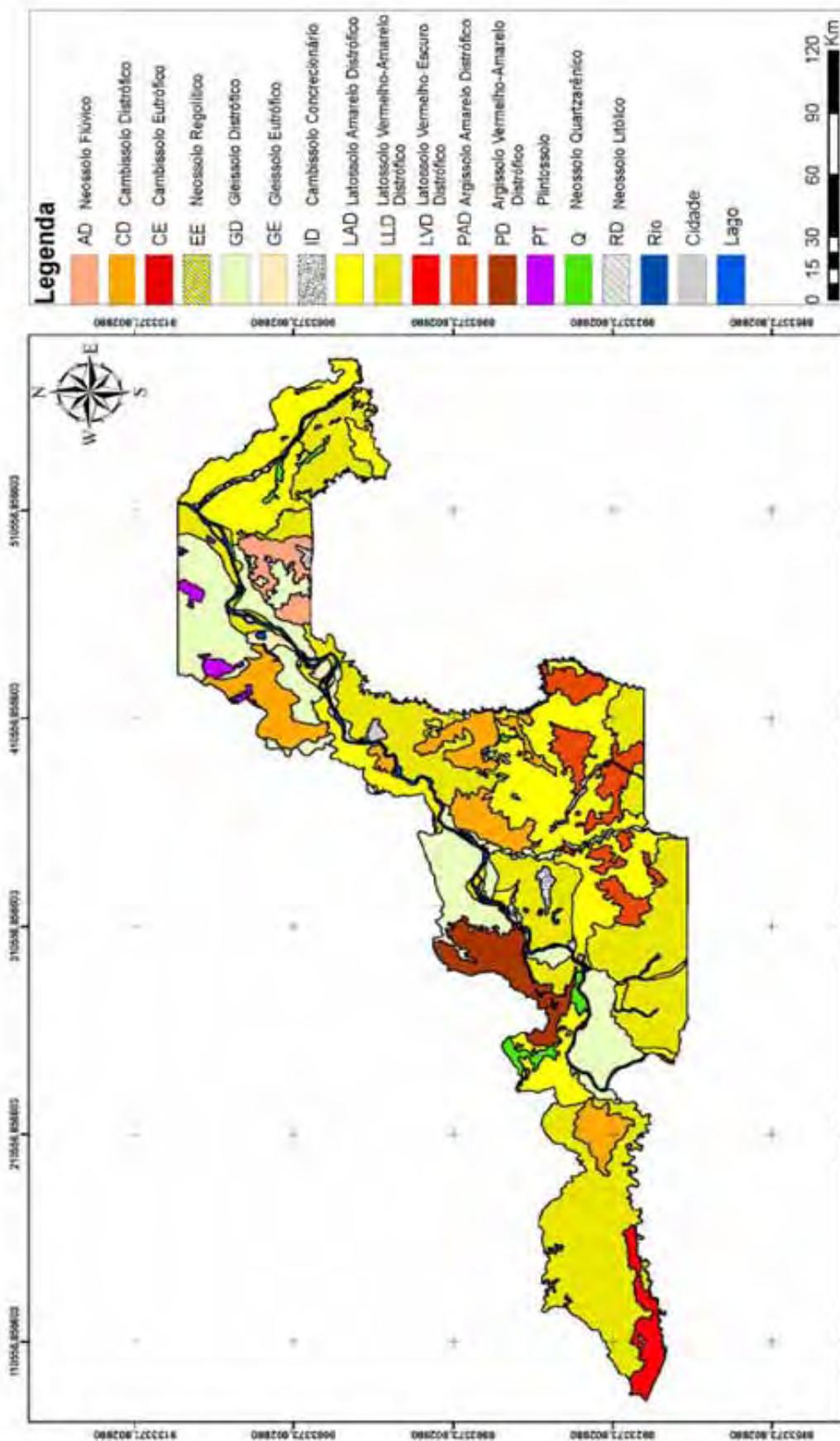


Figura 3.4: Mapa pedológico do município de Porto Velho (SOUZA, 2006)

O Estado de Rondônia é formado por oito tipos de vegetação, e é reconhecido pela grande biodiversidade de espécies: Floresta Ombrófila Aberta (abrange aproximadamente 55% da área total da vegetação do Estado), Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta de Transição ou Contato, Cerrado, Formação Pioneira, Capinarana e Umirizal (PLANAFLORO, 2002).

3.2.4 Hidrogeologia

A exploração das águas subterrâneas no estado de Rondônia realiza-se, fundamentalmente, mediante poço amazonas³ e tubular⁴, e muito raramente mediante a captação de minas de água.

O de maior frequência é o poço tipo amazonas, isto se deve à facilidade de exploração dos aquíferos livres superficiais, o inconveniente neste tipo é a facilidade de contaminação da água. As águas de poços profundos apresentam, em geral, uma qualidade química e bacteriológica superior a dos poços superficiais.

No Estado de Rondônia, a água subterrânea apresenta-se em geral próxima a superfície. Isto é comprovado na distribuição das profundidades do nível d'água (NA), a profundidade média nos poços amazonas é de 5,34 m e tubulares de 7,91 m, apresentando um máximo de 76 m. Isso justifica a grande exploração pelos poços amazonas no nível freático superficial, enquanto que os tubulares extraem água dos sistemas aquíferos confinados ou semi-confinados (RONDÔNIA, 1998).

Nos aquíferos profundos, as descargas acontecem mediante minas de muro existentes nos contatos entre materiais de diferente permeabilidade ou em zonas de fraturas, cujos recursos incorporam-se ao escoamento superficial, ou mediante fluxos pouco profundos. Em certos casos, as descargas destes aquíferos produzem-se de maneira subterrânea por conexão hidráulica com aquíferos superficiais vizinhos, do tipo depósitos coluvionares ou aluvionares.

A maior parte da recarga destes aquíferos (superficiais e profundos) ocorre por infiltração da água da precipitação sobre as superfícies permeáveis e/ou zonas de fraturas, existindo também infiltrações desde cursos de água superficiais (trechos de rios que alimentam os aquíferos) a entradas laterais de outras unidades hidrogeológicas vizinhas. (RONDÔNIA, 1998).

³ poço cilíndrico, aberto manualmente, com o uso de picareta e pá. Às vezes é usado explosivos para romper blocos de rocha mais resistentes.

⁴ poço conhecido popularmente como “poço artesiano” e/ou “semi-artesiano”, é uma obra complexa de engenharia destinada à captação subterrâneo nos diversos aquíferos.

O sistema aquífero Jaciparaná, que se localiza sob a cidade de Porto Velho é constituído por depósitos de origem fluvial e colúvio-aluvial com intercalações de areia, argila e silte com idade terciária - quaternária, abastece 25% da cidade de Porto Velho. Possui uma permeabilidade média de 7m/dia e os poços que captam sua água possuem uma vazão média de 15 m³/h (CAMPOS, 1998; SILVA FILHO e CAMPOS, 2002).

Campos e Morais (1999) no estudo dos aquíferos da área urbana de Porto Velho, concluíram que o aquífero Jaciparaná, na porção estudada, apresenta-se confinado por camada argilosa de mais de 10 m de espessura, fazendo com que tenha uma vulnerabilidade natural baixa.

As águas deste aquífero são classificadas como cloretadas sódicas, possuem pH ácido, normalmente inferior a 5, apresentam baixo teor de sais e, em algumas porções, podem apresentar teores de ferro acima das normas da Portaria 518 do Ministério da Saúde que é de 0.3 mg/l, inviabilizando, em muitos casos, para utilização pela população (BRASIL, 2004).

3.3 Características locais

3.3.1 Geologia

Na área da lixeira ocorrem rochas graníticas da Suíte Intrusiva Santo Antonio, de idade Proterozóico Médio, maciço Santo Antônio. Estão enquadradas nesta suíte rochas monzograníticas, sienograníticas e quartzo-monzogranito (ADAMY e ROMANINI, 1990). Estas rochas estão afetadas por intenso processo de fraturamento, predominantemente rúptil.

As referidas litologias afloram com mais frequência no leito do Rio Madeira, principalmente na margem direita, na cachoeira de Santo Antônio e arredores, assim como nas pedreiras da Rondomar e 5º BEC (ver Figura 3.1, pág. 31). No trecho que compreende essas pedreiras há uma predominância de fraturas na direção⁵ N45-60E / 90°.

Os dados de fraturas do maciço Santo Antônio, obtidos de afloramentos no trecho do Rio Madeira, entre as cachoeiras do Macaco e Santo Antônio e da Pedreira da Rondomar, estão apresentados no diagrama de contornos de pólos de fraturas, Figura 3.5. Neste maciço identifica-se cinco famílias⁶ de fraturas A, B, C, D e E:

⁵ definida pelo ângulo que a interseção do plano da fratura, com o plano horizontal, faz com a direção Norte, vais de 0° a 360° e é medido a partir do Norte magnético no sentido horário.

⁶ agrupamentos de fraturas de ocorrência sistemática conforme uma orientação preferencial.

- Direções principais: A = N-S / 80-90E ou 80-90W; B = N42E / 83SE; C = N60E / 83NW;
- Direções secundárias: D = N50W / 89NE; E = N-S / 30W;
- A família E constitui possíveis fraturas de alívio do Maciço Santo Antônio.

O estereograma (Figura 3.5) com as três principais famílias de fraturas A, B e C, define um triângulo de interseção, demonstrando que as mesmas pertencem, provavelmente, a um mesmo regime de tensão tectônica (RIZZOTTO, 2005).

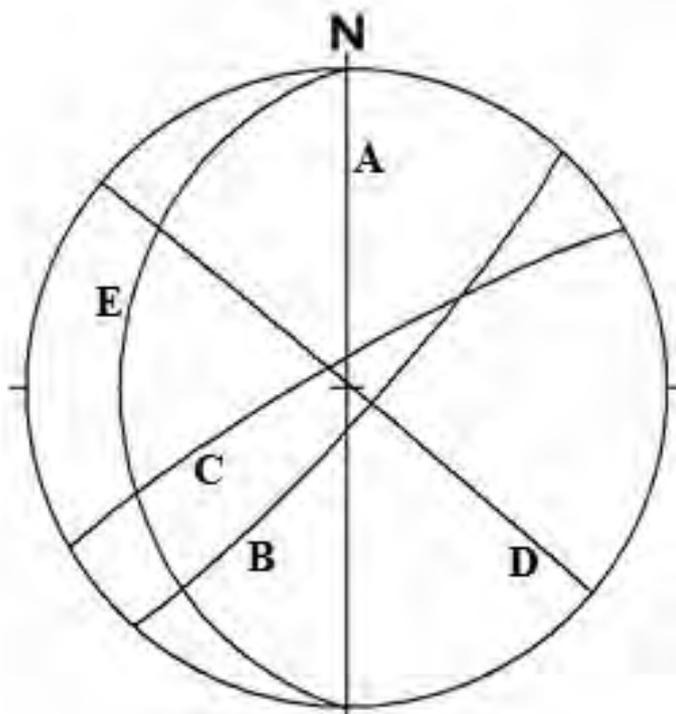


Figura 3.5: Estereograma com famílias de fraturas do maciço Santo Antônio.

Estas fraturas apresentam mergulho⁷ tendendo a verticalidade. Numa análise preliminar as falhas observadas no campo são do tipo normais ou de gravidade e do tipo transcorrente, estas, ocorrem nas rochas graníticas da Suíte Intrusiva Santo Antônio, em afloramentos na Pedreira da Rondomar à margem direita do rio Madeira (RIZZOTTO, 2005).

A Figura 3.6 apresenta as unidades geológicas cartografadas no domínio da área de estudo e entorno, escala 1:100.000 (RIZZOTTO, 2005).

⁷ ângulo de inclinação do plano da fratura com o plano horizontal, varia de 0° a 90°, considerando somente hemisfério inferior.

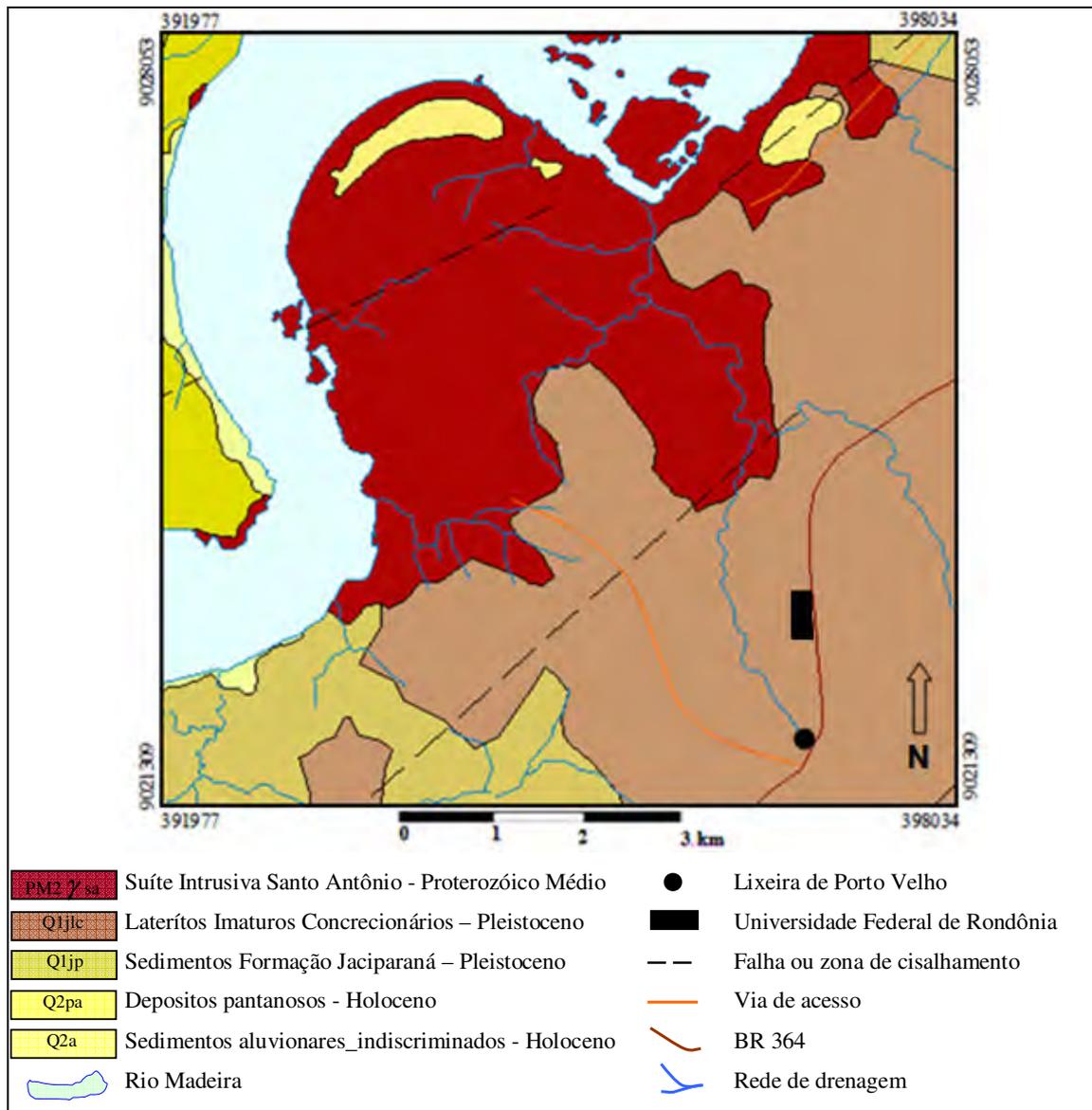


Figura 3.6: Unidades geológicas da área de estudo e entorno (adaptado de RIZZOTTO, 2005)

3.3.2 Pedologia e vegetação

No local ocorrem latossolos espessos, com horizonte concrecionário colunar, desenvolvidos sobre sedimentos argilo-arenosos da Formação Jaciparaná incipientemente consolidados e laterítos imaturos, de idade Pleistoceno. Do ponto de vista geológico-geotécnico estes solos são bem drenados, apresentam elevado volume de vazios, baixa massa específica aparente e elevada permeabilidade, devido à sua estrutura macroporosa e microagregada. Por outro lado, esta estruturação confere-lhes uma baixa suscetibilidade aos processos erosivos (REIS et al., 1996; KREBS et al., 1999).

A laterita, encontrada no local, é um solo residual da alteração da rocha mãe (granito), característica de climas úmidos e tropicais. O processo de laterização, por hidratação e oxidação dos elementos minerais, remove a sílica existente e, conseqüentemente, enriquece o solo e as rochas em ferro e alumínio. A presença, predominante dos hidróxidos de alumínio e ferro, caracteriza este tipo de solo.

Estes laterítos imaturos representam tipos com baixo grau evolutivo, caracteristicamente plintíticos e petroplintíticos, mostrando perfis geológicos simples, que permitem observar, onde preservados, uma estruturação geral que consiste horizontes bem definidos: horizonte de solo, no topo; horizonte concrecionário/colunar; horizonte mosqueado; horizonte pálido e rocha mãe na base (SCANDOLARA, 1999).

A partir de observações de afloramentos em cortes de estradas, em vales de drenagens, em escavações de pedreiras e de uma célula aberta na lixeira, com dimensões aproximadas de 4,5m x 70m x 90m, foi proposto uma seção geológica que melhor representa a estrutura do aterro, Figura 3.7.

A vegetação nativa da área do entorno da lixeira, parcialmente preservada, é composta de Floresta Ombrófila Aberta de terras baixas, cuja altitude de ocorrência varia de 40m a 150 m sobre o nível do mar. Esta tipologia caracteriza-se pela descontinuidade do dossel, permitindo que a luz solar alcance o sub-bosque, favorecendo a sua regeneração. (PLANAFLORO, 2002).

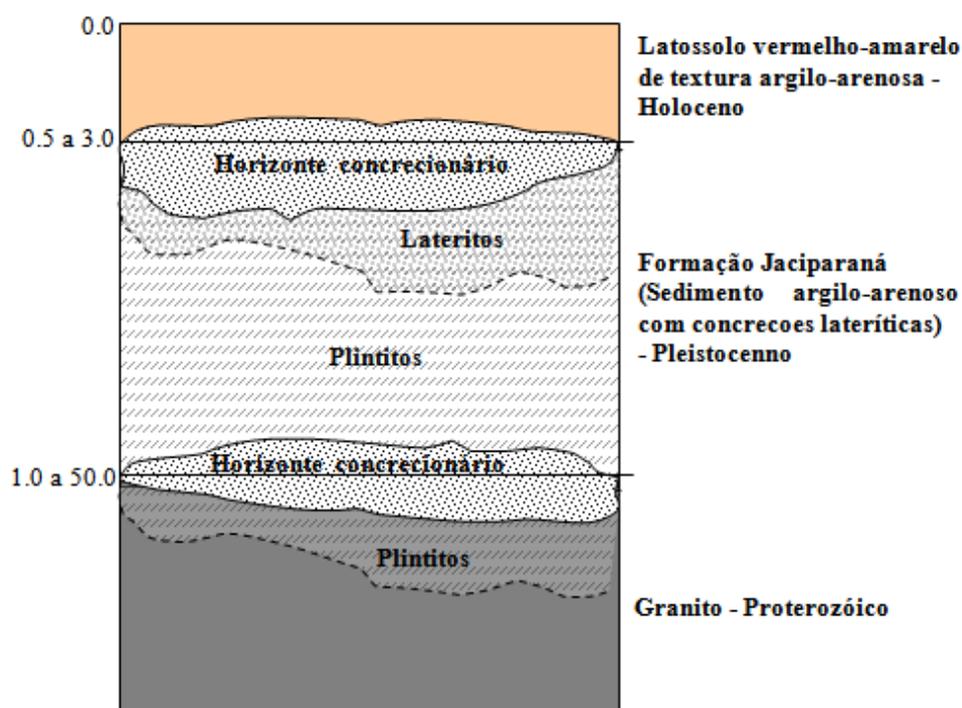


Figura 3.7: Seção geológica proposta para a área do aterro de Porto Velho

3.3.3 Geomorfologia e hidrogeologia

A área da lixeira apresenta um relevo suavemente ondulado a ondulado, com declividades que variam entre 2% e acima de 20% (REIS et al., 1996). A zona alta apresenta cotas altimétricas variando de 100 a 110 m e a zona baixa com cotas próximas a 60 m (Figura 3.8). O local onde se situa o depósito corresponde a um pequeno divisor de águas, com geometria alongada em forma de tabuleiro intensamente dissecado pelas drenagens. Nas encostas deste tabuleiro, ocorrem nascentes que dão origem aos pequenos cursos de água desta região, originando um igarapé, próximo à lixeira, que deságua no igarapé Mato Grosso e segue em direção ao Rio Madeira.

A Figura 3.8 apresenta o diagrama 3D da área da lixeira com direção da drenagem superficial.

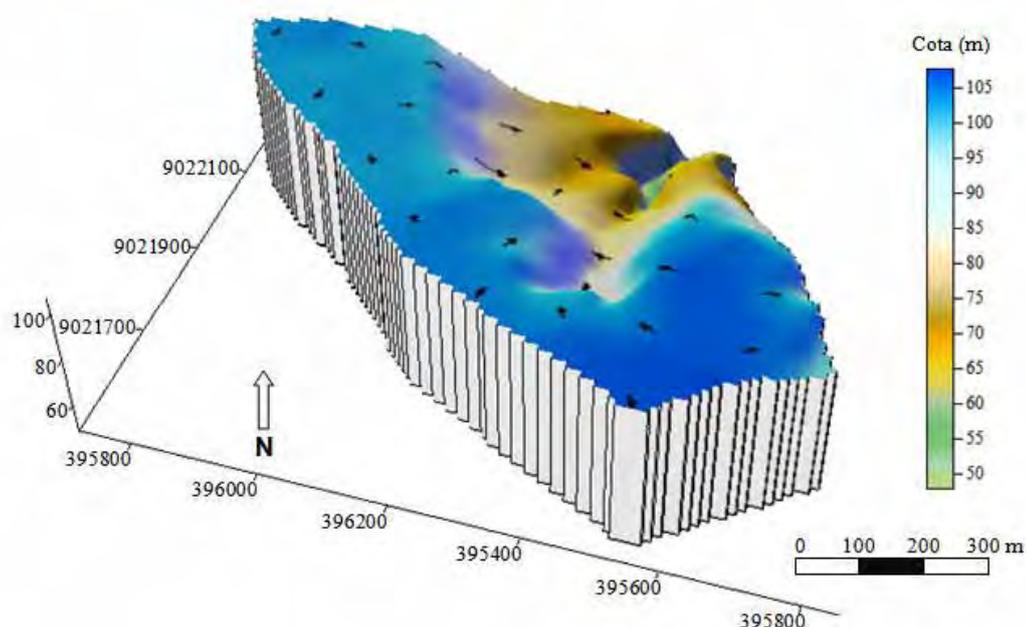


Figura 3.8: Diagrama 3D com topografia e direção da drenagem superficial da lixeira

A Figura 3.9 apresentada o mapa hidrogeológico, escala 1:100.000, com as principais unidades armazenadoras de água subterrânea da área de estudo e entorno, identificando três tipos de unidades: aquífugos; aquíferos intergranulares descontínuos livres a semi-confinados e aquícludes (RIZZOTTO, 2005):

- **Aquífugos** correspondem às ocorrências de laterítos imaturos concrecionários da Formação Jaciparaná e de rochas da suíte intrusiva Santo Antonio;
- **Aquíferos intergranulares descontínuos livres a semi-confinados** correspondem aos sedimentos da Formação Jaciparaná compostos principalmente por pediplanos argilo-siltosos com areia assim como a sedimentos aluvionares indiscriminados. Os sedimentos variam de areia fina a média por vezes conglomerática com algum teor de argila, sendo geralmente cobertos por uma camada argilosa ou silto-argilosa, o que lhes confere o caráter de semi-confinado; e
- **Aquícludes** correspondem a litologias porosas, saturadas, com alguma capacidade de armazenar água, no entanto, com baixíssimos valores de transmissividade, com ocorrências de sedimentos aluvionares compostos por argila.

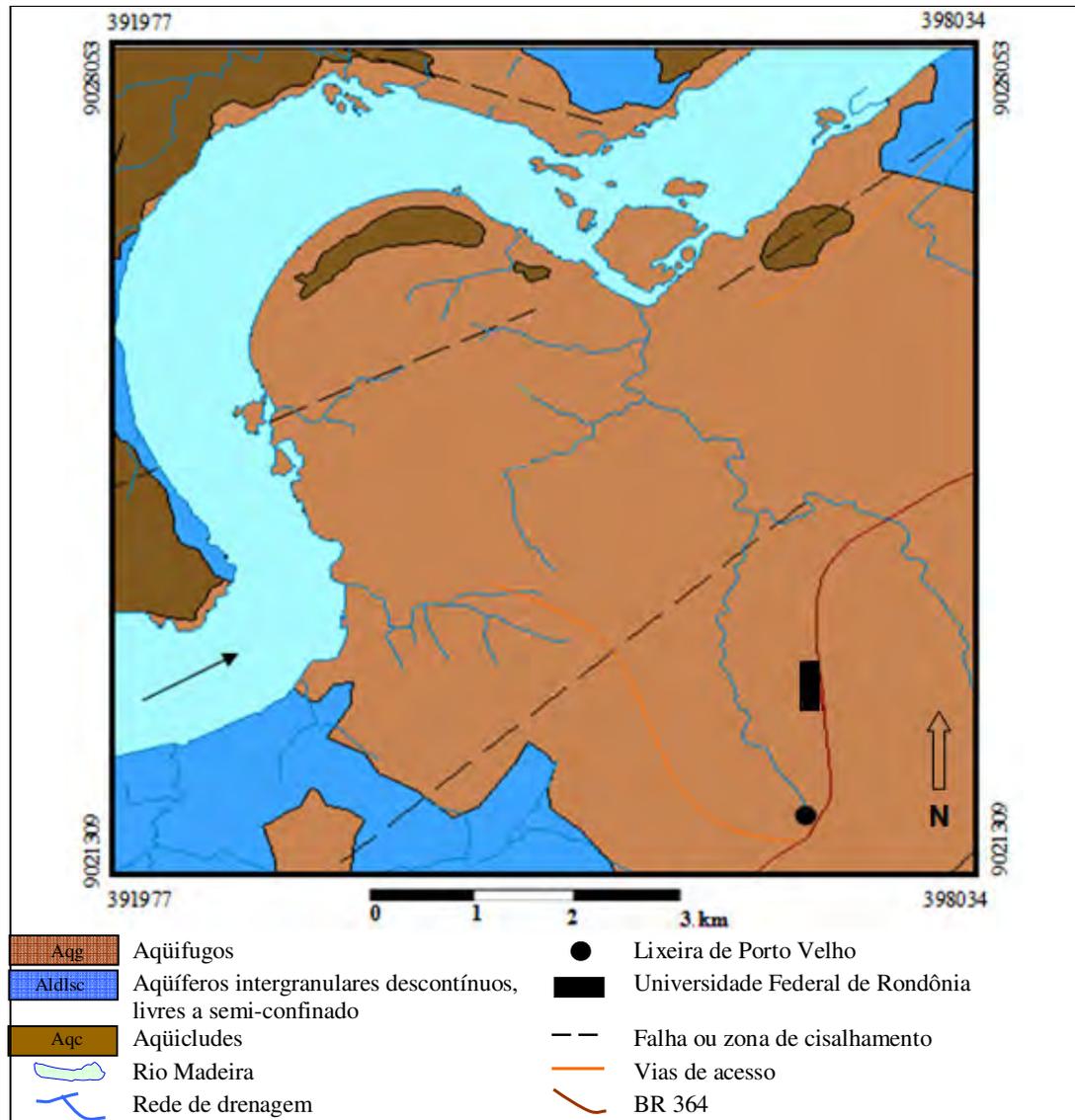


Figura 3.9: Unidades hidrogeológicas da lixeira e entorno (adaptado de RIZZOTTO, 2005)

3.4 Aspectos sociais e histórico da lixeira de Porto Velho

A lixeira de Porto Velho (Foto 3.1) teve sua origem em 1993 como um depósito a céu aberto e a partir de 2004 o lixo passou a receber uma cobertura de solo, que se assemelha a um aterro controlado. Este novo tratamento se deu pela ameaça constante de epidemias e o grande impacto ambiental causado por este tipo de deposição. A disposição final dos resíduos sólidos urbanos, coletados em Porto Velho, é feita em uma área total de 51 ha, aproximadamente 50% já ocupada com os resíduos, o restante corresponde à Vila Princesa e vale com floresta parcialmente nativa (KREBS et al., 1999).



Foto 3.1: Lixeira de Porto Velho - RO

Um depósito deste tipo apresenta condições propícias para proliferação de doenças. Além da liberação de gases gera o chorume que contamina o solo, o ar e os recursos naturais de água, com compostos orgânicos e íons metálicos, introduzindo vermes, bactérias, fungos e vírus que podem ser altamente prejudiciais à saúde dos habitantes da área e entorno.

Do ponto de vista legal e ambiental, considerando-se os critérios constantes na Legislação Ambiental Federal (ABNT, 1992), o local não é adequado para esse tipo de aterro, pois não respeita a distância mínima para corpos hídricos, a presença de vegetação de preservação, a topografia e não propicia a aceitação da população. A poucos metros da lixeira localiza-se a comunidade da Vila Princesa (Foto 3.2), na parte baixa ocorrem duas nascentes (NS1 e NS2) e no seu entorno: um igarapé; sítios, fazendas; o campus “José Ribeiro Filho” da

Universidade Federal de Rondônia – UNIR e uma área de preservação ambiental (Área de Proteção da Empresa de Águas Kaiary Ltda).



Foto 3.2: Comunidade Vila Princesa

A composição do lixo urbano de Porto Velho apresenta sua maior fração constituída por matéria orgânica, atingindo 50% de material reciclável (papel, papelão, metais, plásticos e vidros) e 40% de material considerado rejeito (NEUBAUER et al., 2000). Esta alta porcentagem de material reciclável se deve a falta de programas de reciclagens na cidade.

Parte da coleta do lixo urbano é feita pela Empresa Marquise que coleta aproximadamente 220 toneladas/dia de lixo domiciliar e 50 toneladas/dia de inertes (entulho). Estima-se que foram depositados mais de 1.000.000 tons de resíduos ao longo deste período de operação. A disposição era feita em células (Foto 3.3) por um trator de esteira, em seguida recoberto por uma camada de aproximadamente 60 cm de laterita extraída no local, dando origem a novas células, Foto 3.4. Como à área não comporta escavações de novas células, o lixo está sendo depositado em um vale de floresta, formando um talude de aproximadamente 10m de altura, Foto 3.5.



Foto 3.3: Lixo depositado na célula



Foto 3.4: Solo de cobertura extraído da formação de uma nova célula



Foto 3.5: Lixo depositado no vale, avançando à floresta

Durante um período, de aproximadamente um ano, após sua instalação, a operação no depósito seguiu alguns critérios, baseados em um projeto técnico do levantamento altimétrico da área, em ANEXO. Este projeto previa a operação do depósito através da construção de células com dimensões de 25 m x 150 m x 2,5 m, dotadas de drenos para o percolado. O material drenado seria conduzido para um sistema de filtros anaeróbios de fluxo ascendente. Foram construídas duas células com seus drenos (PORTO VELHO, 1993). Este projeto foi abandonado e o manejo do depósito voltou a ser realizado a céu aberto até o ano de 2004.

Verificações locais indicaram que existem duas nascentes de um igarapé, a nascente NS2 localizada na base do talude, totalmente coberta por resíduos sólidos e a nascente NS1, há 100m de NS2, Fotos 3.6 e 3.7.



Foto 3.6: Nascentes NS1



Foto 3.7: Nascentes NS2

No local não foi observada nenhuma impermeabilização de fundo, drenos para os gases, estruturas para contenção e tratamento do chorume e nenhum tipo de monitoramento da composição do percolado e gases.

O chorume gerado na lixeira contamina as águas deste igarapé desde suas áreas de nascentes. A Foto 3.8 mostra o sulcamento no talude de lixo em direção às nascentes, provocado pelo escoamento superficial das águas pluviais, contribuindo para a contaminação de suas águas.



Foto 3.8: Sulco erosivo no talude de lixo em direção às nascentes

De maio a setembro a forte evapotranspiração conduz o desenvolvimento e intensificação dos vapores e odores da lixeira, principalmente no período de junho a agosto (ver Figura 3.2, pág. 32), nesta mesma época ocorre a queima natural dos gases poluentes cuja fumaça e odor, dependendo da velocidade e direção do vento, se estende até o Campus da Universidade Federal de Rondônia, Foto 3.9.

A água consumida na comunidade da Vila Princesa é captada em um poço tubular (PC1), localizado na Vila, de aproximadamente 56m de profundidade, em rocha cristalina, monitorado pelos próprios moradores e de dois poços tipo Amazonas, localizados em duas residências, PC2 com 20 m e PC3 com 19 m de profundidade.



Foto 3.9: Queima dos gases na lixeira

O lixo hospitalar é depositado em células sépticas, construídas em alvenaria e impermeabilizadas com massa asfáltica, após o enchimento recebe uma camada de cal e outra de solo e em seguida isolada, Fotos 3.10 e 3.11.



Foto 3.10: Construção da célula para depósito do lixo hospitalar



Foto 3.11: Célula com lixo hospitalar pronta para isolamento

4 METODOLOGIA DE ESTUDO – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia de estudo e equipamentos utilizados nos ensaios de campo, definições e conceitos fundamentais referentes à geofísica aplicada, o método geofísico da eletro-resistividade com ênfase as técnicas de sondagem elétrica vertical e imageamento elétrico, que sustentam a base metodológica deste trabalho.

4.2 Geofísica aplicada

A Geofísica Aplicada é um ramo da geociências que estuda as ocorrências geológicas localizadas na subsuperfície, utilizando medidas diretas ou indiretas, geralmente realizadas na superfície do terreno. Foi desenvolvida, a princípio, para auxiliar a prospecção de minérios e petróleo.

O quadro preocupante do problema da contaminação de solos e águas subterrâneas tem estimulado os profissionais ligados às Ciências da Terra a pesquisar novas metodologias para estudar, avaliar e procurar soluções que possam minimizar os efeitos danosos causados pela disposição de resíduos em interação direta com o meio ambiente.

Para avaliar o nível de contaminação de uma área, visando o monitoramento e remediação, em geral, usa-se a geofísica aplicada na detecção e mapeamento da extensão da área afetada, profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo, profundidade do substrato rochoso e aquífero. Em alguns casos informações mais específicas podem ser importantes, como velocidade de fluxo, presença de fraturas e fluxo na zona saturada, avaliação de interação entre os poluentes e o meio físico, detecção de tipos específicos de materiais em áreas de disposição de resíduos, definição da espessura e estrutura de depósitos de resíduos.

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos, aliada, em geral, ao baixo custo operacional, facilidade de aplicação dos ensaios e a rapidez na obtenção dos resultados para monitoramento da pluma de contaminação, em relação aos métodos convencionais (análises de poços), torna-os adequados para aplicação no estudo de depósitos de resíduos sólidos urbanos (COSTA e FERLIN, 1993).

A escolha do método geofísico adequado ao estudo de um local contaminado se deve ao tipo de informação necessária para avaliação do problema.

Na classificação dos principais métodos geofísicos de prospecção, Figura 4.1, para o estudo das estruturas geológicas do subsolo, destaca-se os métodos geoeletricos, os quais se fundamentam no uso de campos elétricos e eletromagnéticos no subsolo (BRAGA, 2001).

A principal propriedade física investigada por estes métodos é a resistividade elétrica ou o seu inverso, a condutividade elétrica. As investigações geoeletricas têm por objetivo a determinação da distribuição das resistividades (ou condutividades) em subsuperfície.

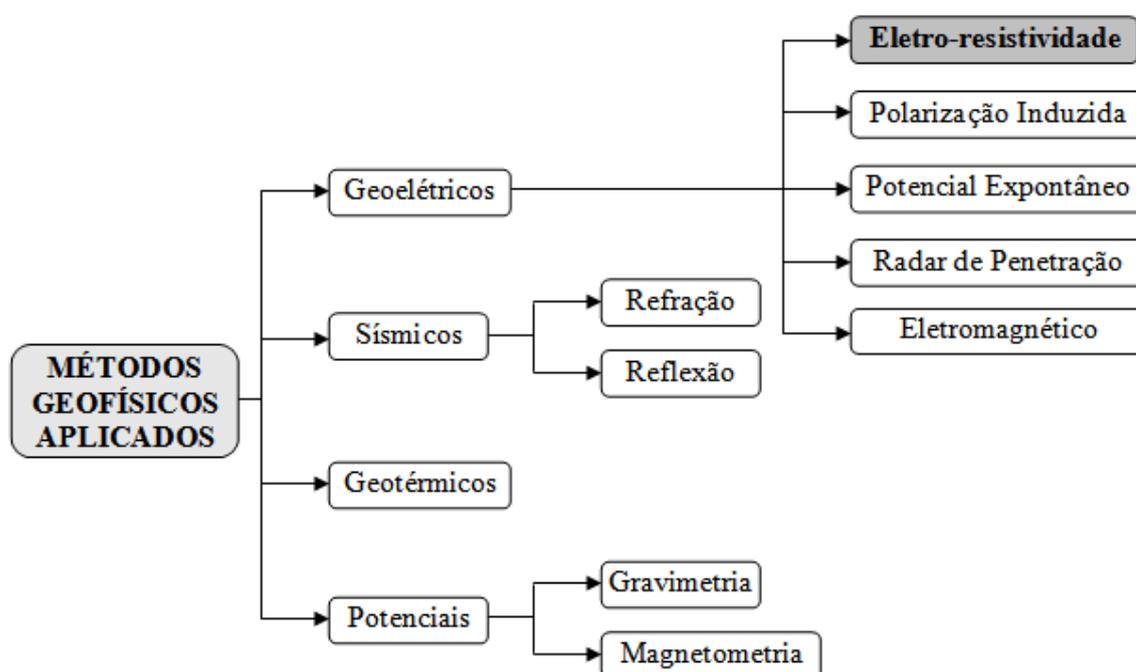


Figura 4.1: Métodos geofísicos de prospecção

Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a eletro-resistividade, é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação da resistividade elétrica do subsolo. O emprego desse método é devido às rochas, em função de suas composições mineralógicas, texturais e disposições, apresentarem a propriedade elétrica da resistividade (resistência que o material oferece a passagem da corrente elétrica).

4.3 Método geofísico da eletro-resistividade

4.3.1 Resistividade dos materiais

A resistividade elétrica (ρ) de um material é a propriedade física que se relaciona com a capacidade de permitir ou não a passagem de uma corrente elétrica. Depende da natureza e do estado físico do material e pode ser expressa na forma da resistência de um sólido condutor homogêneo.

Seja o cilindro (Figura 4.2) um material condutor de resistência R , dada em ohm (Ω), de aresta unitária L (em metros) e seção transversal S (em m^2). A corrente I que flui pelo condutor provoca uma diferença de potencial $\Delta V = V_A - V_B$ entre suas extremidades.

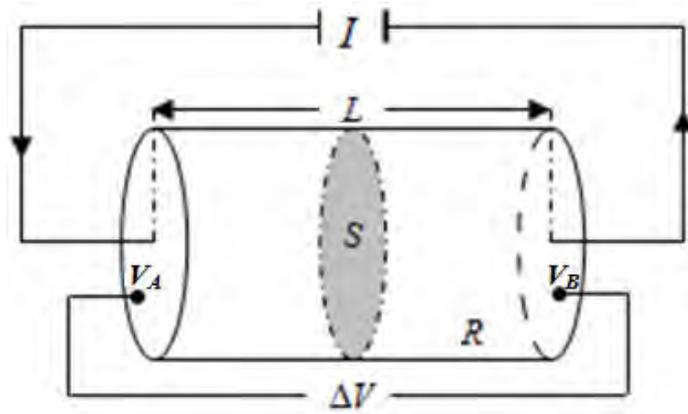


Figura 4.2: Cilindro condutor

A resistividade ρ , em ohms x m ($\Omega \cdot m$), deste material, é obtida por:

$$\rho = \frac{R S}{L} \quad (4.1)$$

Da Lei de Ohm⁸, e a partir da equação (4.1), tem-se:

$$\frac{\Delta V}{L} = \frac{\rho I}{S} = \rho i, \quad (4.2)$$

⁸ Em um cilindro condutor, a corrente (I) é proporcional à voltagem (ΔV), ou seja, $\Delta V = I R$

em que: $\frac{\Delta V}{L}$ é o gradiente do potencial através do elemento do volume (em volt.m) e
 i a densidade da corrente (em A/m²).

Seja uma corrente elétrica injetada, a partir de um eletrodo A, na superfície de um meio homogêneo e isotrópico. Este meio se comporta como uma superfície equipotencial e as linhas de fluxo de corrente partem do ponto de aplicação em todas as direções de forma radial, Figura 4.3.

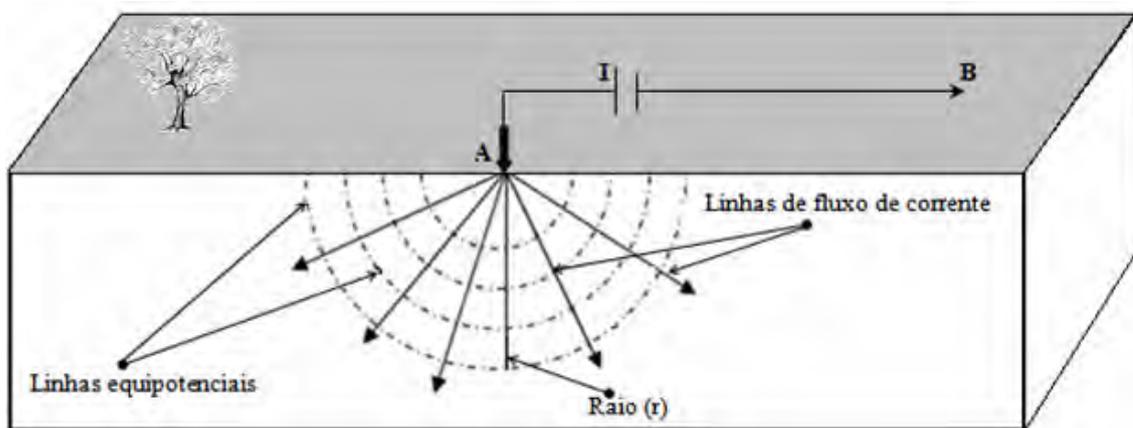


Figura 4.3: Fluxo de corrente de um eletrodo na superfície

Quando o circuito é fechado no eletrodo B, a certa distância de A, a corrente flui perpendicularmente na subsuperfície (semi-esférica) de área $S = 2\pi r^2$, com distância r do eletrodo ao ponto de medida na superfície. Considerando a condutividade do ar nula, a densidade de corrente i em coordenadas esféricas na posição r , é obtida por:

$$i = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (4.3)$$

Da equação (4.2) o gradiente de potencial associado à densidade de corrente i , relação (4.3), é dado por:

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \rho i = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (4.4)$$

O potencial V , a uma distância r do eletrodo A , é obtido pela integral,

$$V = \int_r^{\infty} \Delta V \, dr = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (4.5)$$

Assim, obtém-se:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}, \quad (4.6)$$

relação que fornece o potencial de uma única fonte pontual na superfície, utilizada pelos métodos elétricos (WARD, 1990).

A resistividade é uma propriedade física de cada substância, medida e tabelada para vários materiais. No entanto as rochas e principalmente os solos, são meios passíveis de grandes variações laterais e verticais de propriedades físicas e químicas, as quais se refletem nos valores da resistividade.

A propagação da corrente nestes materiais pode ocorrer através de dois mecanismos de condução: eletrônica (através dos materiais que possuem elétrons livres na matriz da rocha) e iônica ou eletrolítica (através de íons existentes na água contida nos poros interconectados e fraturas do maciço rochoso)

Em geral, as rochas e os solos apresentam altas resistividades, mas, com o aumento da saturação em seus poros e/ou fraturas, estas resistividades diminuem. Muitas vezes essa água possui sais dissolvidos, podendo vir a ser uma boa condutora de eletricidade. A rocha porosa que é saturada em água salgada permitirá que a eletricidade flua com relativa facilidade, pois o líquido em seus poros possui baixa resistividade.

Considerando um mesmo tipo litológico, fraturamentos apresentam um comportamento de baixa resistividade (alta condutividade) em meio a valores de alta resistividade. A presença de fraturas na matriz rochosa torna-se uma região que facilita a infiltração de águas e alteração da rocha, proporcionando uma redução nos valores de resistividades originais da rocha sã (GALLAS, 2000).

De acordo com a lei de Archie apud Gallas et al. (2005), a resistividade de uma rocha, saturada com água, pode ser determinada pela relação:

$$\rho = a\rho_w\varphi^{-m}, \quad (4.7)$$

em que: ρ_w : resistividade da água nos poros;

φ : porosidade;

a e m : parâmetros que dependem da geometria porosa da rocha.

A resistividade de solos e rochas, pode variar conforme a composição mineralógica, porosidade e principalmente a quantidade de água e sais dissolvidos que ocasiona uma diminuição nos valores de resistividade.

A seguir será descrito o método geofísico da eletro-resistividade que foi utilizado neste trabalho. Tal escolha é devida à eficiência de suas respostas, conforme registrado na seção 2.2.4.

4.3.2 Método da eletro-resistividade

Este método emprega uma corrente elétrica para identificar variações de resistividade elétrica no meio. Esta corrente é introduzida na superfície do solo através de dois eletrodos com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente. As relações entre corrente elétrica, potencial elétrico e disposição geométrica dos eletrodos no terreno permitem calcular a resistividade aparente em subsuperfície.

Para se calcular a resistividade em um meio homogêneo, considera-se uma corrente elétrica (I) injetada na superfície por um par de eletrodos de corrente A e B (emissores) e o potencial associado a essa corrente que é medido em outros dois eletrodos de potencial M e N (receptores), Figura 4.4 (BRAGA, 2001).

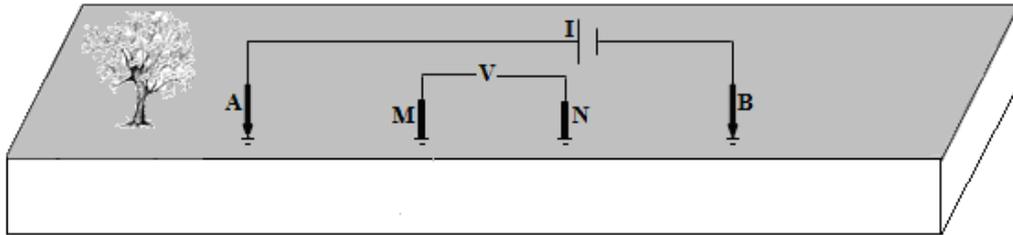


Figura 4.4: Disposição dos eletrodos de corrente (A e B) e potencial (M e N)

O potencial medido no eletrodo M , obtido a partir da relação (4.6) é dado por:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right). \quad (4.8)$$

Analogamente, o potencial medido no eletrodo N , será:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right). \quad (4.9)$$

A diferença de potencial (ΔV) medida nos eletrodos M e N fica,

$$\Delta V = V_M - V_N. \quad (4.10)$$

Substituindo (4.8) e (4.9) em (4.10) tem-se,

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (4.11)$$

Sendo,

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}, \quad (4.12)$$

em que: K é o coeficiente geométrico, seu valor varia conforme disposição dos eletrodos na superfície; e

AM , BM , AN e BN são os espaçamentos entre eletrodos.

Tem-se, então:

$$\rho = \frac{K \Delta V}{I}, \quad (4.13)$$

relação que determina o valor da resistividade.

Ao utilizar a mesma disposição dos eletrodos A , M , N e B para efetuar medições sobre um meio homogêneo, a diferença de potencial observada (ΔV) será diferente no meio heterogêneo, devido o campo elétrico sofrer modificações em função da heterogeneidade dos materiais geológicos. A resistividade ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 e ρ_4 no meio não homogêneo (Figura 4.5) possivelmente não será igual em nenhuma das quatro, mas terá influencia de todas elas, de suas respectivas distribuições e geometrias dos corpos.

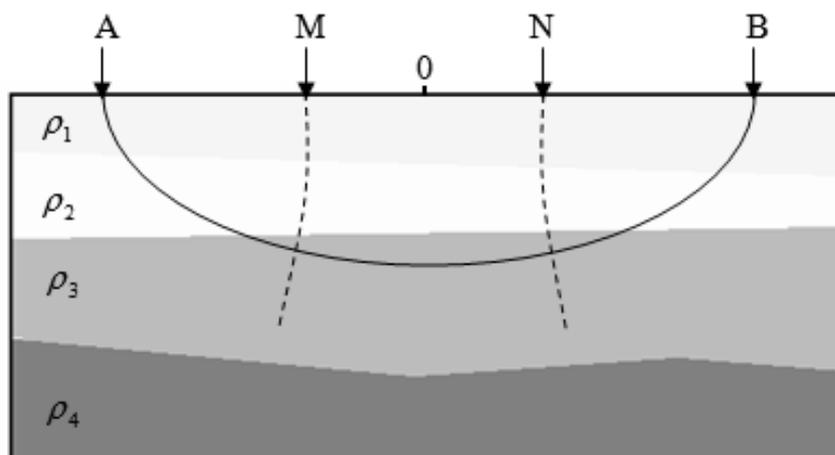


Figura 4.5: Ilustração de subsolo heterogêneo (modificado de BRAGA, 2006)

Como o subsolo, em geral, não pode ser considerado um meio homogêneo, pois possui uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade (meio heterogêneo e anisotrópico), então a resistividade real (ρ), calculada nos ensaios, assume a notação de resistividade aparente (ρ_a), (GALLAS et al., 2001), logo:

$$\rho_a = \frac{K\Delta V}{I}. \quad (4.14)$$

Essas heterogeneidades e anisotropias dos materiais geológicos do subsolo, que geralmente estão distribuídas tanto lateralmente como em profundidade, são causadoras das distorções no campo elétrico, e são na superfície, traduzidas por anomalias de resistividade aparente.

4.3.3 Técnicas de ensaios de campo

4.3.3.1 Generalidades

As principais técnicas de aplicação dos ensaios de campo no método da eletro-resistividade são as seguintes: (1) **Sondagem Elétrica Vertical (SEV)**, caracterizada pela investigação vertical pontual das variações do parâmetro físico com a profundidade; (2) **Imageamento Elétrico (IE)**, caracterizada pela investigação lateral das variações do parâmetro físico a uma ou varias profundidades teoricamente constantes; e (3) **Perfilagem Elétrica (PERF)**, caracterizada pela investigação lateral e vertical das variações do parâmetro físico efetuadas no interior de furos de sondagens, Figura 4.6.

A diferença básica entre elas esta na disposição dos eletrodos na superfície do solo ou interior de furos de sondagens e na forma que como será desenvolvida a investigação para se obter os dados de campo, ligada aos objetivos da pesquisa e geologia da área (BRAGA, 2001).

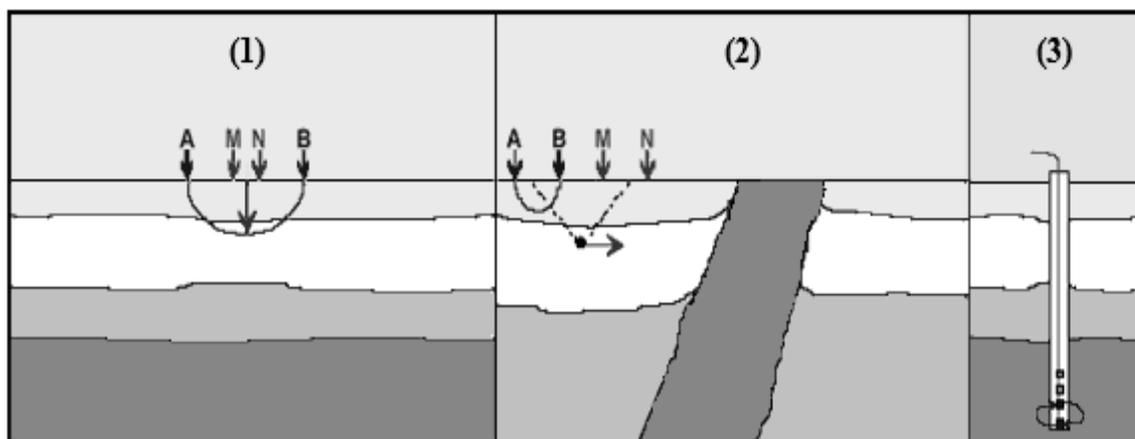


Figura 4.6: Técnicas utilizadas nos métodos geoeletricos (modificado de BRAGA, 2001)

Objetivando uma investigação em profundidade e lateral na superfície do solo utilizou-se, neste estudo, a sondagem elétrica vertical (1D) e imageamento elétrico (2D).

4.3.3.2 Sondagem elétrica vertical (1D)

Esta técnica (Figura 4.7) consiste em uma serie de determinações de resistividade aparente efetuadas a partir da superfície do terreno, mantendo-se uma separação crescente apenas dos eletrodos de emissão de corrente (AB) em quanto que os eletrodos de potencial permanecem fixos, os resultados são interpretados em termos de camadas ou estratos geoeletricos. É usada preferencialmente para camadas plano-paralelas, quando existe a necessidade de se conhecer a variação vertical de resistividade e, assim, calcula a profundidade (espessura) e resistividade das camadas presentes. O procedimento é baseado no fato de que a corrente penetrará continuamente em maiores profundidades à proporção que se aumenta o espaçamento (AB) entre os eletrodos de corrente, na superfície.

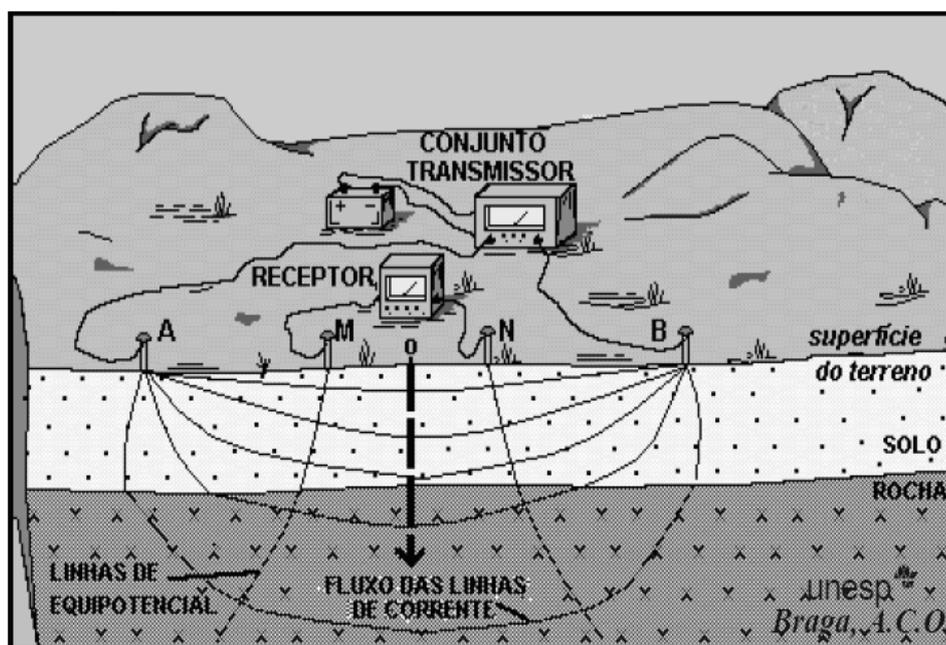


Figura 4.7: Esquema de campo da técnica da SEV (BRAGA, 2001)

4.3.3.3 Imageamento elétrico (2D)

Esta técnica é utilizada para levantamento bidimensional (2D) de resistividade, sua interpretação não se limita as pseudo-seções e sim em “imagens” obtidas do processamento dos dados, a partir de rotinas de inversão (GANDOLFO, 2007).

O imageamento elétrico aplica-se na identificação de contatos geológicos laterais ou inclinados, mudanças laterais de fácies ou estruturas, como falhas e fraturas, além da avaliação de contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras, prospecção de aquíferos em meio fraturado, prospecção de areia e cascalho e outros (ELIS, 1998).

Nesta técnica, os eletrodos *A*, *B*, *M* e *N* são dispostos ao longo da superfície para detectar variações laterais de resistividade a profundidades de investigação aproximadamente constantes. Na prática, o procedimento de campo consiste em manter constante o arranjo entre os eletrodos e medir a diferença de potencial (ΔV) gerada pela passagem da corrente (I) no solo, Figura 4.8.

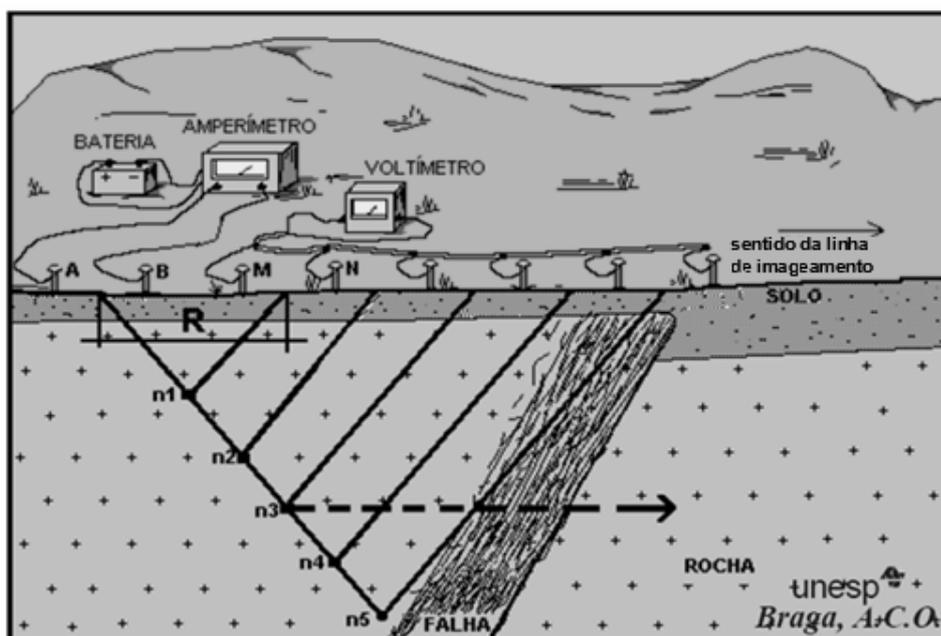


Figura 4.8: Esquema de campo da técnica do IE (BRAGA, 2001)

As investigações pelo imageamento elétrico geralmente são realizadas ao longo de perfis e os resultados obtidos se relacionam entre si através, ou de um estudo em mapas a uma ou mais profundidades determinadas ou de seções com várias profundidades de investigação (vários níveis de investigação).

4.3.4 Arranjos de campo

A aquisição da resistividade aparente do subsolo pode ser feita a partir da combinação de uma das três técnicas de ensaios com um dos diversos arranjos propostos para o método da eletro-resistividade.

Para o desenvolvimento das técnicas de campo, diferentes procedimentos de campo podem ser adotados. Esses procedimentos referem-se à configuração eletródica na superfície, ou seja, disposição dos eletrodos de corrente e potencial na superfície do terreno, denominados **arranjos de campo**, variam em função dos propósitos do levantamento, situação geológica e do tipo e qualidade de informações que se deseja obter (GALLAS, 2000)

Os arranjos mais utilizados são: dipolo-dipolo, pólo-dipolo, gradiente, Schlumberger e Wenner. A Tabela 4.1 apresenta, segundo Ward (1990), o desempenho desses arranjos quanto à resolução lateral e vertical.

Tabela 4.1: Avaliação de arranjos da eletro-resistividade quanto à resolução (WARD, 1990)

Resolução	lateral	vertical
dipolo-dipolo	2	2
pólo-dipolo	3	2
gradiente	1	5
Schlumberger	4	1
Wenner	5	1

1- melhor; 2 - segundo melhor; 3 - terceiro melhor; 4 - quarto melhor; 5 - pior

Quanto à resolução lateral se destacam o gradiente e o dipolo-dipolo, e vertical o melhor desempenho são os arranjos Wenner e Schlumberger.

A seguir serão descritos os arranjos Schlumberger e dipolo-dipolo, utilizados neste trabalho. A escolha se deve à eficiência das respostas, quando aplicados conjuntamente, em áreas de disposição de resíduos sólidos, como citado nos trabalhos de Coggon (1973); Ward (1990); Elis e Zuquette (1996); Malagutti Filho et al. (1997) e outros.

4.3.4.1 Arranjo Schlumberger – empregado na Sondagem Elétrica Vertical

Neste arranjo os quatro eletrodos A , M , N , B são dispostos linearmente na superfície, os eletrodos de corrente A e B apresentam uma separação crescente e os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos, a uma distância $MN \leq AB/5$, durante o desenvolvimento do ensaio, Figura 4.9.

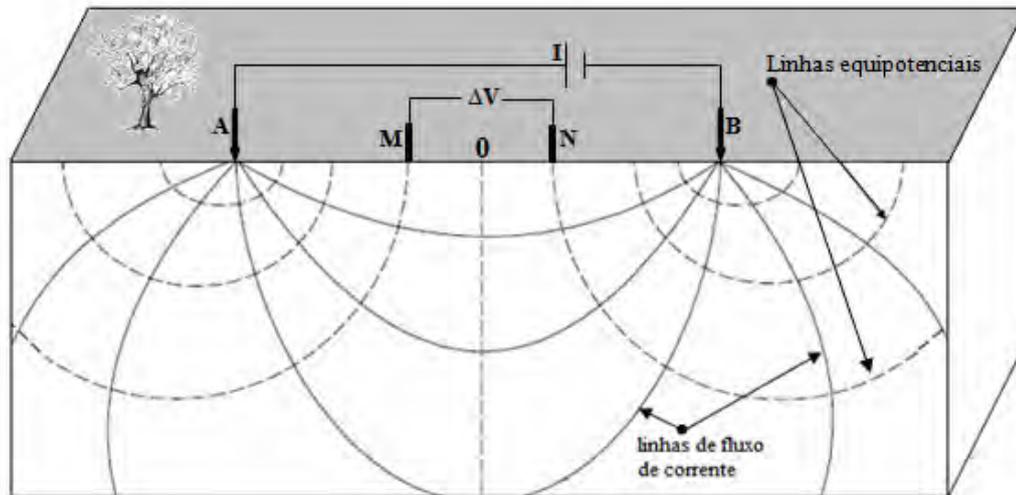


Figura 4.9: Disposição do arranjo Schlumberger (modificado de ELIS, 1998)

Os eletrodos M e N estão a uma distancia $l = MN/2$, simétrica ao ponto de sondagem “0” ou centro geométrico do arranjo e os eletrodos A e B a uma distância $L = AB/2$ de “0”, alinhados na superfície. Aplicando a relação (4.12) do fator K , tem-se:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} = 2\pi \left(\frac{1}{L-l} - \frac{1}{L+l} - \frac{1}{L+l} + \frac{1}{L-l} \right)^{-1} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{L^2 - l^2}{l} \right),$$

logo,

$$K = \frac{\pi}{MN} \left[\left(\frac{AB}{2} \right)^2 - \left(\frac{MN}{2} \right)^2 \right] = \frac{\pi}{MN} (AM \cdot AN), \quad (4.15)$$

é o fator geométrico deste arranjo, usado na relação (4.14) para cálculo da resistividade aparente (ρ_a) da subsuperfície.

No desenvolvimento de uma SEV, à medida que se expande a abertura entre os eletrodos A e B , com o objetivo de aumentar a profundidade investigada, o sinal ΔV torna-se muito pequeno, aumentando a imprecisão dos dados medidos. Para corrigir este efeito aumenta-se a distância MN em relação à AB , ou seja, adota-se um intervalo inicial MN e realizam-se várias medições com diferentes AB , em seguida aumenta a distância MN conservando constante para outra série de deslocamentos AB , sobrepondo dois ou três pontos da série anterior, evitando deslocar ao mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial, mantendo-se a relação $MN \leq AB/5$.

Esta alteração denominada “embreagem” busca melhorar a relação sinal/ruído, além de permitir a identificação de eventuais efeitos de variação lateral de resistividade nas proximidades dos eletrodos de potencial.

Os dados de resistividade aparente (ρ_a), obtidos em cada SEV, são representados em gráficos bilogármtimos em função da distância $AB/2$. A Figura 4.10, apresenta uma curva de campo típica, ilustrando quatro embreagens com cinco espaçamentos MN , e resistividades aparentes calculadas para cada espaçamento $AB/2$, utilizado.

A curva final suavizada (curva azul), tomada para interpretação, é obtida tomando-se o segmento correspondente ao menor $MN/2$ utilizado, sendo que os demais segmentos são rebatidos (paralelamente). No caso da Figura 4.10, tomou-se a curva referente ao espaçamento $MN/2=0.3$, sendo que o restante da curva final, mantendo o paralelismo, foi traçada rebatendo os vários segmentos.

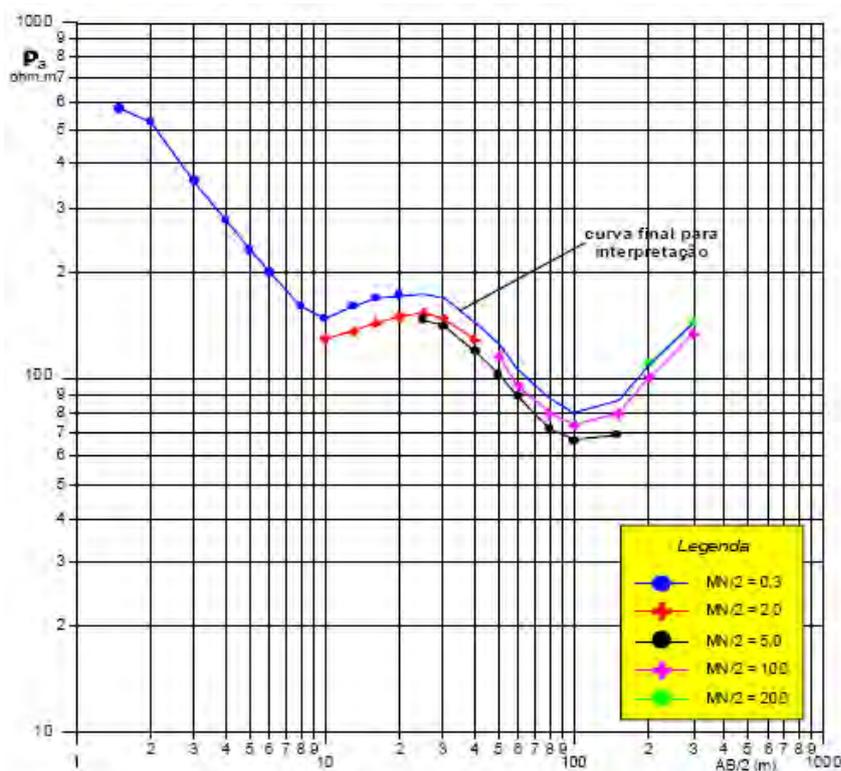


Figura 4.10: Esquema da embreagem em curvas de SEV (BRAGA, 2001)

Segundo Elis (1998), o arranjo Schlumberger é o mais utilizado em sondagem elétrica vertical, isto se deve à qualidade das curvas de campo, a facilidade e rapidez na execução do

ensaio e por apresentar menor susceptibilidade às variações laterais de resistividade e ruídos como, correntes naturais no subsolo, linhas de alta tensão, dentre outros.

4.3.4.2 Arranjo dipolo-dipolo – empregado no imageamento elétrico

Neste arranjo, os eletrodos de corrente A e B e os eletrodos de potencial M e N são alinhados sobre um mesmo perfil. A aquisição dos dados consiste em executar uma série de medições mantendo-se fixo as distâncias AB e MN , aumentando-se a separação entre AB e MN de acordo com o fator nx , em que $x = AB = MN$ e $n = 1, 2, 3, \dots$ níveis de investigação, Figura 4.11.

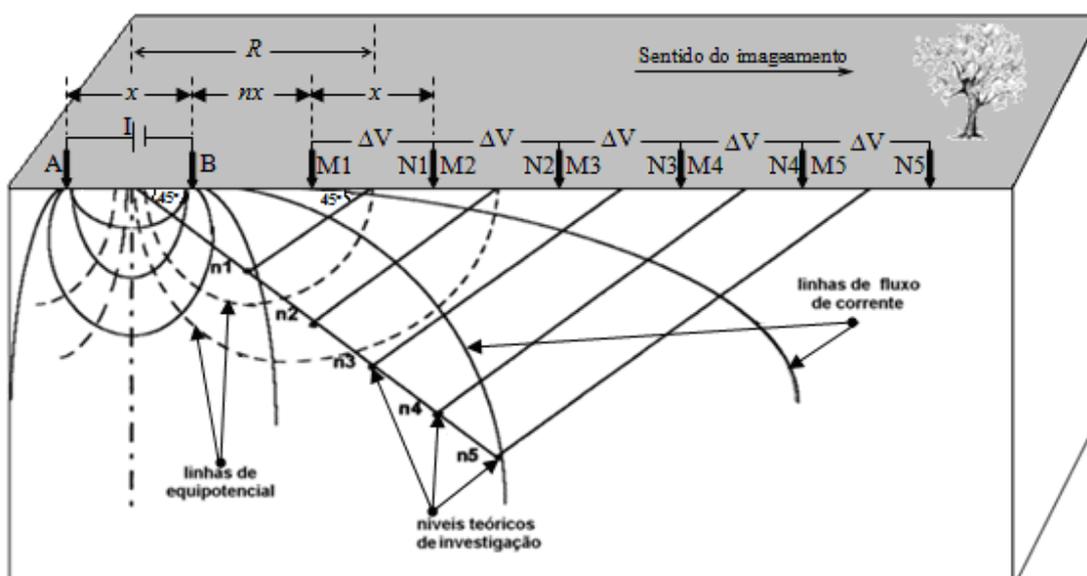
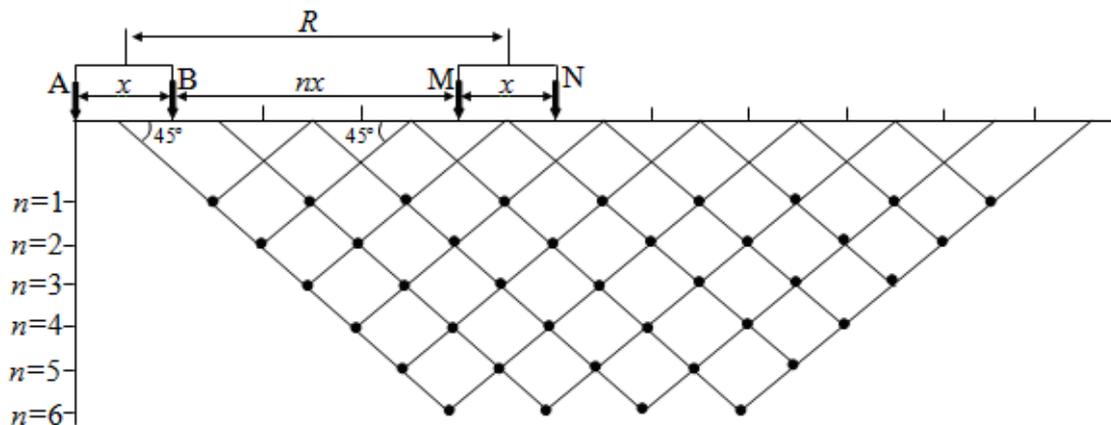


Figura 4.11: Disposição do arranjo dipolo-dipolo (modificado de ELIS, 1998)

Comumente, as medições são feitas para amostrar várias profundidades de investigação e interpoladas, gerando uma pseudo-seção (plotagem convencional) de resistividade aparente ao longo da linha do levantamento. Esta representação dos dados é denominada pseudo-seção porque as formas e contornos assumidos não são absolutamente verdadeiros e sim, uma aproximação. Não dependem exclusivamente das distribuições de resistividades, mas também do tipo de arranjo empregado.

A pseudo-seção é obtida da seguinte forma: os valores de resistividade aparente são atribuídos a um ponto da subsuperfície, localizado na intersecção das retas que partem a 45° do ponto médio dos dipolos AB e MN , Figura 4.12.



• Resistividade aparente

Figura 4.12: Plotagem do arranjo dipolo-dipolo proposta por Hallof apud Gandolfo (2007)

Cada linha horizontal na pseudo-seção (Figura 4.12) esta associada a um valor de “ n ” e também a uma “profundidade teórica de investigação”, resultando numa representação apenas qualitativa das variações verticais da resistividade aparente (GANDOLFO, 2007).

A resistividade aparente, neste tipo de arranjo, é obtida a partir da relação (4.14) com fator geométrico K dado por:

$$K = 2\pi Gx, \quad (4.16)$$

em que,

$$G = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} \right)^{-1}. \quad (4.17)$$

O arranjo dipolo-dipolo, é o mais utilizado na investigação de contaminantes, pela precisão nos resultados e rapidez na execução em campo. Segundo Ward (1990) é o arranjo de melhor resolução, apresentando anomalias mais intensas, considerando relações verticais.

4.3.4.3 Profundidade de investigação

A profundidade de investigação é a aquela na qual uma camada fina horizontalizada tem a maior contribuição no sinal total medido na superfície do solo. Como a corrente flui de modo radial, então quanto maior a distancia entre os eletrodos de injeção de corrente, maior será a profundidade teórica investigada (ELIS, 1998).

No arranjo Schlumberger a profundidade teórica de investigação (h) normalmente é considerada como:

$$h \cong AB/5 = 0.2 AB \quad (4.18)$$

A Tabela 4.2 mostra a profundidade teórica de investigação (h) em função da abertura AB , para este tipo de arranjo, segundo alguns autores.

Tabela 4.2: Profundidade teórica de investigação para o arranjo Schlumberger

Autores	Profundidade (h)
BHATTACHARY e PATRA (1968)	$0.167AB < h < 0.2 AB$
ROY e APPARAO (1971)	$h = 0.125 AB$
BARKER (1989)	$h = 0.19 AB$
TELFORD et al. (1990)	$h = 0.167 AB$

No arranjo dipolo-dipolo a profundidade de investigação aumenta conforme o espaçamento R , que varia com o espaçamento MN , teoricamente corresponde a $R/2$.

A Tabela 4.3 apresenta a profundidade teórica de investigação (h) para este tipo de arranjo, segundo alguns autores.

Tabela 4.3: Profundidade teórica de investigação para o arranjo dipolo-dipolo

Autores	Profundidade (h)
ROY e APPARAO (1971)	$h = 0.195 AN$
EDWARDS (1977)	$x(n+1)/2$
BARKER (1989)	$h=0.25 (MN=AB \text{ ou } n = \infty)$

Edwards (1977) utilizou coeficientes empíricos para profundidades de penetração e propôs uma pseudo-seção modificada para o arranjo dipolo-dipolo. A Tabela 4.4 apresenta as profundidades de investigação em função de $L = AN$ (abertura entre os eletrodos extremos do arranjo).

Tabela 4.4: Profundidade de investigação em função de L , para o arranjo dipolo-dipolo

Níveis de Investigação (n)	1	2	3	4	5	6	∞
Fator de Multiplicação	$0.139L$	$0.174L$	$0.192L$	$0.203L$	$0.211L$	$0.216L$	$0.250L$

A Figura 4.13 mostra uma seqüência de medições para o arranjo dipolo-dipolo utilizando um sistema com 16 eletrodos, espaçamento x entre dipolos $AB = MN$ e seis níveis de investigação, em uma linha de imageamento elétrico (2D). A profundidade da ultima linha horizontal ($n = 6$) é aproximadamente equivalente à profundidade teórica de investigação (EDWARDS, 1977).

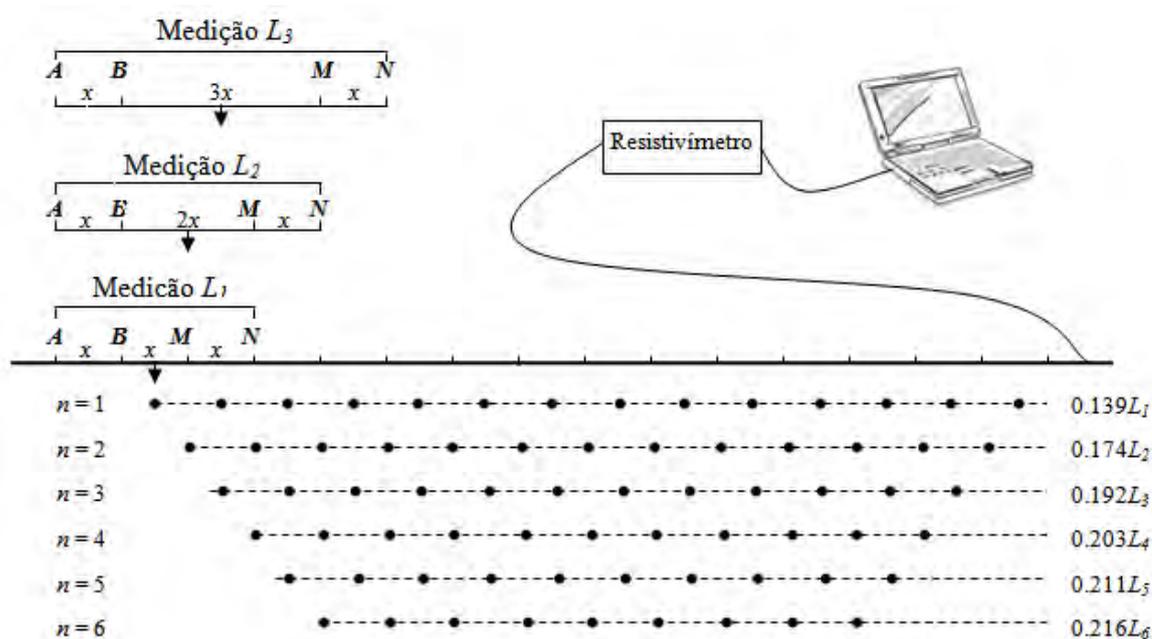


Figura 4.13: Arranjo dipolo-dipolo para um levantamento bidimensional e a seqüência de medições usada para construir uma pseudo-seção de IE

A presença de uma camada condutiva superficial (manto de alteração argiloso, saturado e/ou salinizado) reduzirá de maneira significativa a penetração da corrente,

acarretando uma diminuição na espessura do pacote investigado. Também um pacote extremamente resistivo (anidrita, crostas lateríticas e outras) pode ser uma barreira à penetração de corrente, dificultando ou impedindo, igualmente, a continuidade da investigação.

4.3.5 Equipamentos utilizados nos ensaios

Para os ensaios de sondagem elétrica vertical e imageamento elétrico foi utilizado o equipamento *Terrameter*, modelo SAS 4000, da *ABEM Instruments*, unidade composta por bateria, transmissor e receptor de corrente, fios de conexão e eletrodos de metal, para envio da corrente e leitura do potencial. O transmissor deste equipamento opera com uma corrente variando de 1 a 1000 mA, uma voltagem máxima de 400 volts e uma potência máxima 100 watts. Este equipamento e acessórios pertencem ao Departamento de Geologia Aplicada – IGCE/UNESP – Rio Claro / SP, Foto 4.1.



Foto 4.1: Equipamento *Terrameter* SAS 4000 utilizado nos ensaios

4.4 Interpretação dos dados geoeletricos

A interpretação dos dados pode ser qualitativa e quantitativa. A primeira tem como objetivo fornecer dados primários da estrutura do subsolo em estudo, sem a necessidade do uso específico da modelagem matemática. Já a interpretação quantitativa consiste em usar a modelagem numérica, utilizando os métodos direto e inverso em conjunto com informações diretas das litologias, profundidades do nível das águas dos poços e dados de condutividade elétrica das amostras de águas dos poços e nascentes.

4.4.1 Interpretação quantitativa uni-dimensional

Consiste na interpretação uni-dimensional (1D) dos dados de sondagem elétrica vertical, levando em consideração um modelo geoeletrico isotrópico e homogêneo, onde as resistividades variam com a profundidade. Nesta interpretação, usam-se os métodos comparativos, diretos e inversos.

Neste trabalho, após a obtenção das curvas de campo e suavização dos dados (eliminação de dados inconsistentes), utilizou-se o método comparativo, baseado no método de Ebert (BRAGA, 1988), que forneceu uma interpretação preliminar dos dados (modelo geoeletrico inicial). Este método consiste em reduzir artificialmente o número de camadas da curva de campo, substituindo as duas (ou três) primeiras por uma camada equivalente, e assim sucessivamente, a partir de uma ou mais cartas da família das curvas teóricas auxiliares (cartas H, A, Q e K). Como o problema de múltiplas camadas é progressivamente reduzido a um simples caso de duas (ou três) camadas, utiliza-se o método da superposição, que consiste na comparação da curva de campo com as curvas teóricas auxiliares de duas camadas, publicadas por Bahattacharya e Patra (1968).

Inicialmente as SEVs são identificadas por sua morfologia, ou seja, procura-se identificar as variações das resistividades em subsuperfície, correspondendo às distribuições verticais das resistividades dentro de um volume determinado no subsolo. Estas variações podem ser classificadas segundo seu número de camadas e de relações de desigualdades entre elas, Figura 4.14. Identificadas as camadas, as curvas de resistividades em função do espaçamento $AB/2$, podem ser dos tipos:

- Para duas camadas: ascendente ($\rho_1 < \rho_2$) e descendente ($\rho_1 > \rho_2$);
- Para três camadas: K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$); H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$); Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) e A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$); e
- Mais de três camadas: Neste caso, são obtidas a partir da combinação de curvas de três camadas. A curva $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$, do tipo KH, é a combinação das curvas K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) e H($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$).

Obtido o modelo geoeétrico inicial, procede-se a análise das curvas por processo de refinamento, usando o método direto e inverso, que em conformidade com a geologia da área de estudo resulta um modelo geoeétrico final. O método direto consiste em calcular a partir do modelo inicial e de programas computacionais, a curva teórica correspondente que melhor se ajusta a curva obtida no campo.

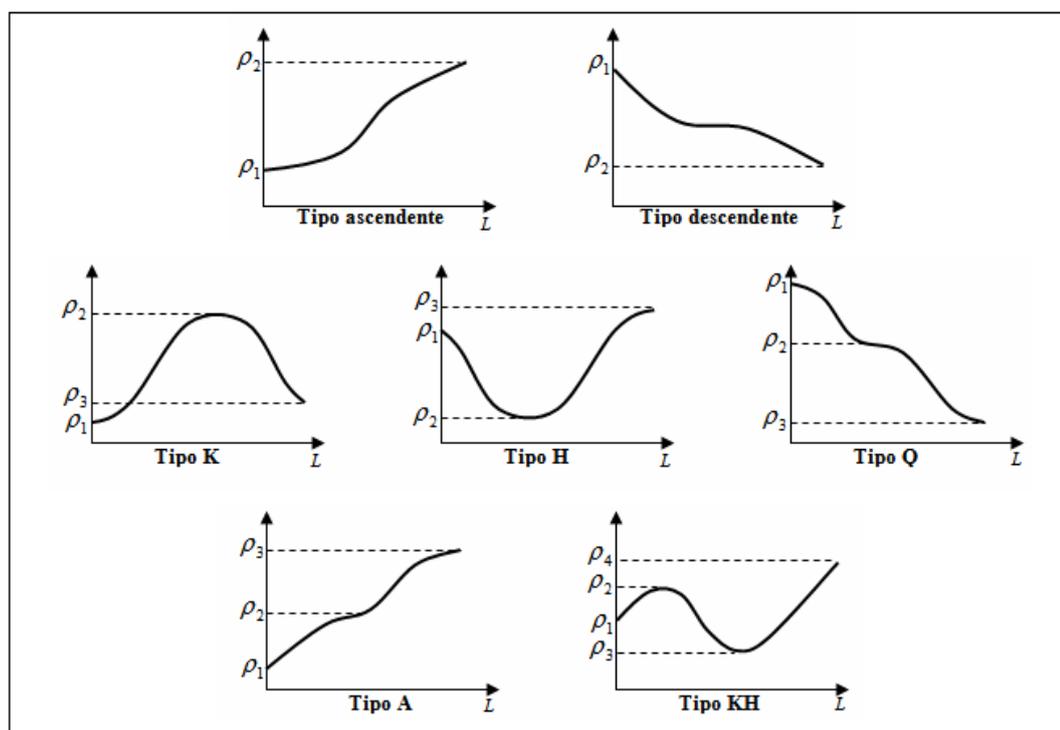


Figura 4.14: Algumas curvas geoeétricas (modificada de BRAGA, 2001)

Neste trabalho empregou-se o programa IX1D v.3.24 (INTERPEX SOFTWARE, 2005), que calcula uma curva teórica de resistividade aparente, com base na teoria da filtragem

linear. As curvas teóricas são ajustadas a partir de modificações nos parâmetros, sempre em conformidade com a geologia e hidrogeologia local.

Feito o ajuste pelo método direto, o modelo é refinado por inversão a partir de ajustes interativos entre os valores de resistividade aparente obtidos em campo e valores obtidos na modelagem inicial. Os parâmetros iniciais são modificados automaticamente, até que o ajuste mínimo seja obtido.

Segundo Inman (1975) este processo de inversão baseia-se no método dos mínimos quadrados simples. A relação que faz o refinamento do modelo é dada por:

$$\Delta p = (A' A)^{-1} A' \Delta p_a \quad (4.19)$$

em que: Δp : vetor de variação entre os vetores ρ e ρ_0 , que pode ser mantido fixo ou não

durante as iterações;

Δp_a : vetor de variação entre as resistividades observadas e as calculadas pelo modelo direto, gerada pelo modelo geoeletrico inicial;

A : matriz de sensibilidade;

A^t : matriz transposta de A ; e

$(A' A)^{-1}$: matriz inversa da matriz produto $A' A$.

Segundo Monteiro (1999), este método consiste em obter um modelo que, mediante a relação teórica utilizada no cálculo das resistividades, melhor descreva as resistividades aparentes observadas em campo. Teoricamente, busca a convergência da curva teórica para curva de campo, até alcançar o melhor ajuste. Muitas vezes, o ajuste realizado por inversão leva a uma ambigüidade na interpretação da SEV, resultando um modelo geoeletrico que não apresenta correspondência com a geologia. Para reduzir essa ambigüidade podem ser utilizados dois procedimentos: inversão conjunta de dados, exemplo resistividade e IP (RIGOTI e CROSSLEY, 1987) ou fixação de parâmetros no processo de inversão.

No caso da SEV, o processo de inversão trabalha com dois parâmetros distintos: espessura da camada e resistividade, sendo o ultimo de difícil determinação por se tratar de uma amostragem volumétrica, dependendo de heterogeneidade do meio. No entanto, a espessura de uma camada geoeletrica pode ser determinada por meio de métodos diretos, permitindo sua fixação como parâmetro conhecido no modelo inicial de inversão. Neste trabalho utilizou-se, quando possível, a fixação da espessura da primeira camada, principalmente as SEVs realizadas dentro da lixeira.

4.4.2 Interpretação quantitativa bi-dimensional

Para tratamento dos dados de resistividade elétrica utilizou-se o RES2DINV v.3.53 (GEOTOMO SOFTWARE, 2003). Este programa computacional foi projetado para operar, tanto quanto possível, de modo automático, com o mínimo de interação com o usuário.

Inicialmente efetuou-se a interpretação dos valores medidos em campo, considerando as profundidades teóricas de investigação da técnica geofísica, resultando em uma pseudo-seção de resistividade aparente. Em seguida o procedimento consistiu no refinamento por inversão da pseudo-seção resultando a seção geoeétrica e, finalmente proposto o modelo geoeétrico final obtido por krigagem no programa SURFER 8 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

Dentre os métodos de interpolação, utilizados pelo SURFER 8, a krigagem ordinária foi escolhida por ser um dos mais utilizados na interpolação de variáveis regionalizadas (STURARO, 1994) e ter apresentado, neste estudo, a melhor estimacão dos modelos geoeétricos em relacão às seções de resistividade obtidas na inversão.

De acordo com Rigoti (1998), a inversão dos dados elétricos pode ser descrita como a mudançã interativa de parâmetros do modelo até que se obtenha o melhor ajuste entre os dados calculados a partir do modelo e os dados observados, em tese, é capaz de corrigir as distorções observadas na pseudo-seção correspondentes aos diversos arranjos utilizados no trabalho. Estes modelos (2D) constituem imagens que apresentam uma melhor correspondência com a realidade geológica em subsuperfície, o que facilita a interpretação dos resultados.

O modelo utilizado pelo programa RES2DINV consiste em dividir a subsuperfície em uma quantidade finita de elementos (blocos), aplicando em seguida uma inversão, baseada no método dos mínimos quadrados, para atribuir o valor da resistividade aparente a cada bloco, em conformidade com os valores obtidos em campo, formando uma malha (*grid*). Esta malha se estende do ponto topográfico mais elevado a um ponto profundo, o suficiente para que possa ser truncada sem comprometer os resultados; e lateralmente do primeiro eletrodo de corrente até o último eletrodo de potencial.

A malha é obtida utilizado o método das diferenças finitas ou elementos finitos. É possível também optar por um tipo de malha: normal, fina ou finíssima, incrementando a resolução vertical, uma malha mais fina é recomendada para situações de grandes contrastes

nas resistividades ($> 20:1$). Para um refinamento horizontal pode-se optar por uma malha de 2 ou 4 nós entre eletrodos adjacentes.

A disposição e tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa de modo que o número de blocos não exceda o de dados de campo. Entretanto, o programa permite exceder essa quantidade, como também, apresenta três opções para redução desses blocos: normal, severa e severamente, de maneira a minimizar discrepâncias com a realidade.

Em relação à disposição dos eletrodos, o RES2DINV suporta os arranjos Wenner, Wenner-Schlumberger, pólo-pólo, pólo-dipolo, dipolo-dipolo e outros.

A Figura 4.15 apresenta um modelo de malha (pseudo-seção) gerada no RES2DINV, com valores de resistividade aparente, obtida em campo.

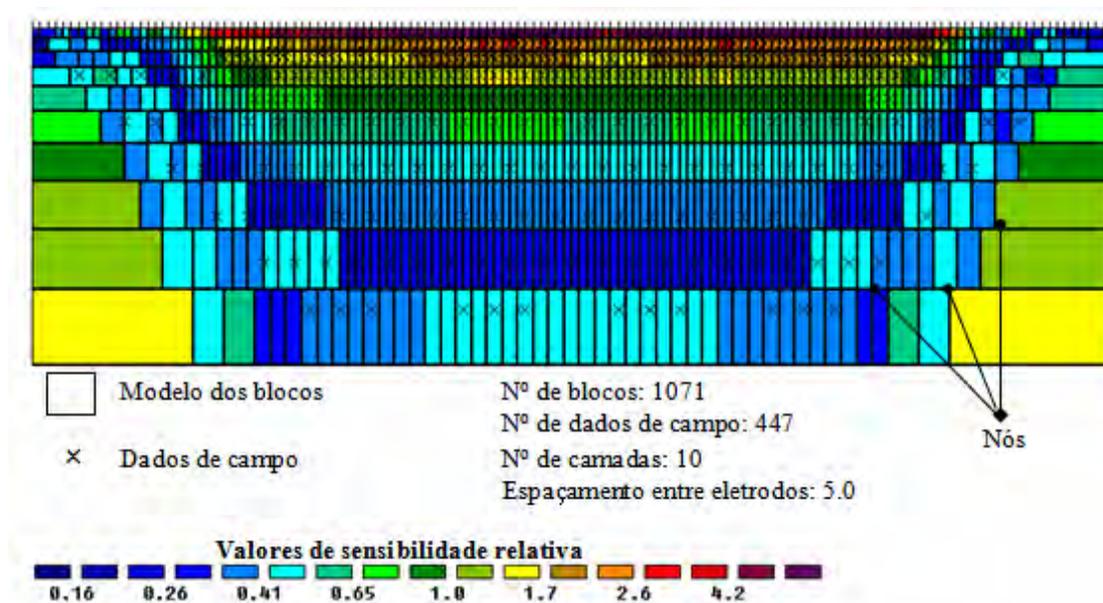


Figura 4.15: Modelo de malha de uma pseudo-seção utilizada para inversão dos dados

No caso do arranjo dipolo-dipolo a espessura da primeira fileira de blocos é de 0,3 vezes o espaçamento entre eletrodos (GEOTOMO SOFTWARE, 2003). Este valor é aproximadamente a profundidade teórica de investigação (0,416) de Edwards (1977) para o primeiro nível. A espessura de cada fileira seguinte é aumentada de 10% (25% opcionalmente).

A seção de resistividade resultante da inversão da pseudo-seção permite a partir dos dados de campo uma interpretação qualitativa das variações laterais de resistividade, que podem estar relacionadas a contatos geológicos, níveis profundos de alteração, zonas de fraturamento e pluma de contaminação.

4.4.2.1 Método de inversão por mínimos quadrados com vínculo de suavidade

A rotina de inversão dos dados da resistividade elétrica, desenvolvido por Loke e Barker (1996); deGroot-Hedlin e Constable (1990), teoricamente, produz uma modelo (2D) de subsuperfície que melhor se ajuste a uma pseudo-seção de resistividade aparente obtida em campo. O programa RES2DINV conta com um conjunto de parâmetros pré-estabelecidos que orienta o processo de inversão, o uso de um ou mais parâmetros pode fornecer, em alguns casos, resultados que representem melhor a realidade da área estudada. Esta seção descreve alguns parâmetros utilizados no processo de refinamento.

A relação utilizada no método de inversão 2D por mínimos quadrados com vínculo de suavidade (*smoothness-constrained least-squares method*) é dada por:

$$(J^T J + uF)\delta = J^T g, \quad (4.20)$$

em que: $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$: filtro de nivelamento;

f_x : filtro de nivelamento horizontal;

f_z : filtro de nivelamento vertical;

J : matriz das derivadas parciais (matriz Jacobiana);

u : fator de ajuste;

δ : vetor de perturbação do modelo; e

g : vetor de discrepância.

O fator de ajuste (*damping factor*) consiste em reduzir sistematicamente a magnitude da variação no modelo, de uma iteração para a subsequente, sendo um tipo de parâmetro de suavização (CONSTABLE et al., 1987). Segundo (SAZAKI, 1992) um fator grande produz imagem “desfocada” com variações de resistividades mais suavizadas, onde o resultado não é muito influenciado pela presença de dados discrepantes.

O filtro de nivelamento (*flatness filter*) pode ser ajustado de acordo com as características do dado a ser processado, representando uma forma de inserção de informações geológicas a priori. Se as anomalias na pseudo-seção se apresentarem alongadas horizontalmente, ou havendo informações da presença de estruturas horizontalizadas em subsuperfície, o valor pode ser <1 . Caso a pseudo-seção apresente anomalias alongadas verticalmente o valor escolhido pode ser >1 .

Durante o processo de inversão se adota como critério de convergência o valor do erro quadrático médio, denominado RMS (*root mean squared error*), que tende a diminuir a cada iteração durante o processo de inversão da pseudo-seção. Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e os medidos em campo, (LOKE e BARKER, 1996). Um pequeno valor de RMS nem sempre representa um bom modelo geológico, podendo apresentar variações de resistividades incompatíveis com a realidade.

Este método, por ser não linear, necessita de interatividade de algoritmos genéricos de otimização para realização das inversões (cálculos de convergência). O programa RES2DINV apresenta três opções de métodos o quasi-Newton, Gauss-Newton e a interação entre os dois.

O quasi-Newton (LOKE e BAKER, 1996), requer menos memória computacional no armazenamento dos dados, pois evita recálculos da matriz Jacobiana. É rápido, eficiente e robusto em cálculos com grande número de dados; O Gauss-Newton faz inúmeros recálculos da matriz Jacobiana, melhor que o quasi-Newton, para áreas com grandes discrepâncias de resistividades, maiores que 10:1, dá resultados levemente melhores; e a terceira opção no recálculo da matriz Jacobiana usa-se o de Gauss-Newton para as primeiras iterações em seguida o quasi-Newton (LOKE e DAHLIN, 2002).

O programa apresenta dois tipos de restrição ao método dos mínimos quadrados: o método por vínculo de suavidade (*smoothness-constrain method*) e o método por inversão robusta (*robust-constrain method*).

A inversão por suavização tende a “ser mais influenciada” por valores que apresentam grande discrepância, o que a torna mais sensível a dados ruidosos. Fornece um melhor resultado em ambiente onde a resistividade em subsuperfície varie de maneira gradativa, como plumas de poluentes ou substratos rochosos com espessas camadas de transição intemperizadas, resultando em modelos que representam melhor a realidade (deGROOT-HEDLIN e COSTABLE, 1990). Neste caso aplica-se à relação (4.20) o vínculo de suavidade diretamente sobre o vetor de resistividade do modelo, garantindo que o modelo seja suave, sujeito ao fator de ajuste utilizado. Este é o método padrão usado pelo RES2DINV.

A inversão robusta, de maneira distinta da inversão por suavização, é menos sensível a ruídos e produz menos artefatos no modelo. Tolerar melhor a existência de um valor discrepante no universo dos dados. Fornece resultados satisfatórios quando a subsuperfície consiste de corpos geológicos discretos, quase homogêneos internamente e com limites abruptos em relação a encaixante. Como exemplo pode-se citar os corpos graníticos intrudidos

em camadas sedimentares e mineralizações maciças. O resultado produz uma imagem em que a distribuição das resistividades se dá por degraus. Neste caso são adicionadas à relação (4.20) matrizes de ponderação com pesos aproximadamente iguais durante o processo de inversão.

Quando os contrastes de resistividade forem grandes, a inversão robusta fornece, em geral, erro de ajuste inferior à inversão por suavização. Nos casos onde se observam tais variações abruptas, a suavização pode produzir um modelo “desfocado”, não representando de maneira fiel as interfaces onde estas ocorrem. Pode ainda “esmaecer” alvos isolados, não os imagiando de forma correta.

Como a maioria dos casos envolve ambas as situações: uma com variações suaves e outras com limites abruptos de resistividades, então, pode-se realizar mais de uma inversão, ou seja, inicialmente aplica-se a inversão por suavização em seguida a inversão de um modelo robusto. Isto permitirá situar os dois extremos da faixa de modelos para os mesmos dados. Feições comuns a ambos os modelos mais provavelmente correspondem à realidade.

Uma descrição detalhada das diferentes variações do método de mínimos quadrados pode ser obtida no tutorial do RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2003).

5 TRABALHOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Visando caracterizar o meio físico na área da lixeira de Porto Velho e avaliar a contaminação provocada foi feita a interpretação dos resultados obtidos dos lineamentos estruturais, das análises das amostras das águas dos poços e nascentes locais e dos ensaios geofísicos de sondagem elétrica vertical e imageamento elétrico, realizados na área da lixeira.

5.2 Lineamentos estruturais

O principal objetivo da vetorização da rede de drenagem e relevo foi compará-la com seções geoelétricas de resistividade, com intuito de verificar sua correlação com as anomalias geofísicas. Segundo Gallas (2003), a interpretação prévia de fotografias aéreas é fundamental para o melhor posicionamento da malha dos ensaios geofísicos, de modo que os perfis geofísicos sejam transversais às estruturas identificadas.

A análise lógica e sistemática, objetivando a elaboração do mapa de lineamentos estruturais, foi fundamentada na premissa básica de que as diferentes formas de relevo e de drenagem, mais as variações observadas em seus arranjos, estão associadas a uma série de características do meio físico, as quais, quando analisadas em conjunto, indicam com segurança as adequabilidades e as limitações da solo.

Estes lineamentos são identificados em fotografias aéreas de feições lineares conhecidas como lineamentos fotogeológicos. Os principais guias para a determinação destas feições são geralmente: alinhamentos contínuos de drenagem de 1º, 2º e 3º ordem, alinhamento descontínuo de drenagem de 3ª ordem, angularidade da rede de drenagem, mudança brusca de direção nas drenagens, alinhamento de vegetação, faixas longas, estreitas e mais escuras, feições retilíneas com relevo negativo ou não e alinhamento de escarpas (MARANHÃO, 1994).

Segundo Soares e Fiori (1976), o curso de rios e riachos pode ser controlado por zonas de fraturamentos da rocha cristalina, que se desenvolvem preferencialmente em linhas de drenagem retilíneas.

Neste trabalho, foram analisados e interpretados alinhamentos de relevo e drenagem, com ênfase às quebras negativas de relevo e a estruturação da rede de drenagem. A rede de

drenagem da área é caracterizada principalmente por um curso de água, de direção sul-norte, formado por duas nascentes,

Estes alinhamentos, extraídos do mapa de levantamento altimétrico para instalação da lixeira municipal de Porto Velho, escala 1: 2000 (RONDONIA, 1993), ver ANEXO, e imagens de satélite, obtidas no *Google Earth*, foram georreferenciados no software SPRING do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), resultando o mapa base de lineamentos com diagrama de rosetas. Este diagrama indica, segundo a frequência absoluta⁹ de ocorrência, quatro direções preferenciais do sistema de fraturamento, aproximadamente N10E, N10W, N40-50E e N50-60E e outras secundárias, Figura 5.1.

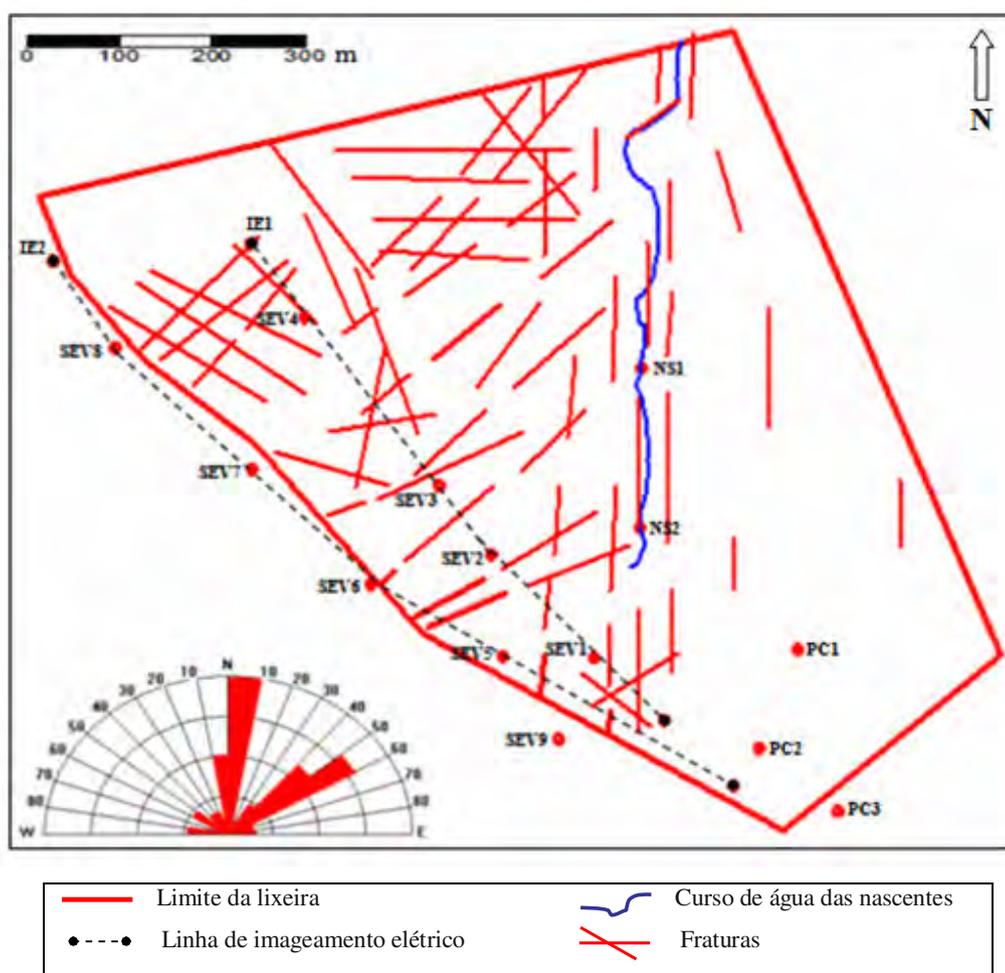


Figura 5.1: Mapa dos lineamentos, com diagrama mostrando a direção das fraturas na lixeira

⁹ quantidade de fraturas presentes em um maciço rochoso, representa o grau de fraturamento deste maciço.

Comparando o diagrama de roseta com o estereograma de planos de fraturas (ver Figura 3.5, pág. 39) deduz-se que as direções N10E e N10W pertencem à família A, a direção N40-50E à família B e a N50-60E à família C, todas com mergulho tendendo a verticalidade.

5.3 Análises físico-químicos e bacteriológicos

Para uma interpretação integrada com os dados locais de eletro-resistividade e geológicos, foram analisadas amostras de águas de três poços (PC1, PC2 e PC3) e duas nascentes (NS1 e NS2), existentes no local.

Nestas análises foram observadas: a condutividade elétrica, por estar associada ao teor de sais dissolvidos na água; o pH, para indicar grau de acidez da água; coliformes fecais, na indicação de matéria fecal; o nitrato e cloreto por ser bons parâmetros para diagnosticar a qualidade das águas (ARGOSS, 2001).

As amostras foram coletadas em garrafas de polietileno novas com capacidade para 2 litros. Durante a coleta foram esvaziadas e completadas totalmente com a amostra, e então, colocadas em uma caixa de isopor com gelo, em seguida conduzidas para o laboratório da CAERD (Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia), em conformidade com as orientações técnicas do Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água (GARCIA, 1988). Os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados das análises físico-químicos e bacteriológicos das amostras de água dos poços e nascentes, localizados na lixeira de Porto Velho

Parâmetros	Unidades	Poços			Nascentes		Referência (Port. 518/2004)
		PC1	PC2	PC3	NS1	NS2	
pH	-	5,39	4,80	4,79	4,54	6,89	6.0 a 9.5
Cloreto - Cl⁻	mg/l	1,49	0,99	0,99	15,99	76,97	250*
Nitrato - NO₃⁻	mg/l N	12,03	11,72	13,07	24,48	331,22	10*
Condutividade	μ S/cm	21,1	16,3	18,6	92,6	1114	-
Colif. fecais	VMP/100 ml	ausente	1700	800	1500	900	ausente

* VMP: Valor Máximo Permitido

Os métodos utilizados na determinação dos constituintes das amostras foram: O **pH**, por eletrometria, com pH-metro digital, modelo PM 600 da ANALION; **Cloreto**, pelo método do nitrato de mercúrio; **Nitrato**, método do ácido fenol dissulfônico; **Coliformes fecais**,

método da colimetria; e a **Condutividade elétrica**, obtida com turbidímetro digital, modelo M90 da ANALION. Detalhes desses métodos podem ser obtidos em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (EATON et al., 1998).

Os resultados da Tabela 5.1 mostram que as amostras analisadas, exceto a do PC1, estavam contaminadas com coliformes fecais. Nos poços e nascentes o nitrato apresentou valores acima de 10 mg/l N e cloreto valores abaixo de 250 mg/l. Portanto, as águas dos poços PC2 e PC3 e principalmente das nascentes, estão em desacordo com os padrões de potabilidade, estabelecidos pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004).

As amostras das águas dos poços PC1, PC2 e PC3 e da nascente NS1 apresentaram pH ácido, abaixo de 6.0, evidenciando o efeito do solo local sobre estas amostras.

O valor da condutividade (resistividade) obtido na amostra da nascente NS2 foi de 1114 μ S/cm (9 Ω .m), indicando que a lixiviação e percolação de chorume, provenientes da lixeira, estão contaminando estas águas que deságuam no Igarapé Mato Grosso e seguem para o Rio Madeira. Isso pode ser confirmado por Martins et al. (2006), que mostrou a influência direta deste depósito na contaminação do igarapé próximo à lixeira.

As amostras, dos poços PC1, PC2 e PC3, apresentaram baixa condutividade o que é um bom indicativo da não influência da lixeira nestes recursos hídricos, que abastecem os moradores da comunidade Vila Princesa.

A contaminação por coliformes fecais, nos poços PC2 e PC3, não pode ser atribuída exclusivamente à ação do chorume, mas, às fossas próximas aos poços e as infiltrações das águas no solo contaminado. Portanto, estes recursos hídricos carecem de medidas mitigadoras para evitar maiores danos.

5.4 Ensaios geofísicos realizados na lixeira

Foram realizadas na área da lixeira 9 sondagens elétricas verticais e duas linhas de imageamento elétrico. A Figura 5.2 apresenta o mapa de localização da área de estudo com a posição das SEVs, linhas de imageamento elétrico, poços e nascentes.

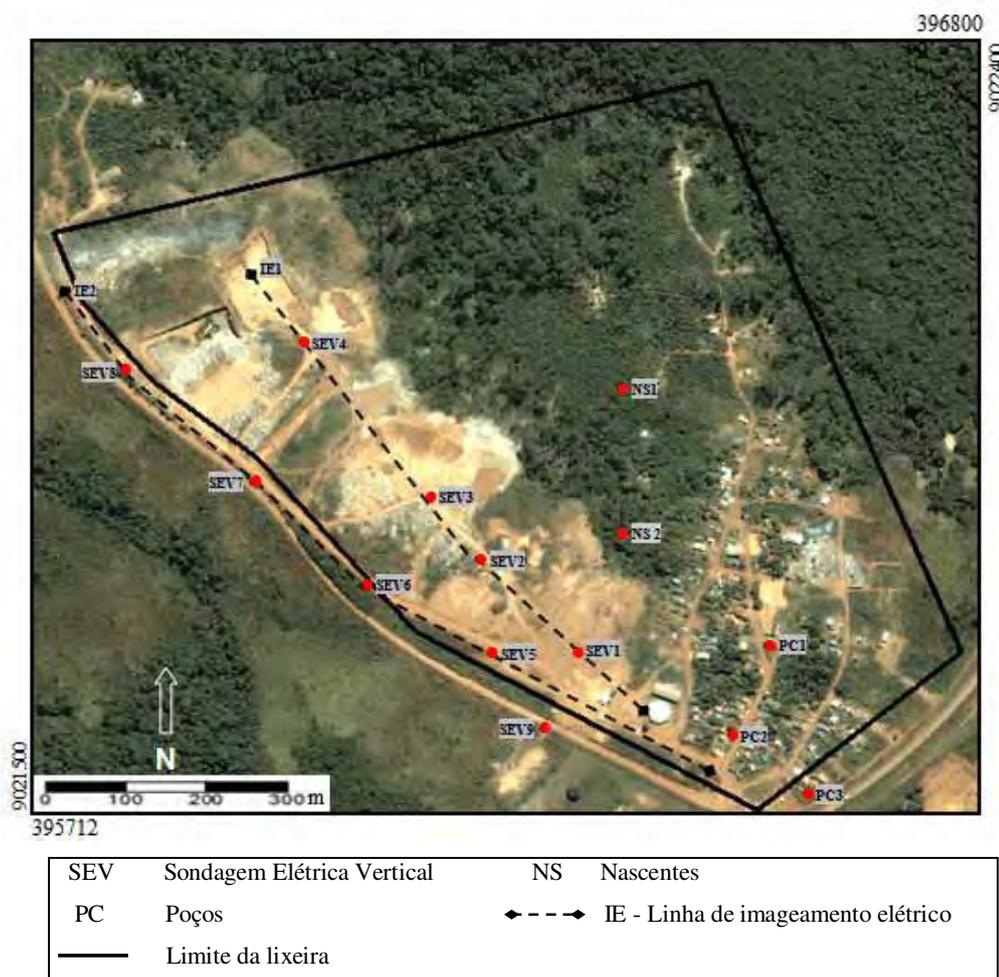


Figura 5.2: Localização das SEVs, IEs, poços e nascentes na área da lixeira de Porto Velho

As sondagens elétricas verticais realizadas com arranjo Schlumberger e distância máxima de 300 m entre eletrodos de corrente *AB* foram divididas em dois grupos: um representado pelos ensaios em executados dentro dos limites da lixeira, **Grupo I** - SEV1, SEV2, SEV3, SEV4 e SEV5 e outro pelas sondagens executadas fora da área o depósito, **Grupo II** - SEV6, SEV7, SEV8 e SEV9. Esses ensaios forneceram dados dos diversos materiais em subsuperfície e as posições do topo da zona saturada, permitindo a elaboração do modelo geoeletrico.

As linhas de imageamento elétrico (IE1 e IE2) foram executadas com arranjo dipolo-dipolo e espaçamento de 20 m entre dipolos. A linha IE1 com extensão de 720m foi efetuada em cima das células de resíduos, com direção aproximada SE-NW e 37 estações de medidas; e a linha IE2 com 1000 m efetuada fora da área de resíduos soterrados, com direção aproximada SE-NW e 51 estações.

As Fotos 5.1 e 5.2 mostram a execução da SEV1, sobre uma célula de resíduos soterrados, e da linha IE2, fora da lixeira, respectivamente.



Foto 5.1: Execução da SEV1 sobre uma célula de resíduos



Foto 5.2: Linha de imageamento IE2 executada fora da lixeira

5.4.1 Interpretação dos ensaios das sondagens elétricas verticais

O procedimento utilizado para a interpretação das SEVs constou de duas etapas: **(1) Interpretação Qualitativa**, que se baseia na caracterização dos domínios geoeletricos, observando a morfologia das curvas, segundo características comuns da geologia e hidrogeologia local; e **(2) Interpretação Quantitativa**, que se baseia nas informações geológicas, perfis de sondagens, análise físico-química de amostras de água subterrânea e de chorume, para estabelecimento do modelo geoeletrico final.

No APÊNDICE, são apresentados os resultados das interpretações geoeletricas das SEVs, com a curva de resistividade aparente; curva do modelo geoeletrico e modelo interpretado, incluindo resistividade aparente, espessura, profundidade e descrição dos estratos geológicos. No processo de modelagem o ajuste obtido foi avaliado mediante um erro dos mínimos quadrados que variou de 1.7% a 5.6%.

As SEVs permitiram o traçado dos perfis A, B, C e D (Figura 5.3) que resultaram nas seções de resistividade aparente I, II, III e IV, respectivamente. As seções I, II e III alinhadas na direção NW-SE (Figuras 5.4, 5.5 e 5.6) e a seção IV na direção S-N (Figura 5.7), permitiram uma interpretação qualitativa preliminar dos dados, servindo como ponto de partida para a interpretação quantitativa mais refinada.

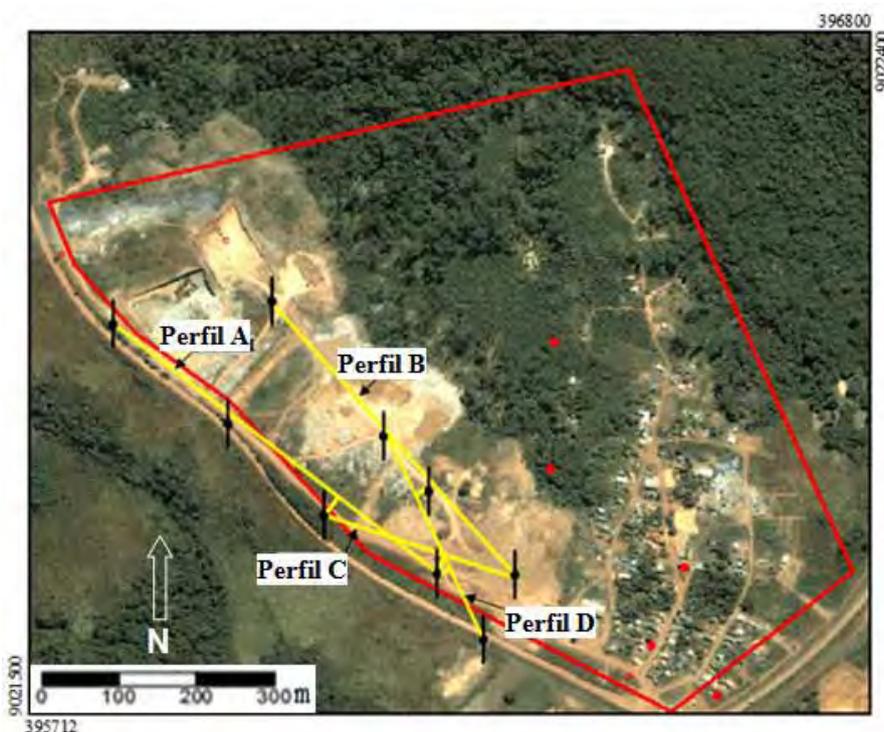


Figura 5.3: Localização das seções de resistividade na área da lixeira de Porto Velho

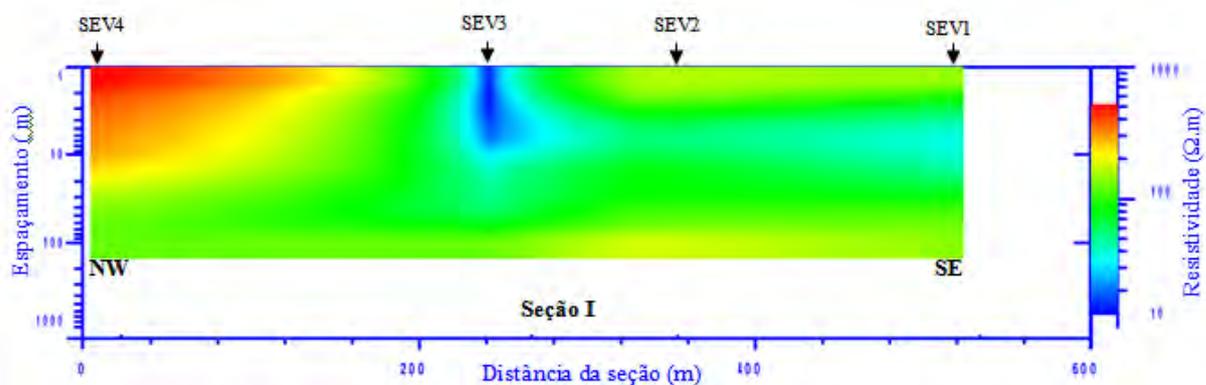


Figura 5.4: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 1, 2, 3 e 4

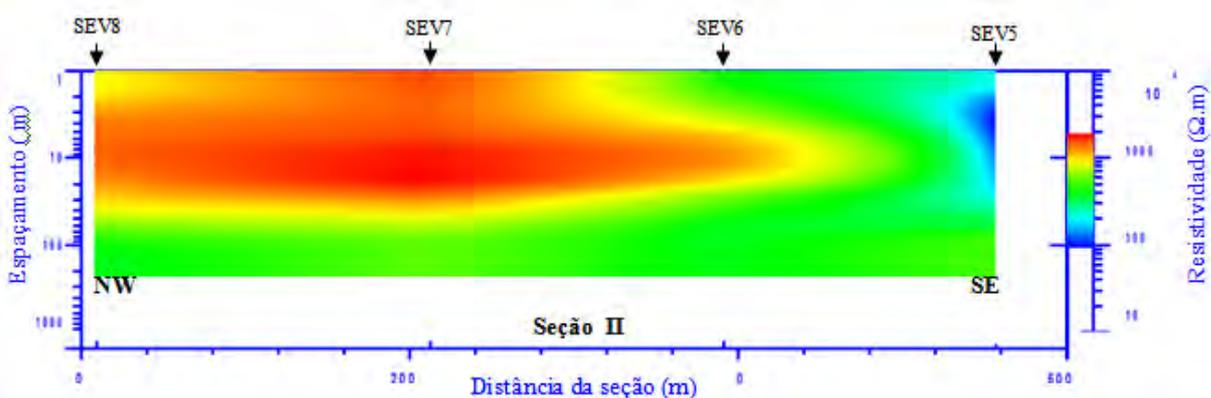


Figura 5.5: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 5, 6, 7 e 8

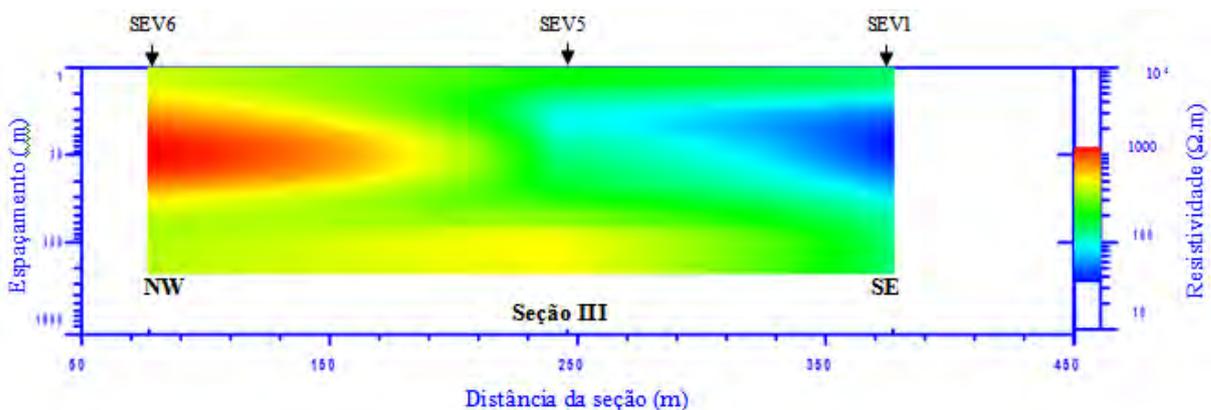


Figura 5.6: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 1, 5 e 6

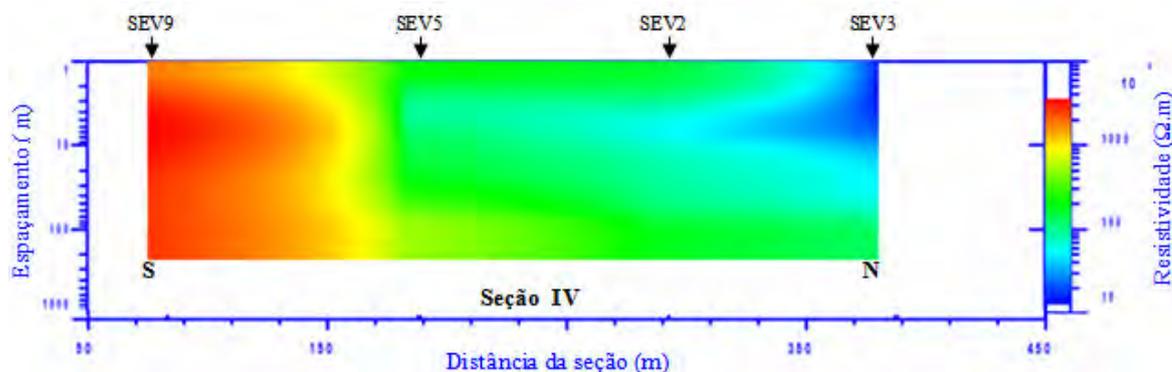


Figura 5.7: Seção de resistividade aparente, obtida a partir das SEVs 2, 3, 5 e 9

Nestas seções (Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7) observa-se pelo contraste de resistividade aparente, cinco horizontes geoeletricos (azul, azul claro, verde, amarelo e vermelho) refletindo as características litológicas presentes na área de estudo, a cor azul representa baixa resistividade (contaminação) e a vermelha o horizonte de alta resistividade. As seções I, III e IV mostram horizontes com baixa resistividade ($< 50 \Omega.m$), indicando a presença de resíduos soterrados, com destaque maior para SEVs 1 e 3. Na SEV5, seções II, III e IV, a baixa resistividade ($58 \Omega.m$), indica que esta área está sendo afetada pelos contaminantes provenientes das células de resíduos soterrados.

A cor vermelha que aparecem nas quatro seções, representa horizontes de alta resistividade ($> 300 \Omega.m$) refletindo a presença de concreções lateríticas e/ou granito.

As SEVs executadas na presente pesquisa apresentaram um padrão morfológico de curva de resistividade aparente, conforme Tabela 5.2. Quatro são do tipo HKH, duas do tipo KH e as demais apresentam outros tipos. Segundo BRAGA (1997) SEVs executadas em áreas de ocorrência de rochas sedimentares e, em alguns casos, rochas cristalinas, normalmente obtém-se para níveis geoeletricos superficiais, uma curva do tipo KQ, podendo ocorrer com as três primeiras camadas curva de campo tipo Q. Marinho (2004) diz que, curvas do tipo KH são características de terrenos com ocorrência de rocha sedimentar ou onde o manto de intemperismo cristalino é mais desenvolvido, imprimindo um caráter poroso à cobertura, normalmente.

As curvas tipo HKH, mais frequente, apresentam como padrão o tipo KH, com ocorrências de variações litológicas no início. As curvas QHA e HK não apresentaram um padrão bem definido.

Tabela 5.2: Morfologia das curvas de resistividade das SEVs

SEVs	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Morfologia	QHA	HKH	HKH	HKH	HKH	KH	HK	KQ	KH

Os resultados obtidos nas SEVs e seções de resistividade, em concordância com a geologia local (ADAMY e ROMANINI, 1990; REIS et al., 1996 e KREBS et al., 1999) e seção geológica proposta para a área do aterro (ver Figura 3.7, pág.42), forneceram subsídios para uma interpretação mais refinada e definição de modelos geoeletrico para as SEVs e Grupos I e II.

Na SEV1, a curva é do tipo QHK com cinco níveis geoeletricos ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$). O horizonte mais resistivo no início da curva, corresponde à cobertura superficial, formada por sedimentos de textura argilo-arenosa com concreções lateríticas, originária da escavação de novas células; a baixa resistividade nos horizontes 2 e 3 indica a presença de resíduos soterrados; o 4º horizonte, solo abaixo da célula de resíduos, com percolação de chorume é interpretado como solo argilo-arenoso com concreções lateríticas; e o 5º horizonte que esta associado ao maciço rochoso (granito tipo Santo Antonio), Figura 5.8.

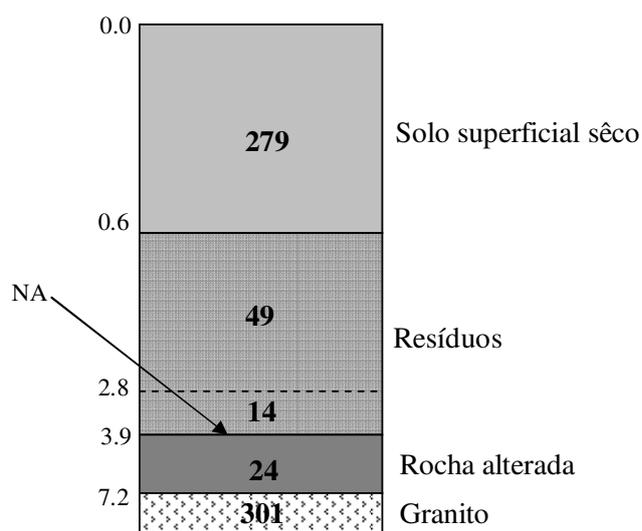


Figura 5.8: Modelo geoeletrico interpretado da SEV1

Nas SEVs 2, 3, 4 e 5, as curvas pertencem ao tipo HKH, com uma seqüência de resistividade com cinco horizontes, $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$. Nas SEVs 2 e 3 (Figuras 5.9 e 5.10, respectivamente) o 1º horizonte corresponde à cobertura superficial, formada por sedimentos de textura argilo-arenosa com concreções lateríticas; o 2º com anomalia, corresponde aos resíduos soterrados e/ou percolação de chorume; o 3º e 4º horizontes correspondem à rocha alterada e; o 5º horizonte, mais resistivo esta associado ao maciço rochoso (granito).

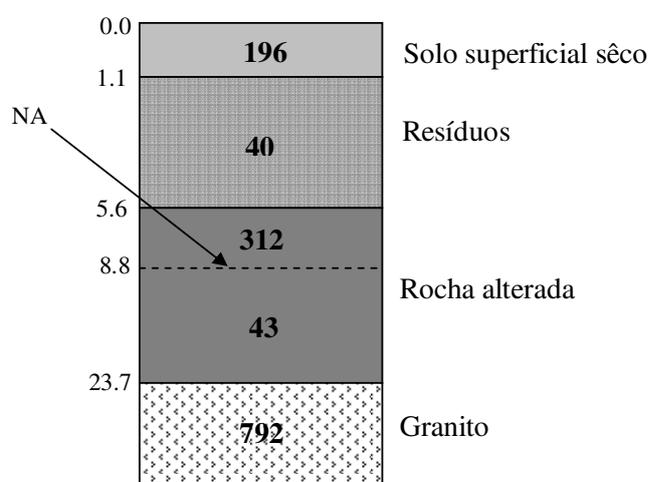


Figura 5.9: Modelo geoeletrico interpretado da SEV2

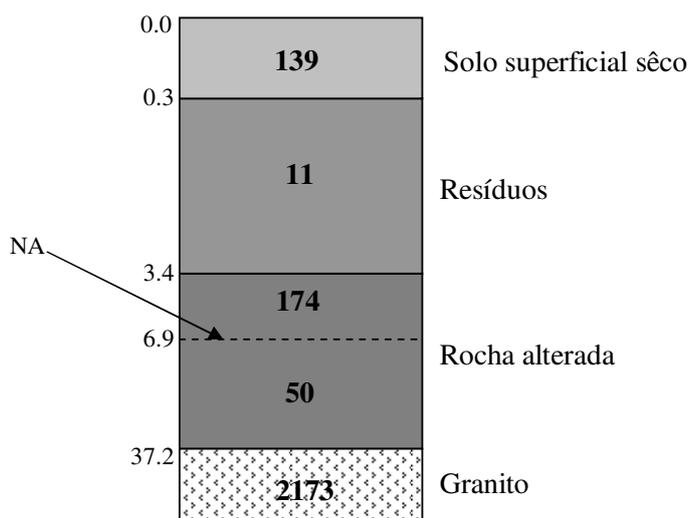


Figura 5.10: Modelo geoeletrico interpretado da SEV3

No local onde foram executadas as SEVs 4 e 5 não existe célula de resíduos, logo, o primeiro horizonte resistivo corresponde a solo superficial sêco composto por sedimentos de textura argilo-arenosa com concreções lateríticas; os horizontes 2, 3 e 4 correspondem à rocha alterada com sedimentos argilo-arenosos e concreções lateríticas e; o 5º horizonte ao granito e/ou concreções lateríticas, Figura 5.11 e 5.12.

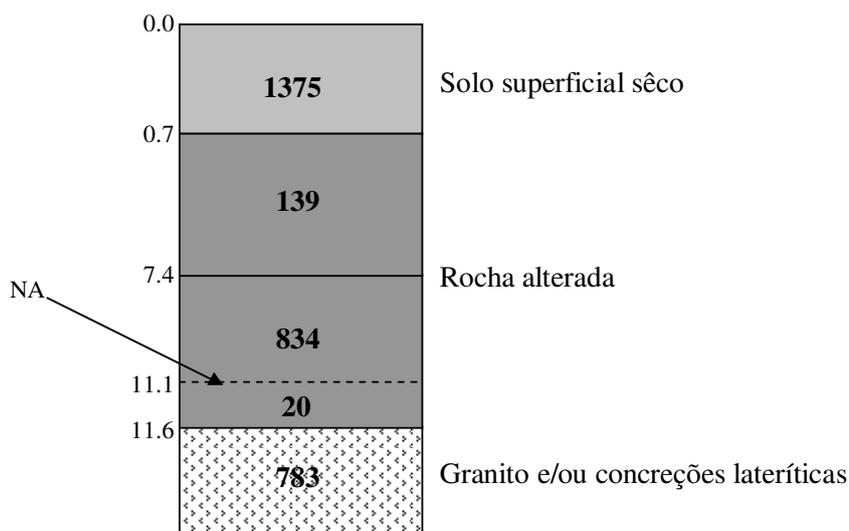


Figura 5.11: Modelo geoeétrico interpretado da SEV4

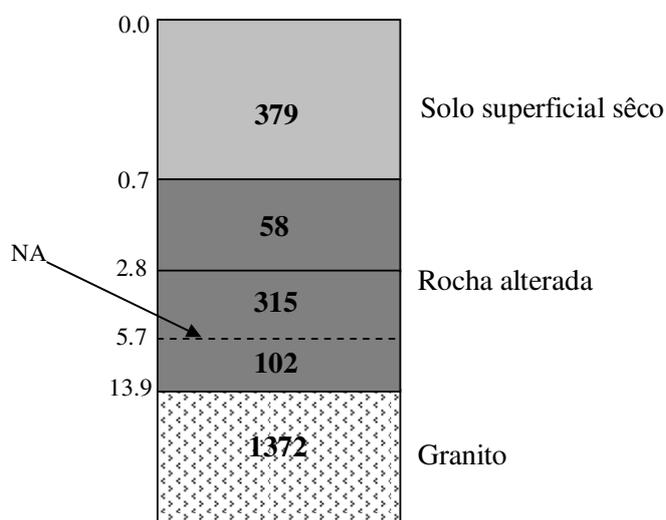


Figura 5.12: Modelo geoeétrico interpretado da SEV5

Nas SEVs 6 e 9, as curvas são do tipo KH, com quatro horizontes geoeétricos, $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$. O 1º horizonte corresponde a solo superficial sêco composto por

sedimentos de textura argilo-arenosa com concreções lateríticas; o 2º na SEV6 corresponde às concreções lateríticas, os horizontes 3 e 4 na SEV6 correspondem ao granito fraturado saturado e os horizontes 2, 3 e 4 na SEV9 estão associados ao granito são, Figuras 5.13 e 5.14.

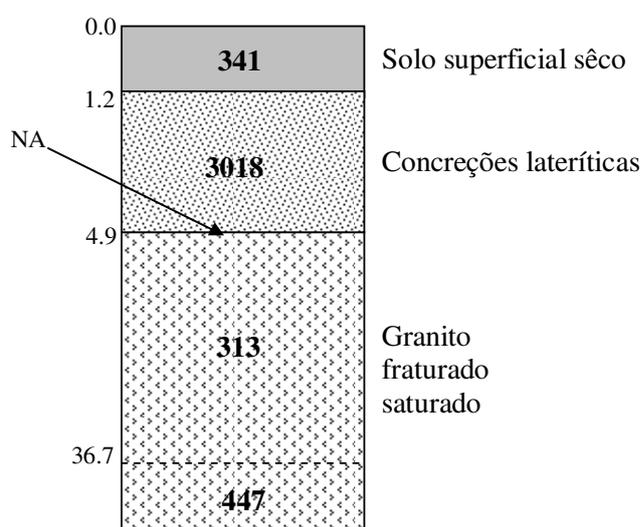


Figura 5.13: Modelo geológico interpretado da SEV6

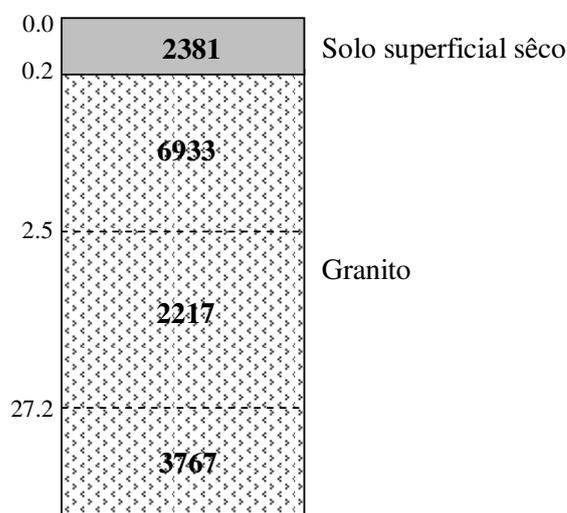


Figura 5.14: Modelo geológico interpretado da SEV9

A curva da SEV7 apresenta um padrão morfológico do tipo HK, com quatro horizontes geológicos, $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$. O 1º horizonte é formado por sedimentos de textura silte-argilosa com concreções lateríticas; o 2º corresponde às concreções lateríticas, o 4º ao granito e o 5º horizonte está associado ao granito fraturado saturado, Figura 5.15.

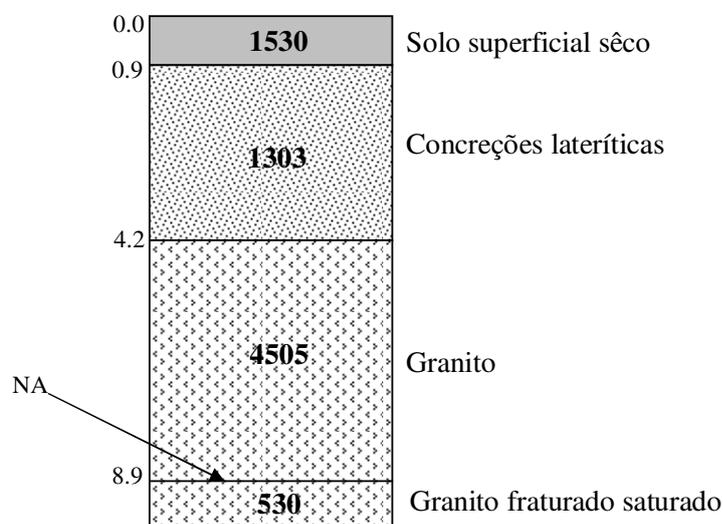


Figura 5.15: Modelo geológico interpretado da SEV7

A curva da SEV8 é do tipo KQ, com quatro horizontes geológicos, $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$. O 1º é formada por sedimentos de textura silte-argilosa com concreções lateríticas; o 2º relacionado às concreções lateríticas, o 3º associado ao granito e o 4º corresponde ao granito fraturado saturado, Figura 5.16.

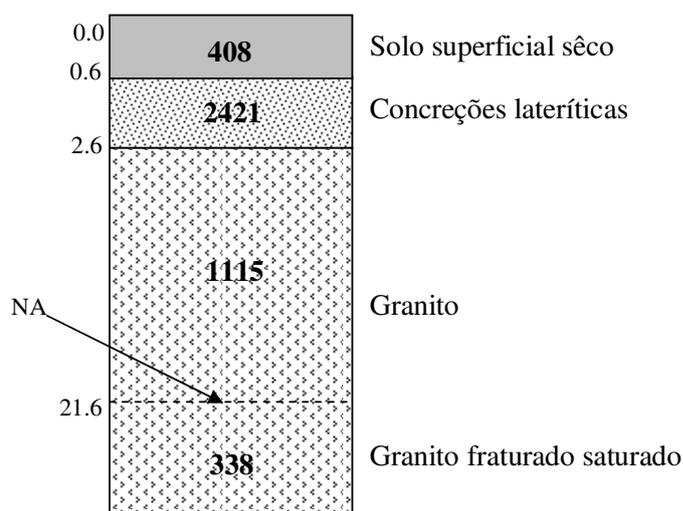


Figura 5.16: Modelo geológico interpretado da SEV8

O NA nas SEVs 6, 7 e 8 é devido o fraturamento do maciço rochoso. As SEVs 6, 7, 8 e 9, situadas fora da área, foram as que apresentaram a maior espessura de material resistivo, enquanto que as SEVs 1, 2, 3, 4 e 5 indicaram as anomalias resistivas. Os resultados das interpretações quantitativas das SEVs possibilitaram estabelecer valores máximos e mínimos de resistividades e profundidade a respeito das posições do topo da zona saturada e dos diversos materiais de subsuperfície, assim como suas relações com resíduos soterrados e meio geológico.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam modelos propostos para as SEVs dos Grupo I e II, respectivamente, em conformidades com os trabalhos de Krebs et al. (1999); Reis et al. (1996) e Adamy e Romanini (1990) e observações locais.

Neste modelo (Tabela 5.3) o primeiro horizonte geoeletrico, com resistividades variando de 139 a 1375 $\Omega.m$ refere-se à cobertura residual, relacionada aos sedimentos argilo-arenoso com concreções lateríticas (REIS et al., 1996; KREBS et al., 1999). Este material é retirado do próprio aterro dando origem a novas células.

Tabela 5.3: Modelo geoeletrico proposto para a área das SEVs do Grupo I

Horizontes	Espessura (m)	ρ ($\Omega.m$)	Descrição dos materiais
1	0.3 a 1.1	$139 \leq \rho \leq 1375$	Solo superficial sêco
2	3.1 a 4.5	$11 \leq \rho \leq 49$	Resíduos
3	3.3 a 33.8	$20 \leq \rho \leq 834$	Rocha alterada
4	-	$301 \leq \rho \leq 2173$	Granito e/ou concreções lateríticas

O segundo horizonte com baixos valores de resistividade ($< 50 \Omega.m$) corresponde aos resíduos soterrados, com profundidade máxima aproximada de 5.6 m, em conformidade com testemunhos locais e dados obtidos de Porto Velho (1993).

O terceiro horizonte, relativo à zona saturada, corresponde a sedimentos de textura argilo-arenosa com concreções lateríticas (REIS et al, 1996). O baixo valor de resistividade ($\leq 50 \Omega.m$), neste horizonte, associado ao valor da condutividade (resistividade) elétrica 1114 $\mu S/cm$ (9 $\Omega.m$) da nascente NS2 (ver Tabela 5.1, pág. 82), caracteriza uma anomalia de baixa resistividade, indicando que a maior contaminação desta nascente se concentra neste horizonte.

O quarto horizonte, interpretado como embasamento geoeletrico resistivo, indica a ocorrência de rochas graníticas relacionadas ao Proterozóico Médio (granitos do tipo Santo Antônio) e/ou concreções lateríticas (ADAMY e ROMANINI, 1990; REIS et al., 1996; KREBS et al., 1999).

Tabela 5.4: Modelo geoeletrico proposto para a área das SEVs do Grupo II

Horizontes	Espessura (m)	ρ (Ω .m)	Descrição dos materiais
1	0.2 a 1.2	$341 \leq \rho \leq 2381$	Solo superficial sêco
2	2.0 a 3.7	$1303 \leq \rho \leq 3018$	Concreções lateríticas
3	-	$313 \leq \rho \leq 6933$	Granito e/ou concreções lateríticas

Neste modelo (Tabela 5.4) o primeiro horizonte geoeletrico, com resistividades variando de 341 a 2381 Ω .m, refere-se a latossolos espessos, com horizonte concrecionário laterítico, desenvolvidos sobre sedimentos argilo-arenosos (REIS et al., 1996; KREBS et al., 1999).

O segundo horizonte indica a ocorrência de concreções lateríticas de granulação variando de fina a grossa (REIS et al., 1996).

O terceiro horizonte, com resistividade variando de 313 a 6933 Ω .m, está associado à ocorrência de laterítos imaturos e/ou rocha alterada e/ou rocha sã (ADAMY e ROMANINI, 1990).

A interpretação qualitativa e quantitativa das SEVs e seções de resistividade aparente, permitiu definir as relações dos parâmetros elétricos com o meio geológico e anomalias provenientes da contaminação provocada pelos resíduos soterrados e, principalmente, as cotas do topo da zona saturada (lençol freático).

Nas SEVs do Grupo I, as profundidades do topo da zona saturada (Tabela 5.5) estão localizadas nos horizontes contaminados pelos resíduos e/ou percolação de chorume. Assim é natural a conclusão de que o aquífero livre (aquífero Jaciparaná) possa estar contaminado. Isso pode ser confirmado pelas alterações nos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos das amostras dos poços e nascentes (ver Tabela 5.1, pág. 82).

A Tabela 5.5 apresenta as cotas da superfície, onde se localizam as SEVs e poços, e do NA dos poços e SEVs, em relação ao nível do mar, com respectivas profundidades.

Tabela 5.5: Cotas e profundidades da zona saturada, das SEVs, e NA, dos poços

Pontos (em metros)	Sondagens Elétricas Verticais									Poços		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9*	PC1	PC 2	PC 3
Cota (superfície)	104	104	104	103	105	105	103	105	105	108	108	108
Cotas (NA)	100.1	95.2	97.1	91.9	99.3	100.1	94.1	83.4	-	57	89.9	90.5
Profundidades	3.9	8.8	6.9	11.1	5.7	4.9	8.9	21.6	-	51	18.1	17.5

* Nesta SEV não aparece profundidade do NA

Na análise físico-química da água do único poço tubular existente na área, a condutividade (resistividade) foi de $21.1 \mu S/cm$ ($474 \Omega.m$) e teor de nitrato com valor de 20 % acima do padrão, portanto esta pequena alteração das águas deste poço em aquífero cristalino, não pode ser atribuída exclusivamente à ação da lixeira, mas às fossas sépticas. Esta contaminação local pode ser confirmada por Santos (2006), seu trabalho mostra a contaminação do solo da Vila Princesa por metais pesados. Martins et al. (2006), mostra que o igarapé próximo à lixeira, que recebe água das nascentes NS1 e NS2, esta contaminado.

Estudo realizado por Campos et al. (2004) em 30 poços tubulares localizados na área urbana de Porto Velho, mostrou teores de nitratos variando de 0.64 e 26.43 mg/L, com 23% das amostras apresentando valores acima do padrão, indicando que o aquífero Jaciparaná, esta sendo contaminado pelo elevado número de fossas próximas aos poços.

5.4.1.1 Mapa potenciométrico

A partir das cotas da zona saturada, nas SEVs, e do NA dos poços, determinou-se a cota do lençol freático (aquífero livre granular), Tabela 5.5. Mediante estes dados associados às coordenadas planialtimétricas em cada ponto e, utilizando o programa SURFER 8 foi traçado o mapa potenciométrico da área da lixeira, Figura 5.17. O sentido do fluxo local indica duas direções preferenciais: (1) uma para Norte e (2) outra para Nordeste.

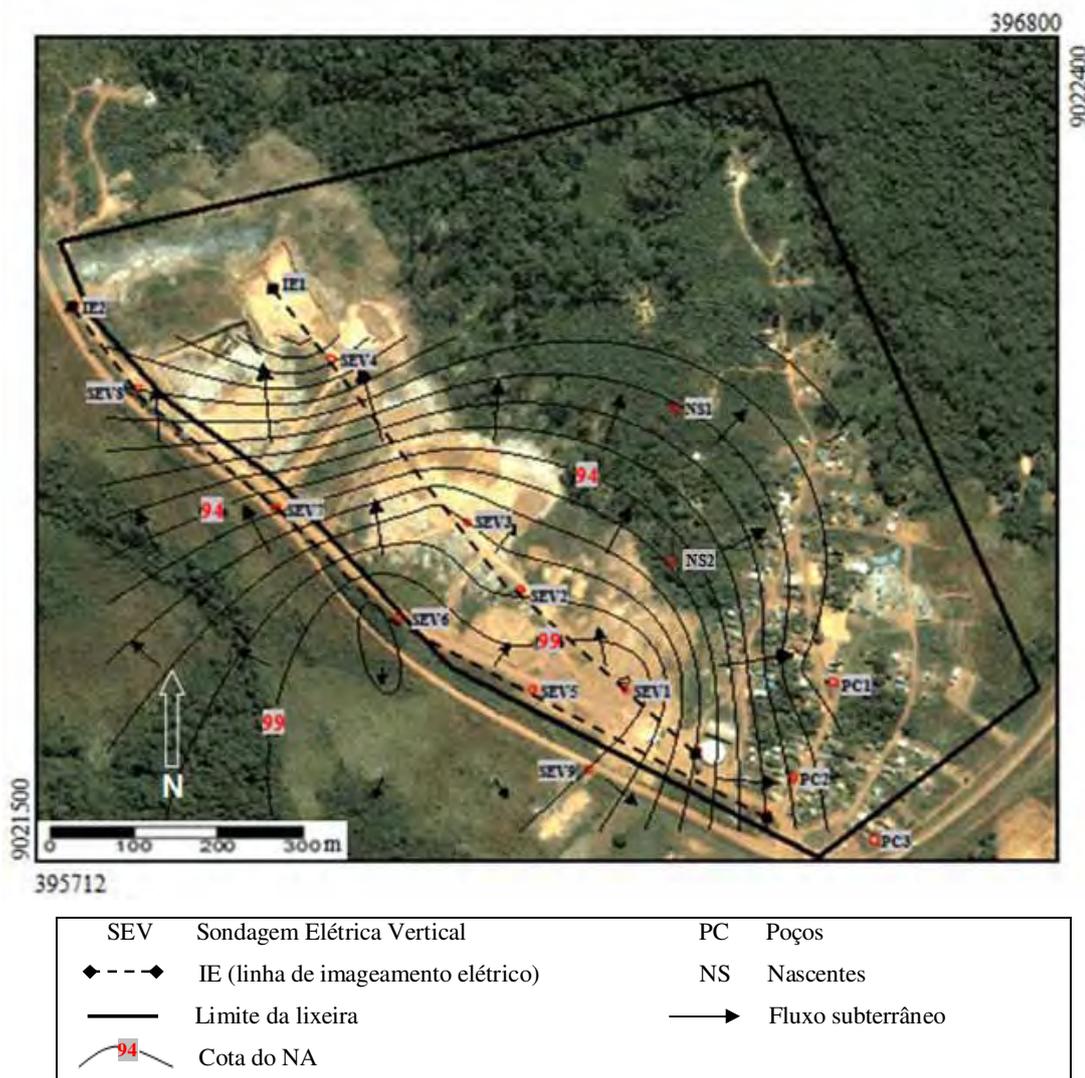


Figura 5.17: Mapa potenciométrico da área da lixeira

5.4.2 Interpretação dos ensaios dos imageamentos elétricos

O procedimento utilizado para a interpretação das seções de imageamento elétrico constou de duas etapas: (1) interpretação qualitativa, baseada na obtenção de informações geológicas e hidrogeológicas da área e; (2) interpretação quantitativa, baseada nas informações geológicas, lineamentos estruturais e perfis das SEVs, para estabelecimento da seção de resistividade, por inversão, e modelo geoeletrico final.

Para o mapeamento bidimensional de resistividade dos materiais do subsolo e anomalias resistivas, as linhas de imageamento elétrico IE1 e IE2 processadas em cinco níveis e investigação (Tabela 5.6) apresentaram erro de ajuste de 37% e 36,7%, respectivamente.

Tabela 5.6: Profundidades teóricas obtidas nos imageamentos elétricos IE1 e IE2

Níveis	Profundidade (m)
1	3.42
2	10.3
3	17.4
4	25.3
5	34.0

As seções foram geradas no programa RES2DINV a partir de pseudo-seções obtidas de valores de resistividade aparente coletados no campo. Durante o processamento dos dados, visando uma imagem que melhor representasse a realidade local, alguns parâmetros foram utilizados para a inversão:

- O método de otimização utilizado para a resolução da equação dos mínimos quadrados foi o Gauss-Newton, pela acurácia nos cálculos e o número reduzido de dados (160 na linha IE1 e 230 na IE2).
- No refinamento da malha foi utilizado o método das diferenças finitas, por não se disponibilizar de topografia, com malha finíssima de 4 nós. Este tipo de malha gerou bons resultados no delineamento das anomalias, em relação aos outros modelos.
- Objetivando uma imagem mais “focada”, com maiores perturbações nos valores de resistividade, foi utilizado o fator de ajuste de valor inicial 0.15 e mínimo de 0.03.
- Como a pseudo-seção apresentou anomalias alongadas verticalmente, o valor que melhor se ajustou para o filtro de nivelamento foi 2.0;
- O efeito de blocos foi reduzido severamente, por apresentar, em relação aos outros, melhores resultados com a realidade local; e
- A inversão robusta foi utilizada por apresentar fortes contrastes nos valores de resistividades ($5 \Omega.m \leq \rho \leq 12560 \Omega.m$), por fornecer um erro aproximado de 40% inferior à inversão por suavização e por ressaltar com mais nitidez o contato entre a camada alterada contaminada e o substrato rochoso.

Os resultados do processo de inversão 2D das linhas IE1 e IE2 estão apresentados em seções de resistividades elétricas, Figuras 5.18 e 5.19. Nestas seções estão representadas as SEVs de 1 a 4, executadas sobre a linha IE1 e as SEVs de 5 a 8, sobre a linha IE2. A SEV9 foi executada fora das linhas, logo não aparece nas seções.

A partir de pontos de afloramentos próximos à lixeira (ver Figura 3.1, pág 31), dos valores de resistividade ($> 300 \Omega.m$) obtidos nas SEVs e seções geoeletricas (Figuras 5.18 e 5.19) e de testemunhos sobre o poço tubular local cujo topo da rocha cristalina está, aproximadamente, a 50 m da superfície, é possível sugerir a profundidade do topo do granito.

Conforme se observa nas seções IE1 e IE2, o topo da rocha conforme SEV1 esta a 7.2 m de profundidade, na SEV2 a 23.7 m e SEV3 a 37.2 m, SEV5 a 13.9 m, SEV6 a 4.9 m, na SEV7 a 8.9 m, SEV 8 a 21.6 e na SEV9 a 0.2 m. Também se observa na seção IE2 algumas variações de baixa resistividade ($< 50 \Omega.m$) sob horizontes de altas resistividades ($> 300 \Omega.m$), sugerindo a presença de líquidos percolados na rocha fraturada e/ou em zonas de fraturamento.

Os resultados obtidos nas seções de resistividade foram exportados na forma de arquivo XYZ e interpolados, por krigagem ordinária, no SURFER 8, visando uma melhor apresentação do modelo geoeletrico.

Esta interpolação, associada à baixa resistividade de área contaminada e alta em área de maciço rochoso (CASTANY, 1975; MOONEY, 1980; TELFORD et al., 1990; MOURA, 2003 e HUBER et al., 2005), permitiu gerar um modelo geoeletrico final para cada linha de imageamento elétrico, fornecendo dados a respeito das posições dos diversos materiais de subsuperfície, Figuras 5.20 e 5.21.

As Figuras 5.20 e 5.21 correspondem aos modelos geoeletricos provenientes das seções de resistividade (Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente) e de informações geológicas locais. Nestes modelos foram traçadas descontinuidades relacionadas à presença de anomalias penetrativas de baixa resistividade, indicando que estes locais permitem o armazenamento de água e/ou percolado na rocha fraturada. Esses modelos apresentam fraturas ao longo das seções de resistividades aparentes e esta afirmativa é corroborada pelos lineamentos estruturais identificados no local (ver Figura 5.1, pág. 81).

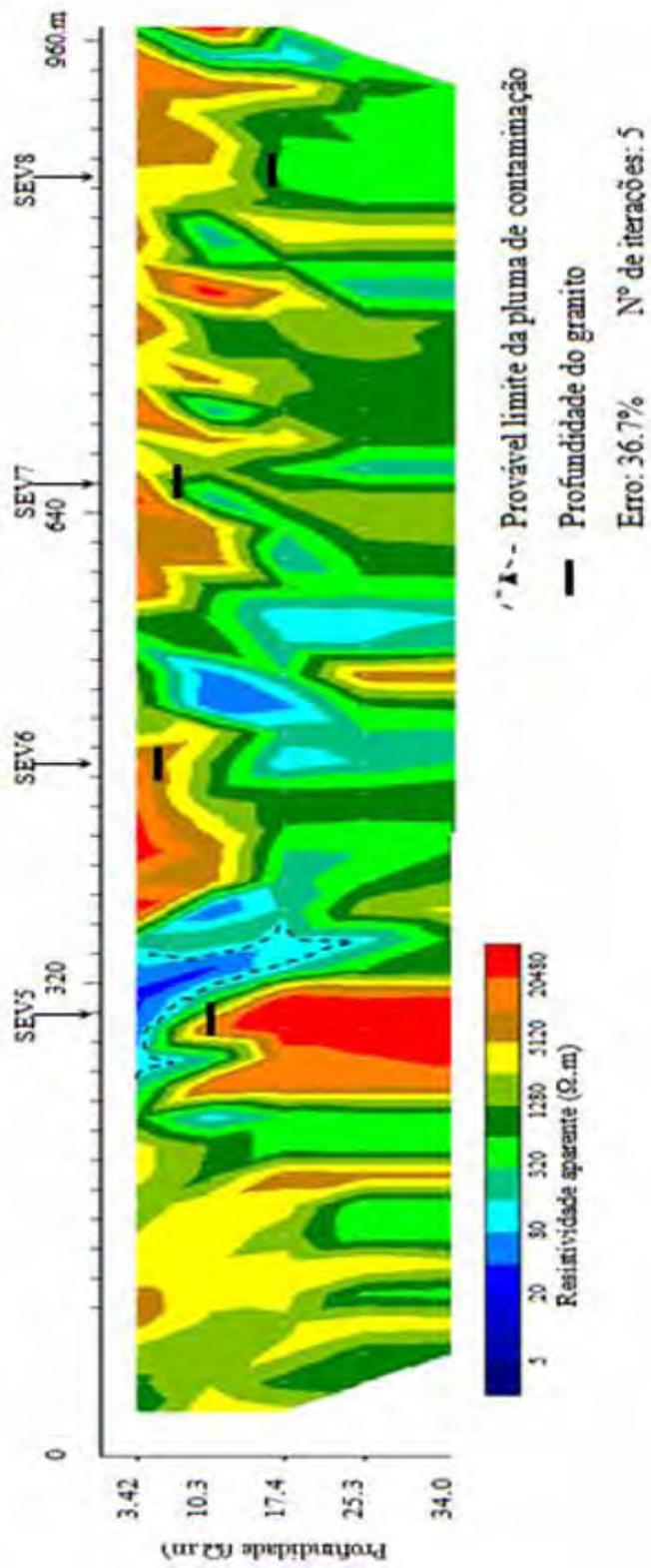


Figura 5.19: Seção geoeétrica da linha de imageamento I2



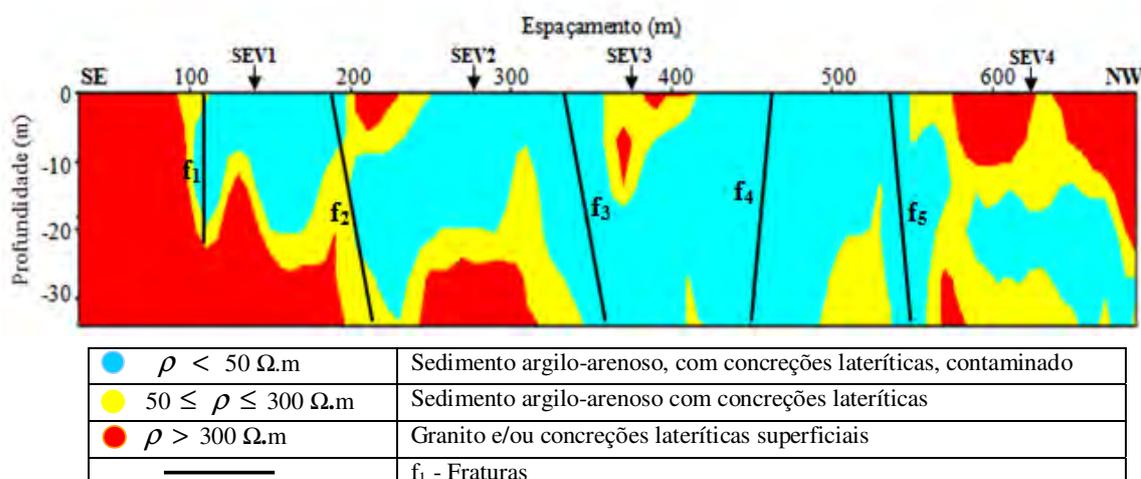


Figura 5.18: Modelo geoeétrico interpretado da linha IE1

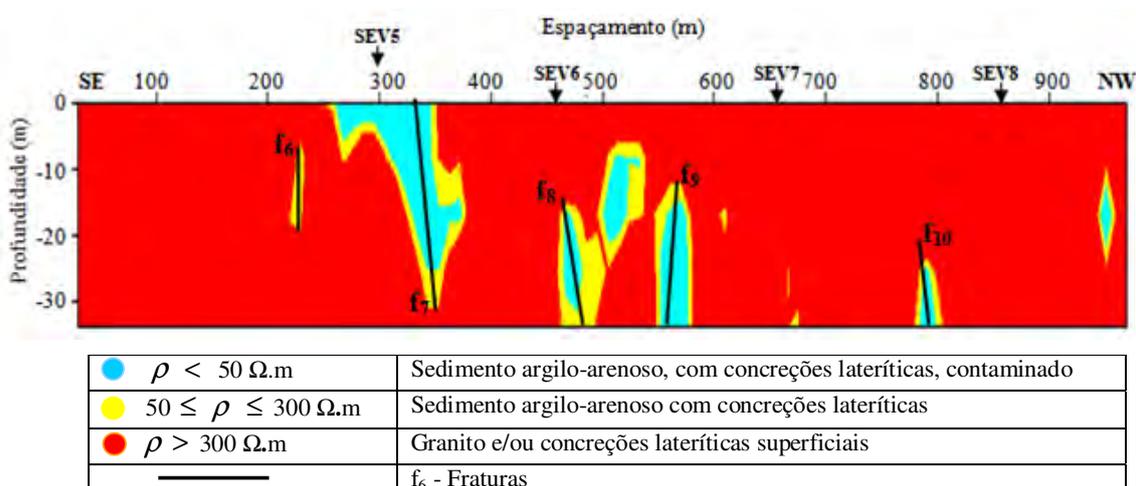


Figura 5.19: Modelo geoeétrico interpretado da linha IE2

Considerando-se um mesmo tipo litológico, as fraturas preenchidas por água apresentam um comportamento de baixa resistividade em meio a valores de alta resistividade, (GALLAS, 2000, 2003 e VOUILLAMOUS et al., 2003). Se a água estiver contaminada, neste caso por chorume, esta discrepância aumenta.

No modelo geoeétrico (Figura 5.20) observa-se existência de anomalias penetrativas de baixa resistividade e de disposição vertical a semivertical, caracterizando como pontos promissores da contaminação em profundidade.

No período de novembro a abril há um aumento de água no solo (alta precipitação), contribuindo em grande proporção na lixiviação e percolação do chorume (ver Figura 3.2, pág. 32). Como os ensaios geofísicos foram realizados no final de novembro, esta grande

quantidade de água no solo aumenta o volume de chorume gerado, o que justifica o aumento destas anomalias.

No modelo geoeétrico (Figura 5.21), apresenta-se como uma área altamente resistiva com pontos de baixas resistividades. Estas anomalias sugerem a presença de zonas fraturadas.

A partir dos resultados obtidos nas seções e modelos geoeétricos pôde-se observar: o contraste significativo entre os valores de resistividade do solo não saturado e do solo contaminado pelo chorume, resultante da decomposição dos resíduos e com alguns pontos de baixas resistividades sob horizontes resistivos, devendo-se isso à percolação no solo e/ou na rocha fraturada.

As anomalias penetrativas exibidas nos modelos geoeétricos das linhas IE1 (Figura 5.20) e IE2 (Figura 5.21) indicam que esta área permite o armazenamento natural de água e percolado em subsuperfície, já que o substrato rochoso apresenta-se fraturado. Esta afirmativa é corroborada pelas famílias de fraturas (A, B, C, D e E) apresentadas no estereograma de planos de fraturas (ver Figura 3.5, pág. 39) e lineamentos estruturais da área de estudo (ver Figura 5.1, pág. 81).

A Figura 5.22 mostra as discontinuidades identificadas nos ensaios geofísicos, em conformidade com as famílias A, B e C (ver Figura 3.5, pág. 39).

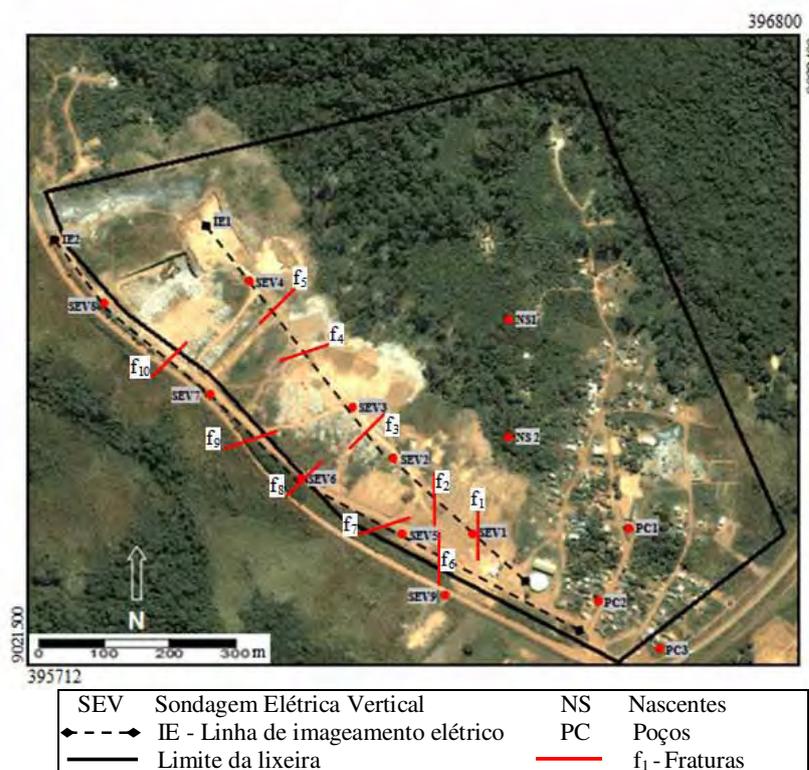


Figura 5.20: Localização das discontinuidades identificadas nos ensaios geofísicos

As fraturas f_1 e f_2 identificadas entre as estações E-100 e E-260 (Figura 5.20) e f_6 entre E-200 e E-300 (Figura 5.21) pertencem à família A. As fraturas f_3 entre E-300 e E-400, f_5 entre E-500 e E-600 (Figura 5.20), f_8 entre E-400 e E-500 e f_{10} entre E-700 e E-800 (Figura 5.21) pertencem à família B. As fraturas f_4 entre E-400 e E-500 (Figura 5.20), f_7 entre E-300 e E-400 e f_9 entre E-500 e E-600 (Figura 5.21) pertencem à família C. Estas descontinuidades sugerem um aquífero fraturado promissor, o que preocupa, devido à percolação de chorume nestes pontos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados geoeletricos interpretados em conjunto com dados geológicos e hidrográficos do local, permitiram uma avaliação preliminar da área do depósito de resíduos sólidos urbanos de Porto Velho – RO.

A análise integrada do mapeamento de fraturas, de dados geofísicos processados e de dados geológicos de campo mostrou ser um importante recurso no estudo de meios fraturados, pois permitem a identificação das fraturas preenchidas pelo percolado, representada por anomalias de baixas resistividades nas proximidades de fraturas previamente mapeadas.

O horizonte imediatamente abaixo das células de resíduos (SEVs 1, 2 e 3) apresentou valores de resistividade $\leq 50 \Omega.m$, interpretada como estando sujeita à influência dos resíduos soterrados e à percolação de chorume no solo alterado e/ou zonas de fraturas. Isto pode ser confirmado pela alta condutividade (baixa resistividade) $1114 \mu S/cm$ ($9 \Omega.m$) obtida na amostra de água da nascente NS2, que sai da base do talude da pilha de resíduos.

Os horizontes 2, 3 e 4 da SEV1, contaminados pelos resíduos e chorume, apresentam baixo valor de resistividade ($< 50 \Omega.m$). Considerando que o topo da zona saturada está entre estes horizontes, é possível que o aquífero livre esteja contaminado.

A nascente NS1, que se direciona à Vila Princesa, apresentou condutividade (resistividade) $92.6 \mu S/cm$ ($108 \Omega.m$) e pH ácido, indicando que o subsolo onde está localizada a Comunidade, aparentemente, ainda não esteja contaminado pelo chorume. Isso é confirmado pelas altas resistividades $> 300 \Omega.m$ no limite esquerdo das linhas de imageamento elétrico e pelas condutividades (resistividades) $16.3 \mu S/cm$ ($613 \Omega.m$) e $18.6 \mu S/cm$ ($538 \Omega.m$), nos poços amazonas PC2 e PC3, respectivamente.

A contaminação da nascente NS2, preocupa, pois deságua no Igarapé próximo a UNIR e segue em direção ao Igarapé Mato Grosso e Rio Madeira. Esta contaminação também foi comprovada por Martins et al. (2006).

O teor de nitrato nos poços PC1, PC2 e PC3 e o número de coliformes fecais nos poços PC2 e PC3, estão acima dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde.

Nesta avaliação preliminar, a contaminação das águas da nascente NS1 e dos poços não pode ser atribuída exclusivamente à ação do chorume, mas aos dejetos de rede de

esgotos; à grande quantidade de fossas sépticas próximas e às infiltrações das águas superficiais no solo contaminado por metais pesados (SANTOS, 2006).

A metodologia utilizada permitiu determinar o topo da zona saturada, delimitar o horizonte de resíduos soterrados, perfil geológico vertical do solo e uma avaliação parcial da contaminação das águas das nascentes e poços.

O mapa potenciométrico mostrou que a direção do fluxo do aquífero livre é concordante com o gradiente topográfico da área, contribuindo para que o lixiviado e percolado sigam em direção ao vale, onde estão as nascentes.

A contaminação, proveniente da lixeira, que tende a aumentar no período chuvoso (novembro a abril) estende-se na horizontal no sentido leste-nordeste, concordando com o gradiente altimétrico e fluxo subterrâneo, e na vertical por percolação no solo e na rocha fraturada, o que compromete o aquífero livre.

A presença de anomalias de baixa resistividade em alguns pontos dos imageamentos elétricos, confirmadas pelas seções das SEVs, deve-se aos resíduos soterrados e/ou áreas contaminadas pelo percolado no manto de alteração e/ou zonas de fraturas.

Os lineamentos de fraturas são concordantes com as anomalias obtidas nos ensaios geofísicos. O tipo de solo que ocorre na área, do ponto de vista geológico e geotécnico, não é adequado para este tipo de depósito sem a devida impermeabilização, pois a sua composição permite a percolação do chorume no solo e na rocha fraturada, podendo causar contaminação dos recursos hídricos locais. Nesta área ainda existe vegetação nativa, parcialmente preservada, abriga áreas de nascentes e seu substrato constitui uma importante unidade aquífera. Portanto, estes recursos hídricos merecem uma atenção maior para evitar maiores danos ambientais.

Outro dado, que deve ser considerado, é a presença das famílias que residem na Vila Princesa que estão inalando diariamente e de forma interrupta os gases gerados pela lixeira, ocasionando sérios problemas à saúde.

Conclui-se que, a forma como está instalada a lixeira, não esta em conformidade com os critérios da Legislação Ambiental Federal, no que se refere à distância de corpos d'água, a presença de vegetação de preservação, topografia e drenagem e, principalmente por estar assentada em meio permeável e fraturado.

É importante que os setores responsáveis pelo depósito, estabeleçam uma política para os resíduos sólidos, na definição de diretrizes técnicas e linhas de financiamento para a recuperação da área degradada, com o objetivo de transformar o local em espaço com condições de ser reutilizado pela população, após encerramento.

Visando diminuir o impacto ambiental causado pela disposição inadequada dos resíduos, recomenda-se:

- Isolamento imediato da lixeira;
- Perfuração de poços de monitoramento a jusante a montante do fluxo de água subterrânea na área da lixeira;
- Construção de uma trincheira impermeável, a norte do aterro, para tratamento das águas das nascentes, antes que deságüem no igarapé;
- Fazer monitoramento das águas dos poços locais, com análises semestrais dos seguintes parâmetros: pH, condutividade, nitrato, cloreto e coliformes fecais;
- Instalação de tubos para queima dos gases; e

Para instalação de um novo aterro, além das recomendações previstas na Legislação Ambiental Federal, que sejam incluídos:

- ensaios geofísicos na identificação do fluxo subterrâneo e zonas de fraturas; e
- mapas de vulnerabilidade para identificação de aquíferos, profundidade do NA, litologia e condutividade hidráulica.

Como o objetivo deste trabalho foi estudar especificamente o depósito de RSU, então, sugere-se para a área onde esta localizada a Comunidade Vila Princesa, análises físico – químicas e bacteriológicas da água e solo em conjunto com ensaios geofísicos, objetivando identificar a influencia das fossas sépticas e/ou lixeira na provável contaminação do solo e recursos hídricos locais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2006, 160p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2007, 151p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8419** - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Procedimento. Rio de Janeiro, 1992, 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004**: Classificação de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004, 71 p.

ADAMY, A.; ROMANINI, S. J. **Geologia da região de Porto Velho – Abunã**. Brasília: DNPM/CPRM, 1990. 273 p.

ALBRECHT, P. **Análise numérica: um curso moderno**. Livros Técnicos e Científicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1973, 253 p.

AL-MUZAINI, S.; BEG, M. U.; MUSLMANI, K. **Environmental sciences technology**. n.21: p. 399-404, 1995.

ARGOSS. Guidelines for assessing the risk to groundwater from on site sanitation. **British Geological Survey Comissioned Report**, CR/01/142. 97 p. 2001.

BAGANHA, C. A. **Deteção e monitoramento da contaminação ambiental hidrogeológica na área do aterro sanitário do parque Santa Bárbara do município de Campinas, SP**. 1997, 115 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

BARKER, R. D. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. **Geophysics**, v.54, n.8, p. 1031-1037, 1989.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica aplicada a geologia de engenharia, segmentos e métodos elétricos: sondagem elétrica vertical, caminhamento elétrico**. São Paulo: Instituto de pesquisas tecnológicas – IPT, 1988. 81 p. (Apostila).

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e pratica**. 2006. 121 p. Tese (Livre - Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro, SP**. 1994.

169 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados: Modulo hidrogeologia**. Universidade Estadual Paulista UNESP/IGCE/DGA. Rio Claro. 2001, 91 p.

BRAGA, A. C. O. MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C.; ELIS, V. R. M. Métodos geoeletricos aplicados ao estudo do lençol freático em áreas de disposição de resíduos industriais. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRASÍLIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, SBGf, 1999.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 518 de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília, 2004, 15 p.

CAMPOS, J. C. V. **Avaliação preliminar do potencial hidrogeológico da cidade de Porto Velho – RO**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGUAS SUBTERRANEAS, 10, 1 CD, São Paulo, 1998.

CAMPOS, J. C. V.; SILVA FILHO, E. P.; OLIVEIRA, I. R. **Contaminação do aquífero Jaciparaná na cidade de Porto Velho – RO**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGUAS SUBTERRANEAS, 13, 1 CD, Cuiabá, 2004.

CAMPOS, J. C. V.; MORAIS, P. R. C. **Morfologia dos aquíferos da área urbana de Porto Velho – RO**. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 13. 1 CD, Cuiabá, 1999.

CAMPOS, K. C.; PACHECO, A. O lixo no município de Atibaia. **Revista Saneamento Ambiental**, n.92, p. 22-25, 2003.

CARRUTHERS RM & SMITH IF. The use of ground electrical survey methods for siting water-supply boreholes in shallow crystalline basement terrains. In: Hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. WRIGHT E.P & BURGESS W.G (eds). **Geological Society Special publication**, n.66, p.203-220, 1992.

CASTANY, G. **Prospeccion y explotacion de las águas subterráneas**. Barcelona: Ediciones Omega S.A., p. 659-669, 1975.

CHRISTENSEN, P. L.; BANWART, S.A.; JAKOBSEN, R.; HERON, G.; ALBRECHTSEN, H. J. Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes. **Journal of Contaminant Hydrology**, n.45. p.165–241, 2000.

CINTRA, F. H., **Avaliação preliminar da qualidade das águas superficiais e sub-superficiais no entorno de um sistema de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2004, 86 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.

COGON, J. H. A comparison of IP electrode arrays. **Geophysics**, v.38, n.4, p. 737-761, 1973.

COSTA, A. F. U.; FERLIN, C. A., Aplicação prática de métodos elétricos na detecção e monitoramento de contaminação de águas subterrâneas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFISICA, 3, 1993, Rio de Janeiro, **Resumos Expandidos**, Rio de Janeiro. 1993, p. 1210-1212.

COSTA, W. D; BRAZ DA SILVA, A. B. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. In: Feitosa, F. A. C e Manoel Filho, J., (eds) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, LABHID - UFPE, p. 133-174, 1997.

deGROOT - HEDLIN, C.; CONSTABLES. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, n.55. p. 1613-1624. 1990.

EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; RICE, E. W.; GREENBERG, A. B. (Ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 1998, 1000 p.

EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. **Geophysics**, v.42, n.5, p. 1020-1036, 1977.

ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.; WILLIAMS, M. M. A geofísica no estudo da poluição da água subterrânea. Ambiente: **Revista CETESB de Tecnologia**, v.2, n.2, p. 94-100, 1988.

ELIS V.R. **Avaliação da aplicação de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**. 1998, 264 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE, UNESP, Rio Claro, 1998.

ELIS V.R.; ZUQUETTE, L. V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, p. 119-134, 2002.

ELIS V.R.; ZUQUETTE, L. V. Caminhamento elétrico dipolo-dipolo – uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, 1996, Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro, 1996, v. 1, p. 39-48.

FERNANDES, L.C.; GUIMARÃES, S.C.P. (Org.). **Atlas geoambiental de Rondônia**. Porto Velho: SEDAM, 2002, 110 p..

FORGIE, D., Selection of the most appropriate leachate treatment methods. Part 1: A review of potential biological leachate treatment methods. **Water Pollution Research Journal of Canada**. v.23, n.2, p.308-355, 1988.

FRANCO, H. A.; PIRES, A. C. B. Estudo geofísico e geoquímico da contaminação de água por aterro sanitário. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFISICA, 4, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1995, v.2, p. 925-928.

GALLAS, J. D. F., **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia de engenharia e geologia ambiental**. Rio C, 2000, 174 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro, 2000.

GALLAS, J. D. F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. **Revista do Instituto Geológico**, v. 24 n. 1/2, p.43-51, São Paulo. 2003.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; SILVA, S. M. C. P.; COELHO, O. G. W.; PAIM P. S. G. Contaminação por choro e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, v.23, n.1, 2005.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; MALAGUTTI FILHO W.; PRADO R. L.; DOURADO, J. C. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, v.19, n.1, 2001.

GALLAS, J. D. F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v.24, n.1/2, p. 43-51, 2001.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GARCIA, A. E. **Guia de coleta e preservação de amostras de água**. São Paulo: CETESB, 1988. 150 p. Ilus, tab.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV: Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squars method**. Malaysia, 2003, ver. 3.53, 125 p.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer version 8.0**: Surface mapping system. Colorado: USA: Golden Software, 2002. 1 CD.

GOMES, L. P. **Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. 1989, 166p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

GUIMARÃES, L. C., **Utilização do sistema de informações geográfica (SIG) para identificação de áreas potenciais para disposição de resíduos na bacia do Paquequer, município de Teresópolis – RJ**. 2000, 172 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

HAMADA, J. Estimativas de geração e caracterização do choro e em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguau. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997.

HAMADA, J.; MATSUNAGA, I. Concepção do sistema de tratamento de chorume para o aterro sanitário de Ilhéus - BA. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 9, 2000, Porto Seguro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, p.1515-1524.

HAZELL, J. R. T.; CRATCHLEY, C. R.; JONES, C. R. C. The hydrogeology of crystalline aquifers in northern Nigeria and geophysical techniques used in their exploration. In: Hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. WRIGHT, E.P.; BURGESS, W.G. (eds.). **Geological Society Special Publication**, n.66, p.155-182, 1992.

HUBER et al. Método elétrico e eletromagnético aplicados ao delineamento de zonas contaminadas por resíduos de um curtume. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRASILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9, 2005, Salvador, **Anais ...**, Salvador: SBGf, 2005, 6p.

INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**. v.40, n.5, p. 798-817, 1975.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo demográfico**. Rio de Janeiro, 2000, p. 3-5.

INTERPEX SOFTWARE - IX1D: **Sounding inversion**. Colorado, USA. 2005, ver. 3.24.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2. ed. São Paulo, 2000.

KELLY, W. E. Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination. **Ground Water**. Dublin: Ohio, v.14, n.1, p. 6-10, 1976.

KREBS, A.S. J.; ADAMY, A.; REIS, M. R. **Alternativas locais para a disposição de resíduos sólidos urbanos na área de Porto Velho-RO**. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Porto Velho, 1999.

LOKE M. H.; BARKER R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p.131-152. 1996.

LOKE, M. H. & DAHLIN, T. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. **Journal of Applied Geophysics**, v.49, n.3, p.149-162, 2002.

MACHADO, P. A. L. **Estudos de direito ambiental**. São Paulo: Editora Malheiros, 1994.

MALAGUTTI FILHO, W.; JOSE, C.; BRAGA, A. C. O.; ELIS, V. R.; TANDEL, R. Y.; PORSANI, J. L. Aplicação integrada de técnicas geofísicas no aterro sanitário de Rio Claro – SP: Resultados preliminares. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5, 1997, São Paulo, **Anais...** São Paulo, 1997, v.1, p. 422-424.

- MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. e Manoel Filho, J., (eds.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, LABHID-UFPE, 1997, p. 13-33.
- MARANHAO, C. M. L. Alguns aspectos de interpretação fotogeológicas aplicados à prospecção de aquíferos em meio cristalino. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v.7, p.17-25, 1994.
- MARINHO, J. M. L.; VASCONCELOS, S. M. S. Bacia costeira do Rio Campo – Caucaia / Ce: Levantamento Geométrico e hidrogeológico. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v.17, n.1, 2004.
- MARTINS, A. S.; BASTOS, W. R.; BERNARDI, J. V. E.; ALMEIDA, R.; SOUZA, D. O. **Avaliação de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos no igarapé próximo ao campus da UNIR sob influência do lixão municipal**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOTOXICOLOGIA, 2006, São Pedro, 2006.
- MONTEIRO, A. C. **Eletrorresistividade aplicada na avaliação do potencial aquífero da região de Porto Seguro**. 1999. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 1999.
- MOONEY, H. M. **Handbook of engineering geophysics – electrical resistivity**. Minneapolis: Bison Instruments Inc., v.2. 1980, 34 p.
- MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro – SP. **Geociências**, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, n.22, p.129-139, 2003.
- MOURA, H. P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geométrica em áreas de disposição de resíduos urbanos**. 2002. 231 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- NEUBAUER, A.; POSSARI, I. A.; HERRMANN, J. C.; SILVA, L. P.; SILVEIRA, M. A. P. A.; ROSARIO, N. R.; FEITOSA, S. C. **Análise ambiental da lixeira urbana de Porto Velho**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental na Amazônia Brasileira) - Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2000.
- PALACKY, G. J.; KADEKARU, K. 1979. Effect of tropical weathering on electrical and electromagnetic measurements. **Geophysics**, v.44, n.1, p. 69-88, 1979.
- PALMA, J. B.; ZUQUETTE, L. V.; ELIS, V. R. Comportamento de frentes de contaminação a partir de modelagem com diferentes valores de parâmetros de sorção. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v.34, n.2, p. 175-186, 2004.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PLANAFLORO. **Relatório de revisão para prorrogação do plano agropecuário e florestal de Rondônia**. Porto Velho, 2002, 66 p.

PORSANI, J. L.; MALAGUTTI FILHO, W.; ELIS, R. V.; SHIMELES, F.; DOURADO, J. C.; MOURA, H. P. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v.55, n.34, p.199-209, 2004

PORTO VELHO. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação, **Instalação da lixeira municipal: Levantamento altimétrico**. Porto Velho, 1993. 1 Mapa, Escala 1:2000.

REIS, M, R.; PEREIRA, L. A. da COSTA, REIS, M. F. P.; SILVA FILHO, E, P.; MORAIS, P. R. C. **Avaliação preliminar da área periurbana de Porto Velho, RO (APPV) para a disposição de resíduos urbanos**. Porto Velho: CPRM, v.1, 1996, 16 p.

RIGOTI, A.; CROSSLEY, D.J. Reduction of ambiguity in geoelectric models using multiple data sets. **Revista Brasileira de Geofísica**, n.5, p. 29-45, 1987.

RIGOTI, A.; PINHEIRO JR., V.; GOIS, J. R.. Mapeamento geoeletrico do aterro da Lamenha Pequena (Curitiba-PR). In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFISICA, 5, 1997, São Paulo, **Anais...** São Paulo, 1997, v.2. p.1216-1219.

RIZZOTTO, G. J. Projeto Rio Madeira. Levantamento de informações para subsidiar o estudo de viabilidade do aproveitamento hidrelétrico (AHE) do Rio Madeira, AHE Santo Antônio. **Relatório de pesquisa**. Porto Velho: CPRM, 2005. 235p.

ROY, A; APPARAO, A. Depth of investigation in direct current methods. **Geophysics**, v.36, n.5, p. 943-959, 1971.

Rondônia. **Segunda aproximação do zoneamento sócio-econômico-ecológico do Estado de Rondônia**: Hidrologia. Porto Velho, RO. 1998, 184 p.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 1999 / SEDAM**. Porto Velho, 2000.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 2000 / SEDAM**. Porto Velho, 2001.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 2001 / SEDAM**. Porto Velho, 2002.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 2002 / SEDAM**. Porto Velho, 2003.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 2003 / SEDAM**. Porto Velho, 2004.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 2004 / SEDAM**. Porto Velho, 2005.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia - Ano 2005 / SEDAM**. Porto Velho, 2006.

Rondônia. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia** - Ano 2006 / SEDAM. Porto Velho, 2007.

SANTOS, J. P., **Caracterização de Cd, Co, Cu, Pb, Cr, Fé, Mn, Zn e Hg da lixeira urbana de Porto Velho – RO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) – Departamento de Biologia, Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2006, 77 p.

SANTOS, F. M., **Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuiabá – MT**. 2005, 88 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

SCANDOLARA, J. **Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia**: Texto explicativo e mapa geológico do Estado de Rondônia. Brasília: CPRM, 1999, Escala: 1:1.000.000, 1CD.

SCHUELER, A. S., **Estudo de caso e proposta para classificação de áreas degradadas para disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2005, 223 p., Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SERAFIM, A. C.; GUSSKOV, K. C.; SILVA, F.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO-PELEGRINI, N. N.; SOBRINHO, G. D.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. **Chorume, impactos ambientais e possibilidades de tratamentos**. III Fórum de Estudos Contábeis - Área ambiental, Rio Claro, 2003, p. 6-7.

SHIRAIWA, S., LISOVSKY, S. P., ELIS, V. R., PORSANI, J. L.; BORGES, W. R. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá – MT. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 20, n.3, 2002, p. 181-186.

SILVA FILHO, E.P.; CAMPOS A. L. C. V. Diagnostico da captação de água subterrânea em Porto Velho. Universidade Federal de Rondônia, **Primeira Versão**, Ano I, n.29, Porto Velho, 2002, 8 p.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e Sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Noticiário Geomorfológico**, v.16, p. 107-121, 1976.

SOUZA, A. A. **Zoneamento geoambiental do município de Porto Velho – RO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006, 40p.

STURARO, J. R., **Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento**. 1994, 183 p., Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues**. New York: McGraw-Hill, 1993, 978 p.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. **Applied geophysics**. Cambridge University Press, 1990, 866 p.

URISH, D. W. The practical applications of surface electrical resistivity to detection of groundwater pollution. **Ground Water**. Dublin: Ohio, v.21, n.2, p. 144-152, 1983.

VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. **Ingeniería geológica**. Madrid: Isabel Capella. Pearson Educación, 2002, 744p.

VOGELSANG, D. **Environmental geophysics: A practical guide**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 174 p.

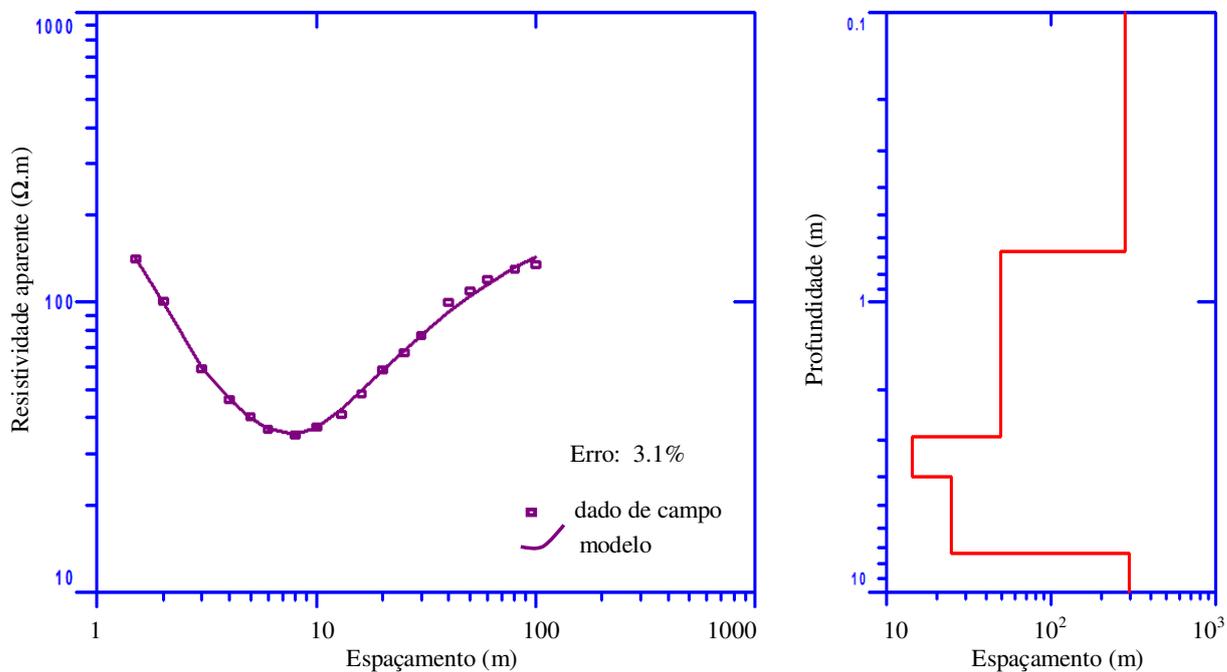
VOUILLAMOZ, J. M.; LEGCHENKO, A.; ALBOY, Y.; BAKALOWICS, M.; BALTASSAT, J. M.; AL-FARES, W. Localization and saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. **Ground Water**, v.41, n.5, p. 578-586, 2003.

WARD, S. H. Resistivity and polarization methods. **Geotechnical and environmental geophysics**. v.1, p.147-189, 1990.

XAVIER, F. F.; BERKENBROCK, P. E. Mapeamento geoeletrico no aterro sanitario do município de Blumenau, SC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 1, 2005, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis, 2005, p. 2099-2109.

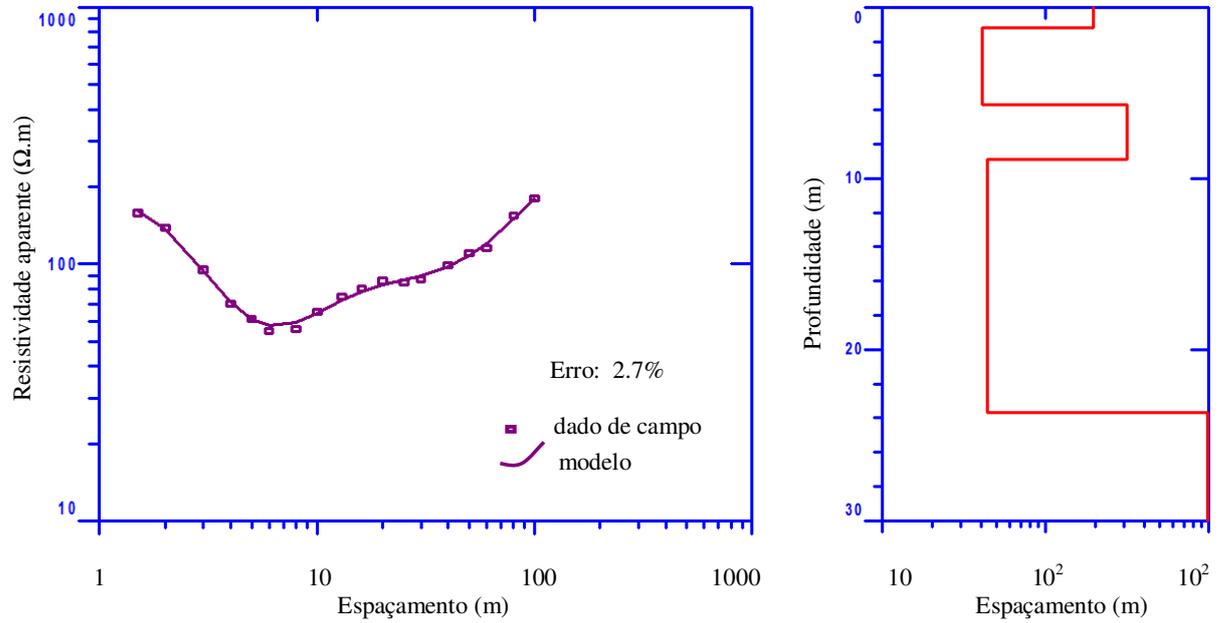
APÊNDICE

Interpretação geolétrica da SEV1



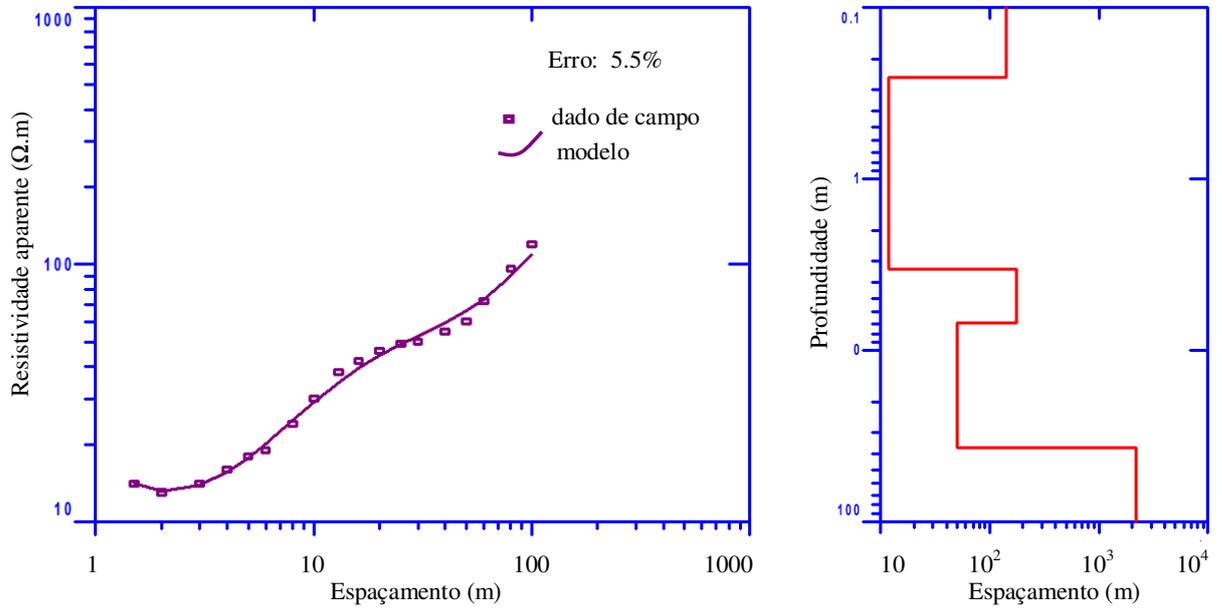
Horizontes	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	279	0.6	0.0	104	Solo superficial sêco
2	49	2.2	0.6	103.4	Resíduos
3	14	1.1	2.8	101.2	
4	24	3.3	3.9	100.1	Rocha alterada
5	301	indefinida	7.2	97.8	Granito

Interpretação geolétrica da SEV2



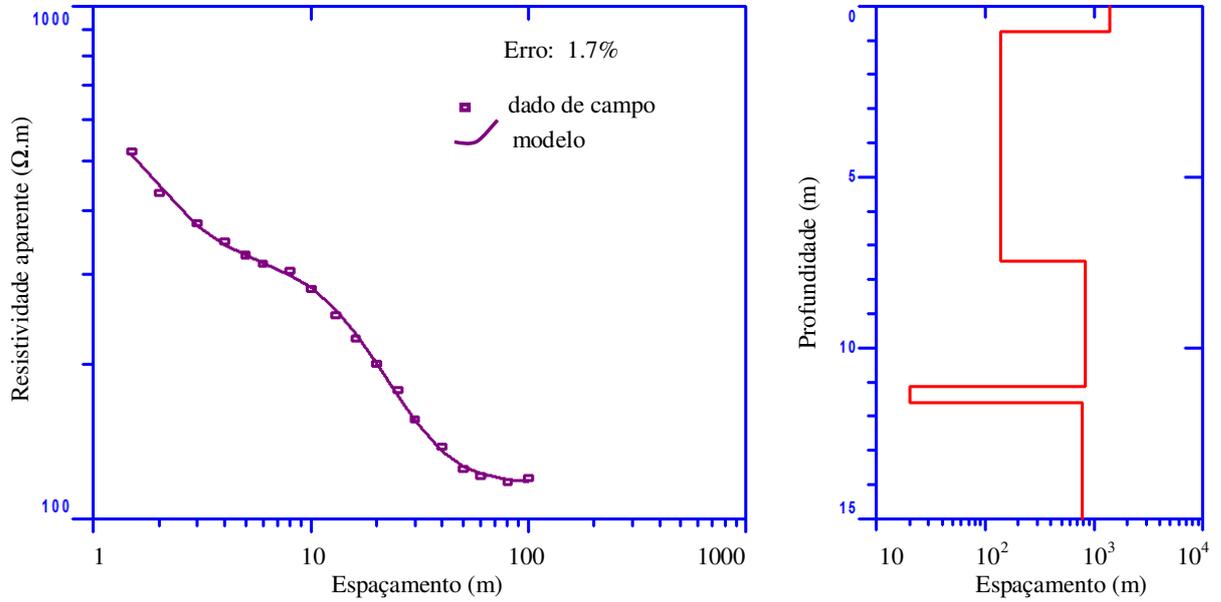
Horizontes	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	196	1.1	0.0	104	Sólido superficial sêco
2	40	4.5	1.1	102.9	Resíduos
3	312	3.2	5.6	98.4	Rocha alterada
4	43	14.8	8.8	95.2	
5	982	indefinida	23.6	80.4	Granito

Interpretação geolétrica da SEV3



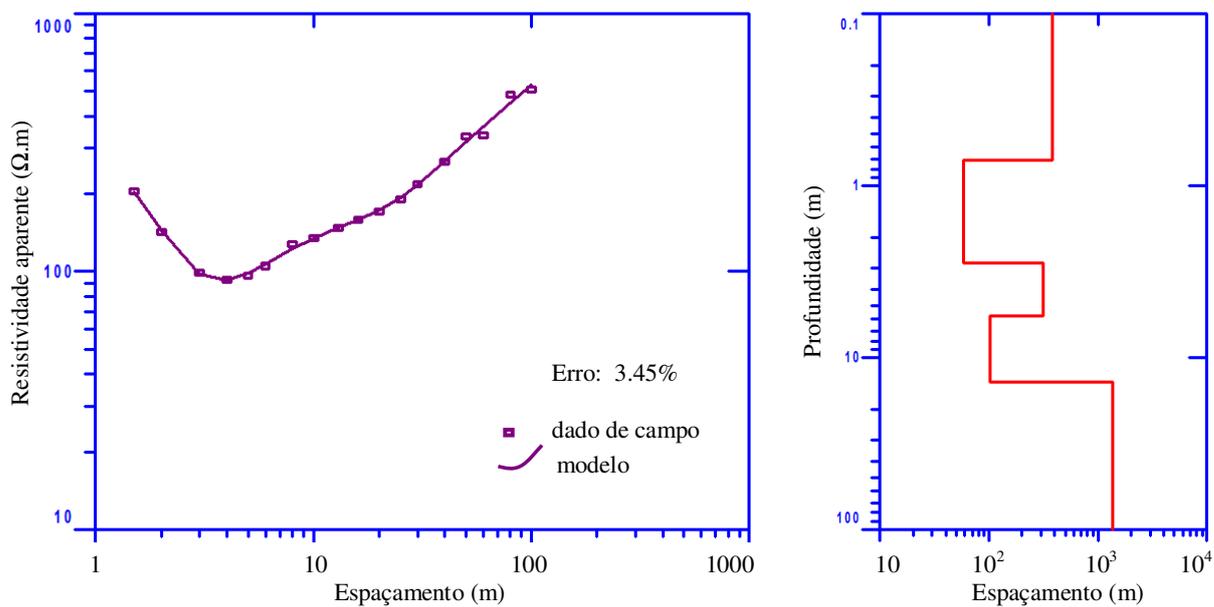
Horizontes	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	139	0.3	0.0	104	Solo superficial sêco
2	11	3.1	0.3	103.7	Resíduos
3	174	3.5	3.4	100.6	Rocha alterada
4	50	30.3	6.9	97.1	
5	2173	indefinida	37.2	66.8	Granito

Interpretação geolétrica da SEV4



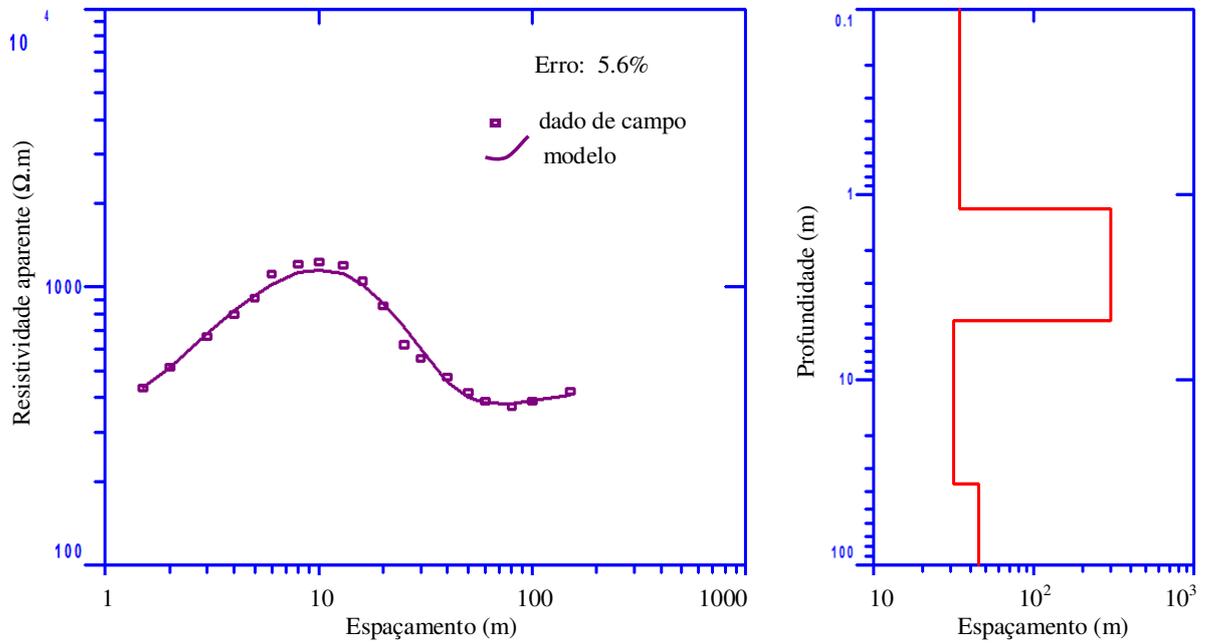
Horizontes	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	1375	0.7	0.0	104	Solo superficial sêco
2	139	6.7	0.7	102.3	Rocha alterada
3	834	3.7	7.4	95.6	
4	20	0.5	11.1	91.9	
5	783	indefinida	11.6	91.4	Granito e/ou concreções lateríticas

Interpretação geolétrica da SEV5



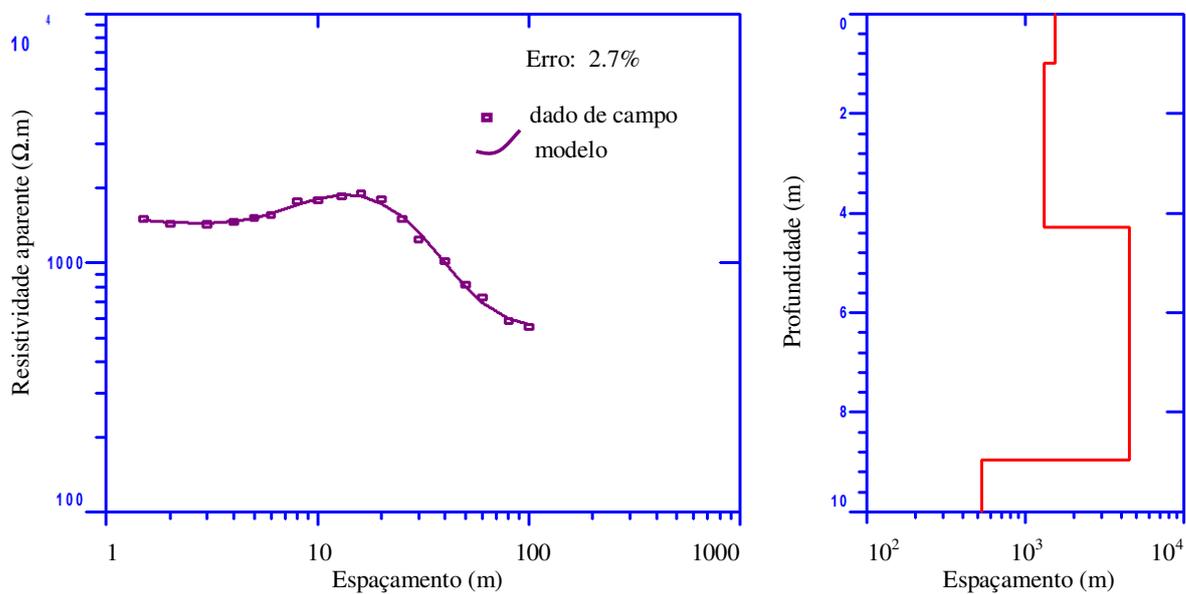
Horizontes	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	379	0.7	0.0	105	Solo superficial sêco
2	58	2.1	0.7	104.3	Rocha alterada
3	315	2.9	2.8	102.2	
4	102	8.2	5.7	99.3	
5	1372	indefinida	13.9	91.1	Granito

Interpretação geolétrica da SEV6



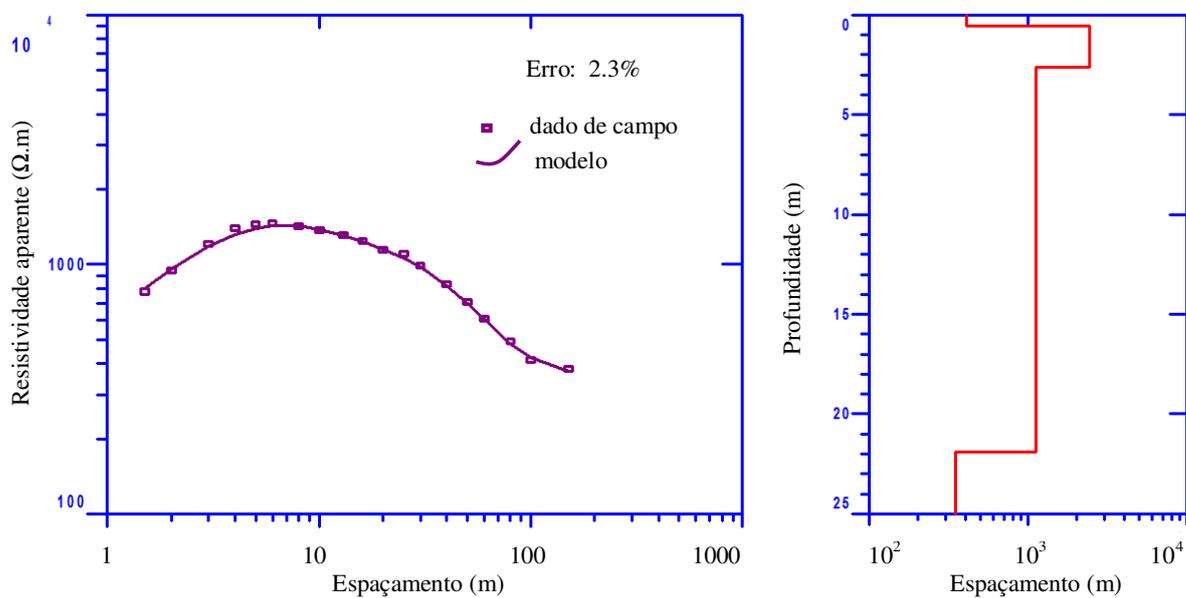
Horizontes	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	341	1.2	0.0	105	Solo superficial sêco
2	3018	3.7	1.2	103.8	Concreções lateríticas
3	313	31.8	4.9	100.1	Granito fraturado saturado
4	447	indefinida	36.7	68.3	

Interpretação geolétrica da SEV7



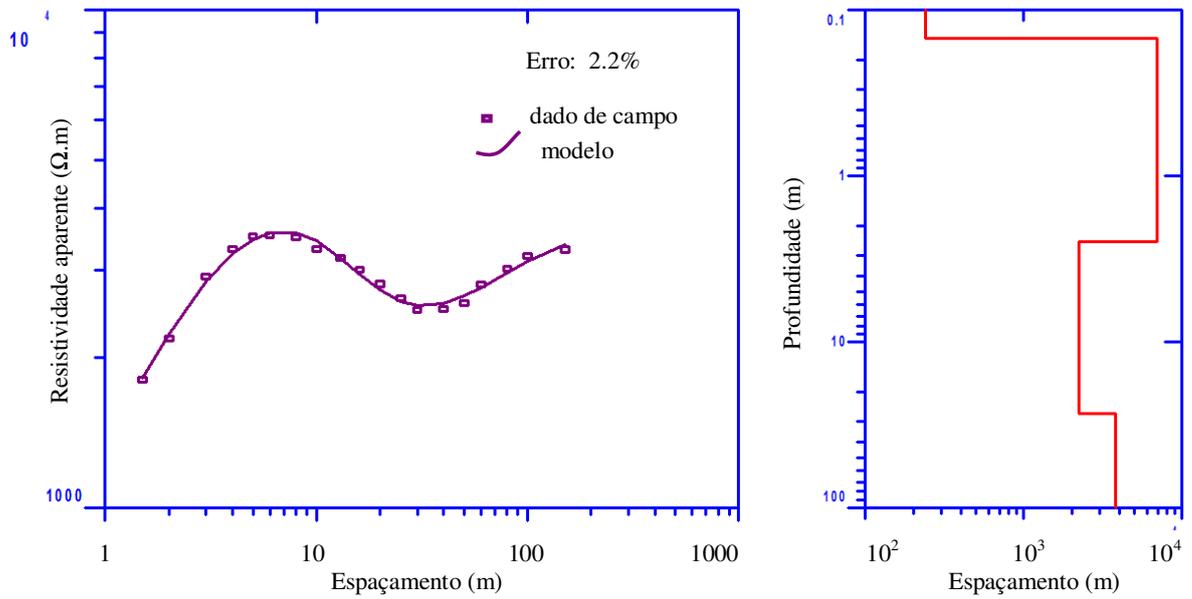
Horizontes	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	1530	0.9	0.0	103	Solo superficial sêco
2	1303	3.3	0.9	102.1	Concreções lateríticas
3	4505	4.7	4.2	98.8	Granito
4	530	indefinida	8.9	93.1	Granito frat. saturado

Interpretação geolétrica da SEV8



Horizontes	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo litológico
1	408	0.6	0.0	105	Solo superficial sêco
2	2421	2.0	0.6	104.4	Concreções lateríticas
3	1115	19.3	2.6	102.4	Granito
4	338	indefinida	21.9	83.1	Granito frat. saturado

Interpretação geolétrica da SEV9



Horizontes	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Cota (m)	Tipo Litológico
1	2381	0.2	0.0	105	Solo superficial sêco
2	6933	2.3	0.2	104.8	Granito
3	2217	24.7	2.5	102.5	
4	3767	indefinida	27.2	77.8	

ANEXO

Mapa altimétrico para instalação da lixeira de Porto Velho

