



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**GEOFÍSICA APLICADA AO MAPEAMENTO DE AQUÍFEROS DA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.**

RONALDO LOPES RODRIGUES MENDES

Belém

2000



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**GEOFÍSICA APLICADA AO MAPEAMENTO DE AQUÍFEROS DA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.**

**Dissertação apresentada por
RONALDO LOPES RODRIGUES MENDES**

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de aprovação :

COMITÊ DE TESE:

Dr. Om Prakash Verma (Orientador)

Dr. Luiz Rijo

Dr. Olivar A. Lima de Lima

BELÉM

2000

DEDICATÓRIA

Dedico a minha companheira Sônia, mais lutadora que a maioria das mulheres, que só Freud explica.

Dedico aos meus pais, dona Regina e "seu" Ciro, há mais de meio século juntos na estrada da vida.

Aos meus doze amados irmãos, nos quais tive bons espelhos.

Ao meu amado irmão Ricardo (in memoriam), do qual herdei um pouco da imensa perseverança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a dona Regina e ao "seu" Ciro, moradores do bairro da Pedreira e do meu coração, por tudo que, bem ou mal, me propiciaram.

A minha amada Sônia por ter conseguido me suportar durante o período de mestrado e pelo incentivo dado a tal tarefa.

As minhas irmãs, guerreiras como sempre, pelo grande incentivo e orgulho que têm por mim. Muito obrigado.

Ao professor Verma, orientador, por ter aceitado o tema proposto e ter me orientado neste.

Ao CNPq, pelo apoio através da concessão de bolsa, sem a qual seria mais difícil a execução deste trabalho.

Ao DGf, pelo apoio financeiro dos trabalhos de campo.

Aos professores do DGf: Leão, Rijo, Geraldo, Lúcia, Gouvêa, pelo que contribuíram em minha formação

Ao colega Vinícius, pelo companheirismo durante o curso.

Ao amigo Cícero, pelos esclarecimentos e companheirismo.

A Benildes, secretária e amiga do CPGF.

Ao geólogo e grande amigo José Anaisse pela ajuda no entendimento no ambiente geológico em questão.

Aos colegas da geofísica: Paulo Carvalho, German Garabito, Luis Castillo, João Baptista. Obrigado pelo convívio agradável.

Aos funcionários do DGf: Ediana, Alberto, Orlando, Álvaro e Paulo Magalhães.

Aos funcionários da biblioteca do CG, sobretudo ao Davi, Lúcia e Hélio.

Ao Ricardo Fialho e ao Lourival pela ajuda na digitalização dos mapas.

Ao Francisco, pela digitalização de mapas.

EU QUERIA TANTO SER UM POETA MALDITO
A MASSA SOFREDO ENQUANTO PROFUNDO MEDITO

EU QUERIA TANTO SER UM POETA SOCIAL
ROSTO QUEIMADO PELO HÁLITO DAS MULTIDÕES

EM VEZ, OLHA EU AQUI PONDO SAL NESSA SOPA RALA
QUE MAL VAI DAR PARA DOIS

(PAULO LEMINSKI)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
EPÍGRAFE.....	iv
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
1 - INTRODUÇÃO.....	3
1.1 – MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.2 – OBJETIVO.....	5
1.3 – METODOLOGIA.....	5
2 - ESTRATIGRAFIA E HIDROGEOLOGIA.....	7
2.1 – ESTRATIGRAFIA DOS DEPÓSITOS CENOZÓICOS DO NE DO PARÁ	7
2.1.1– Formação Pirabas.....	7
2.1.2 – Sedimentos Barreiras.....	8
2.1.3 – Sedimentos Pós-Barreiras.....	9
2.1.4 – Sedimentos atuais.....	9
2.2 – ESTRATIGRAFIA LOCAL.....	11
2.2.1 – Formação Pirabas.....	11
2.2.2 – Sedimentos Barreiras.....	13
2.2.3 – Sedimentos Pós-Barreiras.....	16
2.2.4 – Sedimentos atuais.....	16
2.2.5 – Interpretação Paleoambiental.....	16
2.3 – HIDROGEOLOGIA.....	17

3 – FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPREGADOS.....	20
3.1 – SONDAÇÃO ELÉTRICA VERTICAL.....	20
3.2 – PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO PARA ÁGUA.....	30
3.3 – INTERPRETAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS	36
3.4–RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS GEOELÉTRICOS E HIDRO- GEOLOGÍCOS.....	38
4 – AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	40
4.1– SONDAÇÃO ELÉTRICA VERTICAL.....	40
4.2 – PERFILAGENS DOS POÇOS.....	42
5 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	44
5.1– CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SEÇÕES GEOELÉTRICAS.....	44
5.2 – SEÇÕES.....	45
5.3 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	53
6 – CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS	63
ANEXO A – CURVAS DAS SEVS.....	64
ANEXO B – PERFILAGENS INTERPRETADAS DOS POÇOS.....	66

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

FIGURA 1 – Zonas de abastecimento público nos Distritos Administrativos de Belém.....	4
FIGURA 2 – Mapa geológico da região de Belém.....	12
FIGURA 3 – Poços descritos por PONTES (1998) no Distrito Administrativo de Icoaraci - DAICO.....	15
FIGURA 4 – Dispositivo geral de medida.....	22
FIGURA 5 – Dispositivo de medida do método de eletrorresistividade (arranjo Schlumberger).....	23
FIGURA 6 – Exemplo de uma caderneta de campo.....	26
FIGURA 7 - Esquema de um sistema simultâneo de medida de potencial espontâneo e resistência elétrica.....	33
FIGURA 8 - Relação entre o SSP e o SP.	33
FIGURA 9 – Exemplo dos perfis de RG, SP e RE e a interpretação destes.....	37
FIGURA 10 – Mapa de localização das SEVs e das dos Poços Perfilados.....	41
FIGURA 11 – Seção litológica interpretada AA'. Atravessa a área na direção N -S.....	48
FIGURA 12 – Seção litológica interpretada BB'. Atravessa a área na direção N -S.....	49

FIGURA 13 – Seção litológica interpretada CC'. Atravessa a área na direção NE – SW.....	50
FIGURA 14 – Seção litológica interpretada CC'. Atravessa a área na direção NW – SE.....	51
FIGURA 15 – Mapa de resistência transversal dos horizontes geelétricos entre 0 e 50 m.....	56
FIGURA 16 – Mapa de resistência transversal dos horizontes geelétricos entre 50 e 100 m.....	57

TABELAS

TABELA 1 – Coluna estratigráfica proposta por ROSSETTI <i>et al.</i> (1989) da região NE do Pará.....	10
TABELA 2 - Descrição sintetizada do perfil elaborado por SOARES (1984) de um poço no campus universitário do Guamá - DAGUA.....	14
TABELA 3 - Demonstração do abastecimento da Região Metropolitana de Belém.....	18
TABELA 4 – Resultado do processamento das SEV's.....	52

RESUMO

Hoje, cerca de 46% da água potável consumida na região de Belém provém dos mananciais subterrâneos, o que mostra a grande importância desta fonte, mesmo em uma região rica em água superficial (rios, igarapés, furos e até mesmo uma baía). Isso decorre da falta de execução do planejamento previsto, além de que os custos de obras de captação de águas superficiais são muito elevados. A alternativa para Belém tem sido a água subterrânea, como um bom, saudável e econômico paliativo. A existência de uma enorme quantidade desses recursos nos sedimentos Barreiras e na Formação Pirabas contribui para esta alternativa. Os sedimentos Barreiras foram depositados em ambiente fluvial e estuarino, enquanto que a Formação Pirabas possui fácies de origem estuarina, de mangue e marinha.

No contexto apresentado, mostra-se então a necessidade de investigar tais recursos com o intuito de fazer ótimo proveito destes. Para tanto, foram usadas duas metodologias geofísicas de forma integrada: a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e a Perfilagem Geofísica de Poço, usando raios gama, potencial espontâneo e resistência elétrica.

Pode-se discernir dois ambientes aquíferos. O primeiro até cerca de 160 m de profundidade, em que prevalecem corpos arenosos em formas de canal e lentes entrecortados ou não, imersos em uma matriz argilosa. O segundo é caracterizado por pacotes arenosos bastante extensos com lentes de argila, cuja profundidade é desde 160 m até 285 m, aproximadamente.

O consumo de água da porção superior é adequado às residências e condomínios, visto o custo elevado de obras de captação a grandes profundidades. Já o abastecimento público deve utilizar a porção inferior, devido às vazões bastante elevadas (maiores que 100 m³/h) e devido à garantia de água de boa qualidade, protegida de ações antrópicas, como vem sendo feito.

ABSTRACT

Today, about 46% of the drinkable water consumed in the city of Belém is underground water, showing the great importance of this source, even in an area that is rich in surface water as the amazon region. This importance is due to a failure in executing of an established planning. In addition, the costs of works of exploitation of superficial waters are very high. Thus, the alternative for Belém has been the underground water, as a good, healthy and economic palliative. The existence of an enormous amount of water resources in the Barreiras sediments and the Pirabas formation contributes to this alternative. The former were deposited in fluvial and estuary environment, while the Pirabas formation possesses facies of estuary, mangrove and oceanic origin.

In the presented context, it is necessary to investigate such resources to obtain an optimum benefit from them. For this end, two geophysical methodologies were integrated: the Vertical Electric Soundings (VES) and Geophysical Well Logging, using gamma rays, spontaneous potential and electric resistance.

Two aquifer environments can be discerned. The first one extends to nearly 160 m of depth, and comprises sandy bodies in forms of channels and lenses, interrupted or not, imbedded in a shaly matrix. The second one is characterized by extensive sandy beds with lenses of clay, and its depth extends from 160 m up to 285 m, approximately.

The consumption of water of the superior aquifer is adequate for residences and condominiums, because of the high cost of great depth wells. The public provisioning should use the inferior aquifer, due to its high discharges (larger than 100 m³/h) and its water of better quality, protected of anthropic actions, as it is being done.

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A capital do estado do Pará, Belém, tem crescido de forma acelerada e desordenada como a maioria dos centros urbanos brasileiros. O aumento populacional aliado a ausência de práticas do poder público em dar estrutura aos habitantes, leva à queda da qualidade de vida em tais centros. Dentre os fatores que contribuem para essa queda está, sobretudo, a deficiência no abastecimento de água potável, sendo a ausência deste recurso a causadora de várias patologias, principalmente interinfecções, doenças tais que fatalizam um grande número de crianças.

A partir de 1999, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém (SAAEB) vem fazendo um estudo com o intuito de municipalizar os sistemas de abastecimento e de esgoto do município. Este estudo produziu um relatório preliminar, o qual contribuiu no texto em seguida.

O município de Belém possui um Plano Diretor (PD), elaborado pela Companhia de Saneamento do Estado do Pará (COSANPA), que estabelece diretrizes quanto ao abastecimento de água potável da população. No entanto a execução do planejamento previsto não foi seguida. Além disso, o êxodo rural em direção da capital provocado pela falta de alternativas nas cidades do interior, pela estagnação econômica local generalizada ou pelo fim dos grandes projetos na Amazônia, quase duplicam a população de Belém em uma década. Bolsões de pobreza foram avolumando-se nas periferias da cidade, sobretudo nos distritos DABEN, DAENT e DAICO (Figura 1). Isso leva a população destas áreas a servirem-se de águas superficiais e poços dos aquíferos freáticos, implicando em grandes riscos a saúde dos mesmos.

Como o PD não foi cumprido, passou-se então a medidas paliativas, utilizando sobretudo os mananciais subterrâneos, localmente. Unidades de captação (poços profundos) foram se multiplicando pela cidade.

Apesar disso, ainda há problemas de abastecimento no município. Principalmente nas áreas de ocupação desordenada localizadas nos distritos citados.

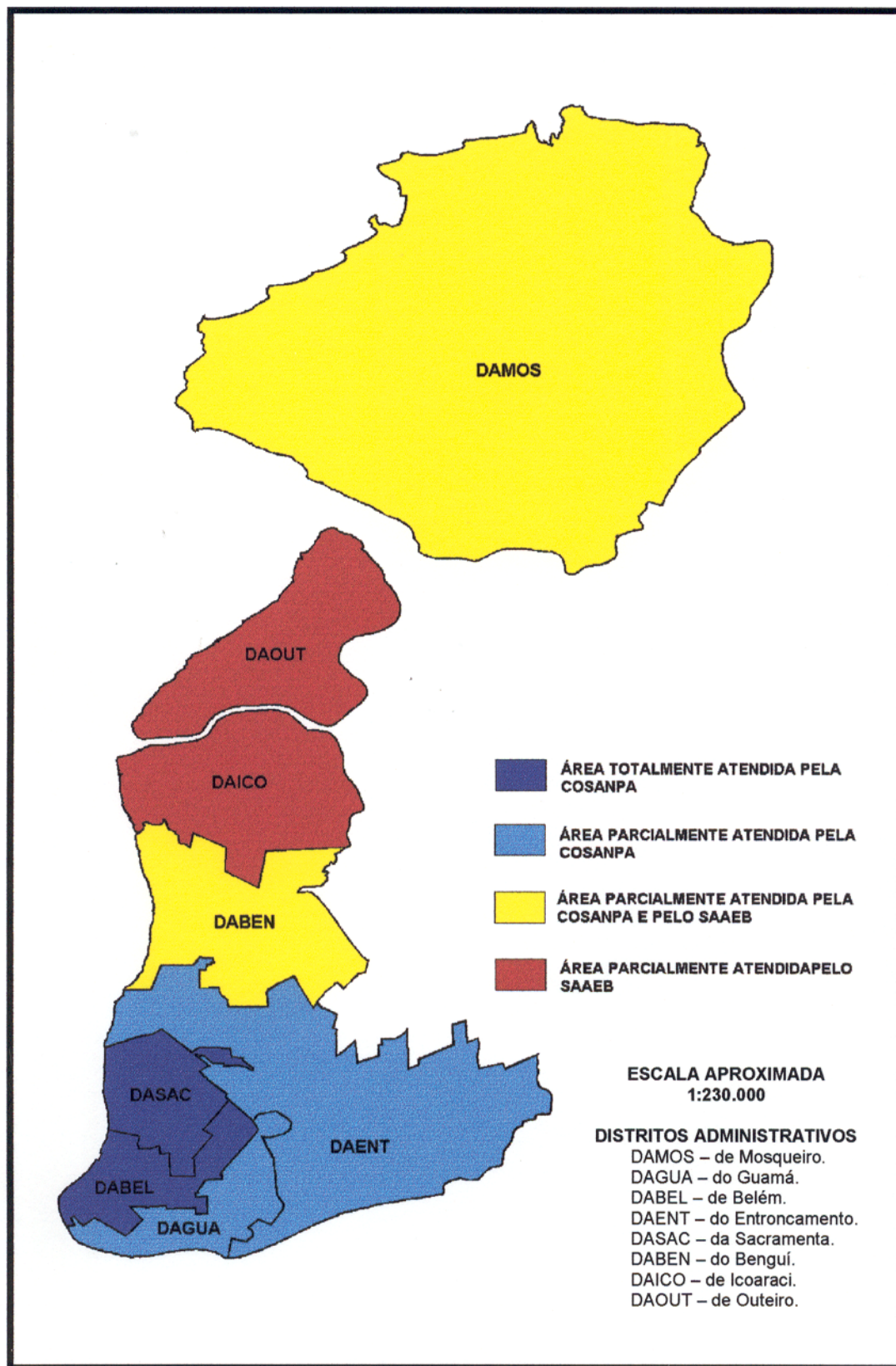


FIGURA 1 – Zonas de abastecimento público nos Distritos Administrativos de Belém (fonte: SAAEB, 1999).

Considera-se que cerca de 23% da população do município não é abastecida por água potável.

A solução disso pode-se dar de duas formas: seguir o PD, que prevê o uso de água superficial, com maior aporte de recursos para a ampliação do complexo do Utinga, e desta forma suprir as necessidades sobretudo dos distritos DAENT, DABEN e DAICO; a outra forma é fazer a captação superficial para os distritos DABEN e DAICO ou então utilizar o manancial subterrâneo nesses distritos e nos demais. Sabendo que a escassez de recursos é premente, esta última alternativa, por ser menos onerosa e de mais simples execução, deve nortear as tomadas de decisão.

Além de requerer menos recursos para a sua captação, a água subterrânea está livre de contaminação e não requer tratamento (caso sejam seguidos corretamente as normas técnicas estabelecidas).

Com vistas a esta forma de resolução do problema, esta tese tem a finalidade de contribuir para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos no município.

1.2. OBJETIVO

Identificar e delimitar os aquíferos da região metropolitana de Belém – PA através de sondagens elétricas verticais e perfilagens geofísicas de poços, auxiliadas pelas informações geológicas da região.

1.3. METODOLOGIA

A seguinte metodologia foi empregada para alcançar os objetivos

a) Processamento e interpretação de dados de geofísica de poço. Este consiste em:

- Digitalização dos perfis de raios gama, potencial espontâneo e resistência elétrica
- Individualização das unidades por perfil, priorizando a resistência elétrica (em função do maior volume de rocha investigado) e em seguida o raio gama e por fim o potencial espontâneo;

- Correlação das unidades litológicas identificadas através dos perfis com finalidade de (i) avaliar a continuidade dos estratos e (ii) marcar as grandes unidades de pacotes litológicos contínuos, vertical e lateralmente para auxiliar na interpretação das SEVs.
- b) Emprego da técnica de Sondagem Elétrica Vertical com o objetivo de identificar diferentes unidades geolétricas em sua extensão vertical e lateral com o auxílio das informações obtidas através de perfis geofísicos de poço e da geologia da área. Essa técnica consiste em:
- Levantamento das SEVs em vários pontos da cidade;
 - Processamento usando os métodos direto e inverso, levando em consideração os resultados das perfilagens geofísicas dos poços.
- c) Montagem e interpretação das seções geolétrica-litológicas baseadas nos dados das SEVs e Perfilagens dos Poços.
- d) Avaliação final dos resultados.

2. ESTRATIGRAFIA E HIDROGEOLOGIA

2.1. ESTRATIGRAFIA DOS DEPÓSITOS CENOZÓICOS DO NE DO PARÁ

O Cenozóico da região Bragantina (NE do estado do Pará) é composto pela Formação Pirabas e pelos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras (ROSSETTI *et al.* 1989). A coluna estratigráfica pode ser vista na Tabela 1.

2.1.1. Formação Pirabas

Esta unidade é composta por margas, calcários variados e poucos folhelhos. Possui um riquíssimo e variado conteúdo fossilífero com foraminíferos, briozoários, moluscos, corais, etc. Foi subdividida em três fácies distintas: Castelo, Capanema e Baunilha Grande (Petri¹, Ferreira² *apud* FERREIRA 1982).

A fácies Castelo é constituída por calcários duros diversificados, ocorrendo comumente coquinas, bioermitos, micritos, dolmicritos. Seu ambiente gerador é de mar aberto, águas bastante agitadas e quentes com salinidade normal ou elevada. Esta fácies mergulha para a plataforma continental do Pará e se afunila no sentido sul do estado.

A fácies Capanema é composta por calcários argilosos (margas), micritos e bioclastos, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos. Seu ambiente deposicional é lagunar em borda de bacia ou estuarino em águas calmas e salinidade um pouco abaixo do normal. Esta fácies está sobreposta e sem continuidade com a fácies Castelo.

A fácies Baunilha Grande é composta de argilas negras ou vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros incrustados de crustáceos. Foi depositada em ambiente redutor, tipicamente de mangue. Esta fácies é intermediária, de forma descontínua, entre as fácies Castelo e Capanema.

¹PETRI, S. 1957. Foraminíferos Miocênicos da Formação Pirabas. U.S.P., Fac. Fil. Ciên. E Letras. Bol. São Paulo. 276. Geol. n. 16.

²FERREIRA, C. S. 1980. Correlação de Formação Pirabas (Mioceno Inferior), N e NE do Brasil, com as Formações Chipola e Tampa da Península da Flórida, USA. Buenos Aires. Tomo III: 49-55.

O contato inferior é pouco conhecido. Próximo a Capanema, esta formação está assentada em rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano. O limite superior com os sedimentos Barreiras pode ser discordante em alguns locais ou concordante em outros (PETRI & FÚLFARO 1983).

Com base no conteúdo fóssilífero Maury³ *apud* FERREIRA (1982) definiu que a Formação Pirabas foi depositada no Mioceno Inferior.

2.1.2. Sedimentos Barreiras

A seguir estão as descrições dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras tendo por base ROSSETTI *et al.* (1989) e alguns outros autores.

Baseando-se em estruturas sedimentares e aspectos texturais, ROSSETTI *et al.* (1989) descreveram várias fácies e foram agrupadas nas associações A, B e C, as quais foram depositadas em sistema de leques aluviais, planícies de areia (e/ou canais fluviais) e planícies de lama (e/ou mangue), associados a um corpo aquoso marinho.

- Associação A: sedimentos conglomeráticos polimíticos mal selecionados com granulometria variando de seixos até matacões, geralmente de subangulosos a subarredondados, em geral maciços, com matriz areno-argilosa. Localmente com estratificação inclinada e gradocrescência ascendente.

- Associação B: sedimentos arenosos, variando para intercalações de areia e argila. Possuem estratificações cruzadas acanalada e tabular, ôndulas cavalgantes ascendentes tipo *wave* e *linsen* e, localmente, restos vegetais fósseis. Há também faixas sem estruturas. Ocasionalmente ocorrem porções conglomeráticas. Suas fácies são mal selecionadas, de granulometria variando, em geral, de fina a média, subangulosos a subarredondados, contendo também, ocasionalmente, grânulos de quartzo subangulares a subarredondados bem como fragmentos de argilito.

- Associação C: sedimentos predominantemente argilosos, com laminação plano-paralela e maciça comumente sendo recoberto por seixos argilosos.

³ MAURY, C. J. 1925. Fósseis terciários do Brasil, com descrição de novas formas cretáceas. Serv. Geol. Miner. do Brasil, Monografia. n. 4, 431 p., 24 estampas.

Localmente ocorrem intercalações e lentes de arenito, aumentando sua frequência para o topo desta associação. Contém vegetais fósseis nos argilitos.

2.1.3. Sedimentos Pós-Barreiras

O termo Pós-Barreiras foi aplicado por SÁ (1969) para descrever os sedimentos inconsolidados sobrejacentes aos Barreiras.

São constituídos por sedimentos areno-argilosos mal selecionados, de granulometria fina contendo grânulos e até seixos de quartzo dispersos; estruturas sedimentares são raras, apresentam apenas algumas de dissipação de dunas eólicas, em direção a porção litorânea.

O contato com os sedimentos Barreiras é erosivo, marcado por blocos de arenitos ferruginosos e seixos de quartzo.

Foram depositados em ambiente subaéreo principalmente, por processos de dissipação de dunas eólicas e fluxos gravitacionais.

2.1.4. Sedimentos Atuais

São constituídos por acúmulo de seixos, areias, siltes, argilas geralmente lenticulares, proveniente da desagregação das demais unidades da região, formando os depósitos de colúvios, elúvios e terraços aluviais.

Tabela 1 – Coluna estratigráfica proposta por ROSSETTI *et al.* (1989) da região NE do Pará.

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO GERAL
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	SEDIMENTOS ATUAIS	Areias quartzosas de granulometria fina a média, distribuídas na orla litorânea, leitos de rios e igarapés; cascalhos fluviais; argilas e siltes ligados a manguezais.
		PLEISTOCENO	SEDIMENTOS PÓS-BARREIRAS	Sedimentos inconsolidados areno-argilosos a argilo-arenosos, amarelados a avermelhados, com grânulos de quartzo e blocos de arenito ferruginizado.
	TERCIÁRIO	MIOCENO-PLIOCENO	SEDIMENTOS BARREIRAS	Sedimentos siliciclásticos que constituem argilas, siltes, arenitos e ocasionalmente conglomerados, de cores variegadas e comumente ferruginizados. Portadores de vegetais fósseis, tubos de Ophiomorphas e estruturas sedimentares primárias.
		OLIGOCENO-MIOCENO	FORMAÇÃO PIRABAS	Calcários micríticos, bioclásticos, biohémicos, dolomicríticos, as vezes com folhas cinza-esverdeadas e margas intercaladas, com variado e abundante conteúdo fossilífero.

2.2. ESTRATIGRAFIA LOCAL

As descrições a seguir foram elaboradas a partir de dados de subsuperfície (amostras de calha) de SOARES (1984) e PONTES (1998) e dos dados superficiais de FARIAS *et al.* (1992), sendo estes últimos autores referentes apenas aos sedimentos Barreiras, Pós-Barreiras e atuais, aflorantes na região de Belém e cujo mapa geológico é mostrado na Figura 2. A síntese da descrição de SOARES (*op cit.*) e PONTES (*op cit.*) estão na Tabela 2 e na Figura 3, respectivamente.

2.2.1. Formação Pirabas

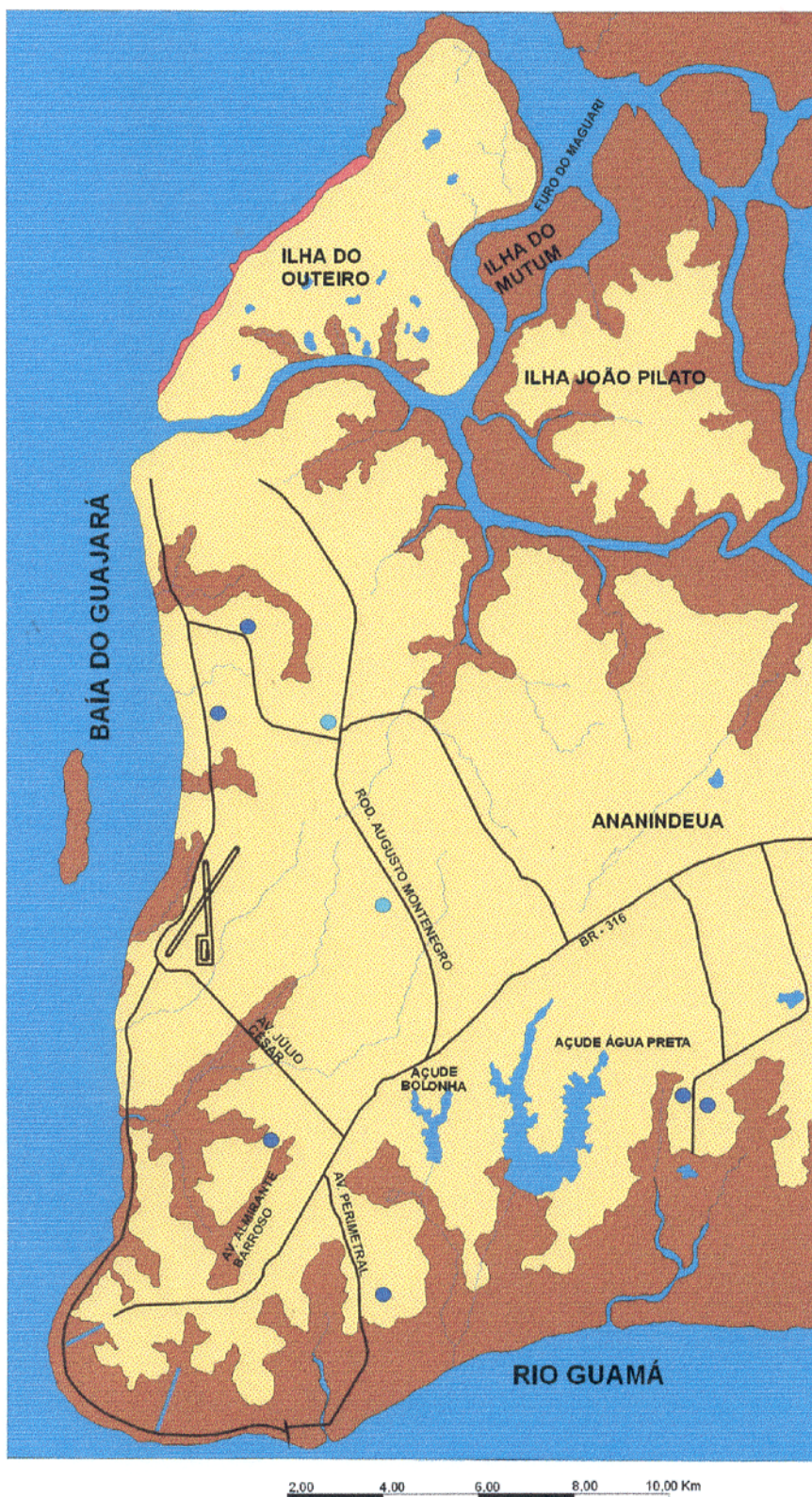
É composta por argilas, areias, conglomerados e calcários, tendo espessura e composições variadas.

As argilas são esverdeadas, cinzas, cinza esverdeadas e esbranquiçadas. Possuem níveis intercalados ou frações de areias finas a grossas e conglomerados. Nesta região a presença de argila e conglomerado juntos é de difícil ocorrência. Isto demonstra a problemática da metodologia de amostras de calha.

As areias são esbranquiçadas e cinzas de tons variados, de granulometria variando de fina a grossa ou de média a grossa ou muito grossa e, ocasionalmente conglomerática, geralmente mal selecionada. A forma dos grãos varia de subarredondada a bem arredondada. Também possuem intercalações e frações argilosas e conglomeráticas. Nas areias argilosas ocorrem, por vezes, fósseis de briozoários, espinhos de equinodermas e fragmentos de conchas.

Os conglomerados possuem grãos subarredondados a angulosos de coloração cinza esbranquiçada onde a matriz é composta de areia muito grossa, subangulosa a subarredondada. Há níveis conglomeráticos com frações argilosas. Há também conglomerados com provável cimento calcífero.

Ocasionalmente ocorrem calcários de coloração cinza, ricos em fósseis; e calcarenitos de coloração creme amarelado pouco argilosos.



CONVENÇÕES

GEOLÓGICAS

QUATERNÁRIO PLEISTOCENO (?) – PÓS BARREIRAS: SEDIMENTOS CONSTITUÍDOS POR AREIAS AMARELO – ALARANJADAS, GRANULOMETRIA FINA A MÉDIA MODERADAMENTE SELECIONADA, SEIXOS MILIMÉTRICOS DE QUARTZO LEITOSO ASSOCIADO, CORRESPONDEM A LATOSSOLO AMARELO.



TERCIÁRIO MIOCENO A PLEISTOCENO (?) FORMAÇÃO BARREIRAS: SEDIMENTOS SILICLÁSTICOS, REPRESENTADOS POR ARGILITOS MULTICOLORIDOS E ARENITOS AMARELO-AVERMELHADOS, FERRUGINIZADOS, ESTRATIFICADOS PORTADORES DE "OPHIOMORPHAS", OCASIONALMENTE CONGLOMERADOS.



QUATERNÁRIO PLEISTOCENO (?) – PÓS BARREIRAS: SEDIMENTOS CONSTITUÍDOS POR AREIAS FINAS, CREME AMARELADAS, BEM SELECIONADAS NA BASE, SEIXOS MILIMÉTRICOS DE ARGILA E QUARTZO. POR VEZES BLOCOS DE ARENITOS FERRUGINIZADOS.



QUATERNÁRIO PLEISTOCENO (?) – PÓS BARREIRAS SEDIMENTOS CONSTITUÍDOS SOBRETUDO POR AREIAS BRANCAS A AMARELADAS, DE GRANULOMETRIA FINA BEM SELECIONADA, BIOTURBADA, COM ESTRUTURA DE DISSIPACÃO DE DUNAS.



SEDIMENTOS HOLOCENO – SEDIMENTOS INCONSOLIDADOS: CONSTITUÍDOS DE AREIAS, SILTES E ARGILAS, DISTRIBUÍDOS NA FAIXA COSTEIRA, LEITOS DE RIOS, IGARAPÉS E MANGUEZAIS.



CARTOGRÁFICAS



COVÕES



CONTATO



ESTRADAS



CANAIS



DRENAGEM PRINCIPAL



DRENAGEM SECUNDÁRIA

FIGURA 2 – Mapa geológico da área região de Belém (obtido de FARIAS *et. al.* 1992).

Baseado no conteúdo fossilífero, o topo da Formação Pirabas ocorre a partir de 76 m no *Campus* Universitário do Guamá – DAGUA – (SOARES 1984), entre 90 e 92 m em Icoaraci - DAICO (LIMA FILHO, 1985) e a partir de 94 m no Museu Paraense Emílio Goeldi – DABEL (CHAGAS, 1990). O Plano Diretor Urbano da Região Metropolitana de Belém considera que o contato entre as duas formações se dá a 100 m de profundidade (PARÁ, 1995). Esta unidade prolonga-se pelo menos até 270 m, onde findam os dados.

2.2.2. Sedimentos Barreiras

Esta unidade é constituída por sedimentos continentais argilosos, arenosos variando até conglomeráticos, pouco consolidados, estratificados, de coloração preferencialmente amarelada e alaranjada e com níveis de arenito ferruginoso. Possui ainda fósseis vegetais e animal, além de possíveis microfraturas e microfalhas e feições romboédricas.

Os argilitos possuem coloração variegada, lilás, vermelha amarelada, creme, cinza e preta. São maciços ou laminados com porções arenosas com nódulos e seixos. Possuem espessuras aparentemente irregulares variando entre 35 cm a 5 m e afloram na ilha do Outeiro. Fósseis vegetais são encontrados nas porções laminadas. Nesta unidade há também estrutura do tipo *wave*, *flaser* e *slumps*.

Os arenitos possuem granulometria variando de fina a grossa com alguns blocos de arenitos ferruginizados apresentando estratificações cruzada acanalada e sigmoidal, e, ainda, ondulações e seixos de argila. Possuem forma de lentes ou lobos, com até 5 m de espessura.

Os conglomerados ocorrem mais localmente e em geral sobrepostos ao argilito maciço através de superfícies erosivas irregulares e descontínuas e com espessura entre 3 e 25 cm. São constituídos por seixos de quartzo leitoso e clastos de argila, subarredondados a arredondados, sustentados por uma matriz argilosa compacta.

A passagem entre os sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras é erosiva, marcado por um nível de seixos subarredondados e angulosos de quartzo leitoso.

Baseando-se nas características sedimentares texturais, estruturais e conteúdo fossilífero, FARIAS *et al.* (1992) dividiram esta unidade em seis fácies: fácies argilosa

maciça, fácies conglomerática, fácies argilosa com laminação plano-paralela, fácies arenosa com estratificação sigmoidal, fácies arenosa com estratificação cruzada acanalada e fácies areno-argilosa.

Tabela 2 - Descrição sintetizada do perfil elaborado por SOARES (1984) de um poço no campus universitário do Guamá - DAGUA.

0 – 28 m	Areia cinza escura com tons avermelhados e amarelados. Na base há restos de vegetais. Há um pouco de areia muito fina e palhetas de muscovita.
28 – 46 m	Sedimentos areno-argilosos, com coloração esbranquiçada e tons avermelhados; possui granulometria variando de fina a média e até grossa a muito grossa.
46 – 56 m	Argila de coloração cinza-avermelhada; há areia muito fina associada.
56 – 66 m	Areia de coloração amarelada, fina a média, subarredondada; há frações de argila.
66 – 69 m	Argila arenosa de coloração cinza clara com tons amarelados; a areia é fina a muito fina com grãos subarredondados.
69 – 76 m	areia argilosa de coloração cinza clara, granulação fina a média, subarredondada a bem arredondada; há restos de vegetais na parte superior.
76 – 84 m	Areia argilosa de coloração cinza clara. Os grãos de areia variam de média a grossa, de subarredondados a bem arredondados, com pirita e palhetas de muscovita. Há muitos fósseis.
84 – 101 m	Argila arenosa de coloração cinza esverdeada clara. A fração arenosa, que ocorre intercalada com a argila, tem os grãos variando de fina a grossa. Ocorrem muitos fósseis.
101 – 104 m	Argila cinza esverdeada clara, sem areia, grãos subarredondados a bem arredondados e poucos fósseis.
104 – 112 m	Areia argilosa de coloração cinza clara, cujos grãos de areia variam de fina a grossa, e de subarredondada a bem arredondada. Nesta porção também poucos fósseis.
112 – 120 m	Argila de coloração esverdeada.
120 – 126 m	Areia argilosa de coloração cinza clara e tons esverdeados, granulação variando de média a fina e forma subarredondada a bem arredondada. Há fósseis presentes.
126 – 135 m	Areia esbranquiçada de granulação variando de média a grossa, subarredondada a bem arredondada. Há fósseis presentes.
135 – 141 m	Areia argilosa esbranquiçada, granulação variando de média a grossa, de forma subarredondada a arredondada. Os fósseis encontrados constam de briozoários, espinhos de equinodermas e fragmentos de concha.
141 – 148 m	Areia cinza clara com tamanho variando de média a grossa e formas entre subarredondada a bem arredondada. Também ocorrem poucos fósseis.
148 – 178 m	Areia argilosa de coloração cinza clara, cujos tamanhos dos grãos de areia variam de fina a grossa e forma subarredondada a bem arredondada. Foram encontrados poucos fósseis.
178 – 191 m	Areia esbranquiçada de granulação média, de forma subangulosa a subarredondada.
191 – 192 m	Areia esbranquiçada grossa a muito grossa, com forma variando de subangulosa a subarredondada contendo uma fração de grânulos.
192 – 196 m	Areia argilosa esbranquiçada, grãos finos a médios, subarredondados contendo grânulos.
196 – 200 m	Areia esbranquiçada, fina a média subarredondada, também contendo grânulos.
200 – 238 m	Areia esbranquiçada, grossa a muito grossa, com grãos subangulosos a subarredondados e níveis de cascalho (2,5 a 5 mm) subangulosos e angulosos.
238 – 250 m	Cascalho com grânulos (3 a 5 mm) subangulosos a angulosos com areia muito grossa, subangulosa e subarredondada.

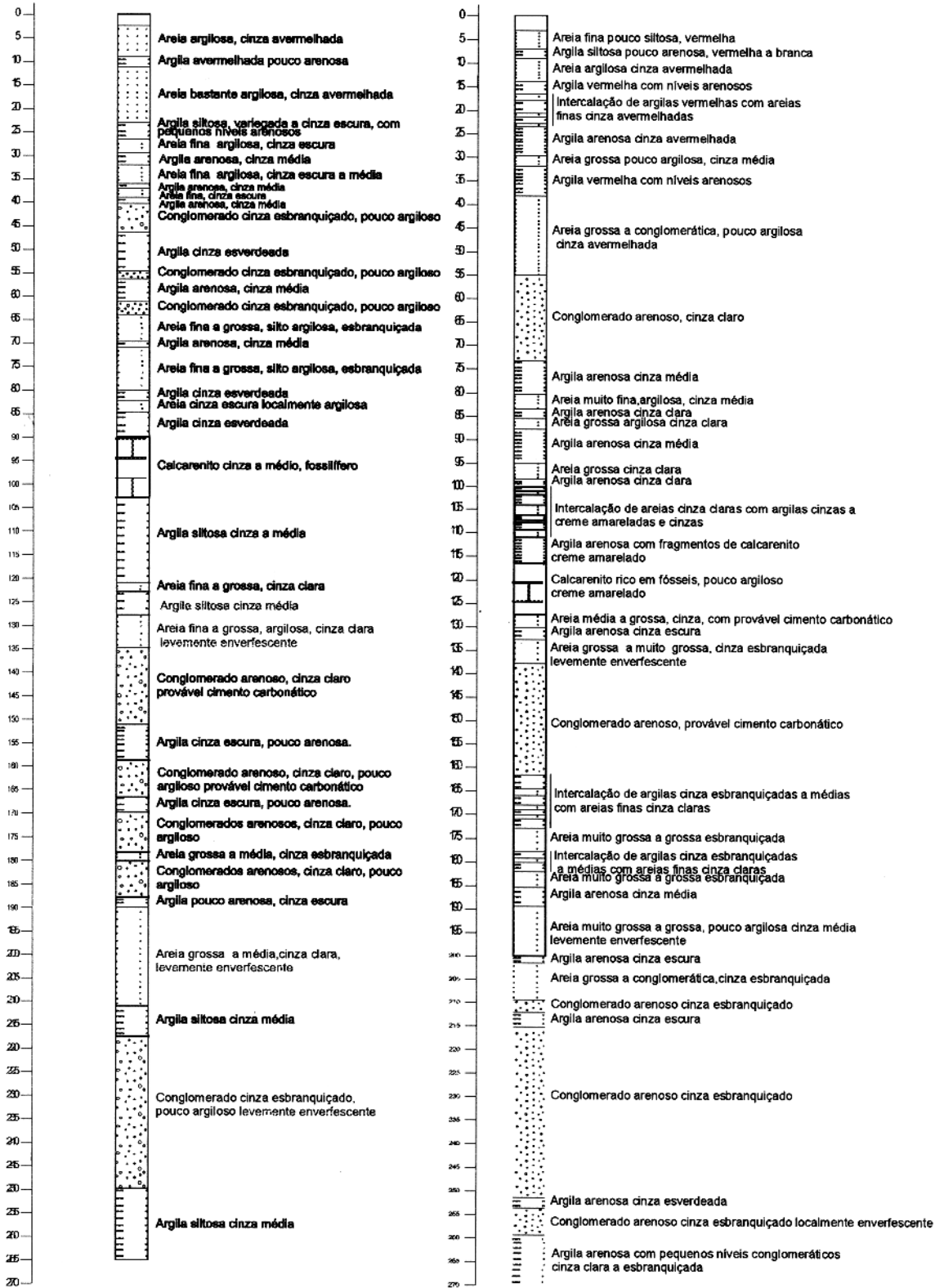


Figura 3 – Poços descritos por PONTES (1998) no Distrito Administrativo de Icoaraci - DAICO.

2.2.3. Sedimentos Pós-Barreiras

São constituídos por sedimentos inconsolidados, basicamente arenosos com granulometria variando de fina a média, de coloração creme-alaranjada e creme-amarelada a branca, com porções argilosas e geralmente sem estruturas (Sá⁴ *apud* FARIAS *et al.* 1992). Possuem grânulos de quartzo leitoso e concreções ferruginosas. Localmente há estruturas de dissipação de dunas. Há, ainda, arenitos ferruginosos de tamanho bloco cuja matriz é areno-argilosa incoesa.

Esta unidade foi dividida em duas fácies: fácies arenito ferruginoso e fácies arenitos diversos.

2.2.4. Sedimentos Atuais

São os sedimentos dispostos ao longo do litoral e vales dos rios e igarapés. São constituídos por areias, siltes e argilas, onde, por vezes, estes aparecem intercalados.

2.2.5. Interpretação Paleoambiental

Segundo FERREIRA (1982) e FERREIRA & FRANCISCO (1988), a Formação Pirabas foi depositada primeiramente em regime de mar aberto com água agitadas e quentes de salinidade normal. Depois passou a depositar em lagos de borda de bacia ou estuário e por fim em ambiente de mangue.

FARIAS *et al.* (*op cit.*), baseando-se nas fácies e no conteúdo fossilífero, concluíram que os sedimentos Barreiras da região de Belém foram depositados em ambiente estuarino. Neste contexto foram gerados os sub-ambientes de planície de maré – caracterizados pelas fácies conglomeráticas, de areia com estratificação sigmoidal e areias com estratificação acanalada com fácies de argila maciça e argila laminada.

⁴ SÁ, J. H. S. 1969. Contribuição a Geologia e os Sedimentos Terciários e Quaternários da Região Bragantina. Bol. Inst. Geol., Rio de Janeiro, 3: 21-36.

ROSSETTI *et al.* (1989), sugerem que os sedimentos Pós-Barreiras foram depositados por movimentos gravitacionais e apresentam, ainda, contribuição de processos dissipativos de dunas eólicas na faixa litorânea.

FARIAS *et al.* (1992) admitem que os sedimentos atuais foram depositados em mangues com alguma influência de canais de maré.

2.3 HIDROGEOLOGIA

Dados de vazão de poços compilados pela CPRM, citados por MUTÓ (1997), demonstram o abastecimento da Região Metropolitana de Belém, em que as águas superficiais contribuem com cerca de 54% e as águas subterrâneas com aproximadamente 46% (Tabela 3). Isto mostra a grande importância atual da água subterrânea para a área aqui em estudo.

PARÁ (1995) descreve os níveis aquíferos que são usados para o abastecimento na região:

- Aquíferos associados ao Quaternário:

Localizam-se até cerca de 20 m de profundidade, são compostos por níveis arenosos de granulometria fina a média, quartzosos, de origem continental. Estes aquíferos possuem pequenas vazões (menores de 20 m³/h) e estão sujeitos a contaminação por serem livres. Possuem pequena continuidade lateral.

- Aquíferos relacionados aos sedimentos Barreiras:

São os mais explorados das região. Constituídos por areias de granulometria variando de fina a média, por vezes grossas, conglomeráticas, quartzosas, de origem continental. Apresentam vazões em torno de 80 m³/h e alcançam profundidades máximas de 100 m.

Suas águas possuem elevado teor de ferro com distribuição irregular, cuja origem se dá pela migração da superfície. Isto implica na necessidade de tratamento por aeração e filtragem.

- Aquíferos relacionados a Formação Pirabas:

Em geral são usados para abastecimento público ou por indústrias.

Tabela 3 - Demonstração do abastecimento da Região Metropolitana de Belém.

ÓRGÃO	LOCALIZAÇÃO	CAPTAÇÃO		VAZÃO (m ³ /h)
		Quantidade	Origem	
COSANPA	UTINGA	01	Superficial	18.000
	FCAP	01	Subterrânea	450
	RODEIO	02	"	400
	SIDERAL	02	"	400
	COQUEIRO	02	"	420
	SATÉLITE	02	"	500
	JADERLÂNDIA	01	"	430
	CIDADE NOVA	03	"	900
	PAAR	01	"	300
	MOSQUEIRO	03	"	400
	SUB-TOTAL	17		4.200
SAAEB	S. ROQUE – ICOARACI	01	Subterrânea	300
	ESCRITÓRIO – ICOAR.	02	"	400
	OUTEIRO	01	"	60
	MOSQUEIRO	02	"	350
	COTIJUBA	02		120
		SUB-TOTAL	09	Subterrânea
OUTROS ÓRGÃO	PETROBRAS	01	"	300
	CERPASA	03	"	900
	UFPA	02	"	250
	MPEG	02	"	100
	CIABA	03	"	300
	DIVERSOS*		"	1.100
		SUB-TOTAL		
POÇOS PARALIZADOS		06		1.800
POÇOS RASOS*		5000		5.000
TOTAL				33.180

Fonte: CPRM – Geólogo Josafá Ribeiro de Oliveira – 1997. Inédito *apud* MUTÓ (1997).

*Valores estimados.

Os corpos aquíferos são formados por areias de granulometria fina, média e grossa e por seixos arredondados e subarredondados de quartzo. Estão intercalados a calcários fossilíferos, argilas, folhelhos, margas e argilitos. Possuem grande extensão lateral e boas espessuras, o que implica no acúmulo de grandes volumes de água com vazões de até 300 m³/h. O pH e os teores de ferro estão dentro dos padrões permissíveis para o consumo humano.

A precipitação pluviométrica da região tem média anual de 2.745 mm (FADESP⁵ *apud* CARVALHO, 1999), o que favorece grandemente a recarga dos aquíferos superficiais e dos sedimentos Barreiras, que são aflorantes na área.

SOUZA & LUIZ (1994), usando dados de perfilagem de geofísica de poço (resistência elétrica, raios gama e potencial espontâneo), e outras informações, consideram as zonas aquíferas da região como:

- Até 50 m de profundidade, sem continuidade lateral, baixas vazões (máxima de 20 m³/h), teor de ferro menor que 0,2 mg/l e pH entre 4,4 e 6,5 (ácido);
- Entre 50 e 80 m de profundidade, boa continuidade lateral, boas vazões (80 a 90 m³/h) e teor de ferro elevado (maior que 1 mg/l) e pH dentro do padrões;
- Entre 100 e 110 m de profundidade, sem informações adicionais; e
- Entre 135 e 195 m e a partir de 205 m de profundidade, com boa continuidade lateral, vazões maiores que 200 m³/h, teor de ferro e pH dentro dos padrões.

⁵ FADESP. 1998. EIA/RIMA - Projeto de Prolongamento da Avenida 1º de Dezembro. Beém, Universidade Federal do Pará.

3. FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPREGADOS

INTRODUÇÃO

Para identificar os aquíferos da região, usou-se Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e perfilagem geofísica de poço. O primeiro procura reconhecer os aquíferos através de suas resistividades características. O segundo, busca identificar tais zonas através de sua resistência elétrica, do potencial espontâneo e dos raios gama naturais emitidos pelas formações. A SEV é empregada por ser uma técnica consagrada na prospecção de água subterrânea, além do baixo custo empregado em seu levantamento. A perfilagem geofísica de poço é utilizada por ser uma técnica de detalhamento limites de aquíferos nos poços e ainda por haver um banco de dados disponíveis da região de Belém e proximidades no Departamento de Geofísica (DGf) da UFPA.

3.1. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL - SEV

Este método é baseado no cálculo de resistividade (ρ), obtida a partir da medida de corrente elétrica e diferença de potencial entre diferentes pontos do terreno. A equação para o referido cálculo é obtida em ORELLANA (1982) como segue.

Consideremos o fluxo de uma corrente contínua ou alternada de muito baixa frequência, que se possa desprezar a corrente de deslocamento, em um meio homogêneo, ilimitado e isotrópico, seguindo a lei de Ohm:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.1)$$

onde a densidade de corrente \mathbf{J} (A/m^2) em um ponto tem a mesma direção e sentido que o campo elétrico \mathbf{E} (V/m) no mesmo ponto e ambos são proporcionais. A constante proporcional é a condutividade σ (S/m).

Sabemos que o campo elétrico é conservativo e irrotacional, visto que deriva de um potencial escalar V (volts):

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (3.1)$$

Então,
$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla V \quad (3.2)$$

Em todos os pontos a equação da continuidade será válida

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.3)$$

onde q é a densidade de carga, da qual se deduz que

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.4)$$

Assim:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (3.5)$$

ou

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = \nabla \sigma + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (3.6)$$

Dentro de cada zona de condutividade uniforme ocorre $\nabla \sigma = 0$. Sendo assim:

$$\nabla^2 V = 0. \quad (3.7)$$

que é a equação de Laplace, válida em todo semi-espaco condutor, exceto nos eletrodos.

No semi-espaco inferior ao eletrodo, \mathbf{J} será constante. A integral de \mathbf{J} sobre a superfície semi-esférica será igual a I . Se o raio é r , teremos:

$$2\pi r^2 J = I \quad (3.8)$$

e assim,

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.9)$$

onde

$$|\mathbf{E}| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (3.10)$$

A diferença de potencial entre dois pontos quaisquer é:

$$\Delta V = -\int_N^M \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (3.11)$$

O caminho da integração é indiferente, pois o campo é conservativo; sendo r e $r + a$ as distâncias respectivamente de M e N ao eletrodo A, temos (Figura 4):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \int_r^{r+a} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{a}{r(r+a)}. \quad (3.12)$$

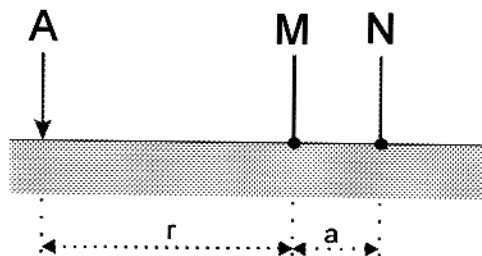


FIGURA 4 – Dispositivo geral de medida.

Então:

$$\rho = 2\pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad (3.13)$$

Simplificando:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}. \quad (3.14)$$

Onde k é um coeficiente dependente apenas do arranjo dos eletrodos.

Esta equação é válida para um meio homogêneo, o que não ocorre com o subsolo. Então a resistividade medida é chamada de resistividade aparente ρ_a .

Para o caso geral, a disposição dos eletrodos de corrente A e B torna a diferença de potencial medida entre os eletrodos M e N da seguinte forma:

$$\Delta V = \frac{I\rho_a}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (3.15)$$

O k será dado por:

$$k = 2\pi \frac{1}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}. \quad (3.16)$$

O eletrodo B é colocado a uma distância simétrica em relação a "O" (ver Figura 5), temos a partir de (3.13):

$$\rho_a = \pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I}. \quad (3.17)$$

Ou então:

$$\rho_a = \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{aI}. \quad (3.18)$$

Esta seria a equação geral para dispositivos lineares simétricos.

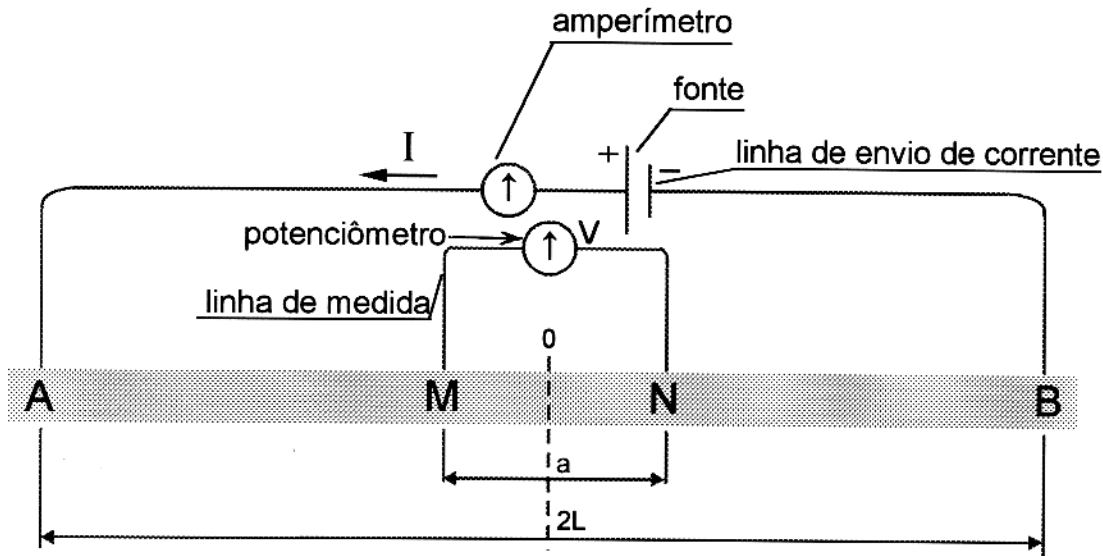


Figura 5 – Dispositivo de medida do método de eletrorresistividade (arranjo Schlumberger).

Arranjo Schlumberger

Para o arranjo Schlumberger, a distância $a \rightarrow 0$ se comparada a $2L$.

$$\rho_a = \lim_{a \rightarrow 0} \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{aI} = \pi L^2 \frac{1}{I} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \pi L^2 \frac{E}{I}. \quad (3.19)$$

O limite de $\frac{\Delta V}{a}$ quando $a \rightarrow 0$, é o gradiente do potencial, ou seja, o campo elétrico.

Desta forma considera-se correta a equação:

$$\rho_a = \pi L^2 \frac{\Delta V}{aI}. \quad (3.20)$$

Ao desprezar $\frac{a^2}{4}$, introduz-se um erro, mas muito pequeno para $MN \leq \frac{AB}{5}$:

$$\varepsilon \leq \frac{L^2 - \left(L^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{L^2} = \left(\frac{a}{2L}\right)^2 = 4\%, \text{ para } MN = AB/5. \quad (3.21)$$

Pela imprecisão das medidas de campo, este erro é tolerável e atribuído ao ruído geológico.

Medida com o arranjo Schlumberger

O dispositivo de medida é composto de dois eletrodos de corrente (metálicos, designados por A e B) conectados por cabos a uma fonte de corrente elétrica contínua ou alternada de baixa frequência disposta em série a um amperímetro. Dois eletrodos de potencial (designados por M e N), são conectados em série a um voltímetro. Assim, montam um quadripolo, mostrado na Figura 5.

O uso do equipamento de corrente contínua ou de baixa frequência evita o acoplamento eletromagnético que ocorre ao usar altas frequências. Este efeito corresponde ao decréscimo da corrente elétrica com a profundidade e é tão maior quanto a condutividade do terreno e a frequência da corrente empregada, o que implica na diminuição da profundidade de investigação (ORELLANA, 1982).

Como mencionado anteriormente, para o arranjo Schlumberger a distância entre A e B deve ser bem maior do que a de M e N e ambos afastados simetricamente em relação a um ponto central de forma que MN tenda a zero quando comparada a AB a partir do deslocamento que sofrem.

Na prática, a partir de determinado deslocamento dos eletrodos de corrente a sondagem é ineficiente pois os valores de potencial são muito baixos, diminuindo bastante a precisão. Usa-se então um artifício chamado de "embreagem": os dois últimos pontos de medida dos eletrodos A e B são repetidos para nova posição de M e N. Em geral, após a embreagem, há uma descontinuidade da curva, o que deve ser corrigido quando da interpretação da mesma.

- Trabalho de Campo:

O trabalho de campo deve ser sistemático e com algumas atitudes prévias que conduzem a um levantamento correto.

Os cabos usados devem ser marcados de acordo com as distâncias a serem colocados os eletrodos de corrente (cabos A e B) e de potencial (cabos M e N). A escolha dos espaçamentos deve permitir que os pontos fiquem regularmente espaçados na escala logarítmica (escala em que se representa a curva). Também devem possuir de seis a dez pontos em cada década para uma boa definição da curva (LUIZ & SILVA 1983). A Figura 6 mostra o exemplo de uma caderneta de campo.

A curva da SEV deve ser produzida ponto a ponto de medida durante o trabalho de campo, com vistas a evitar qualquer imperfeição do levantamento pois a curva deve ser suave. Qualquer problema no comportamento da curva, refaz-se a medida.

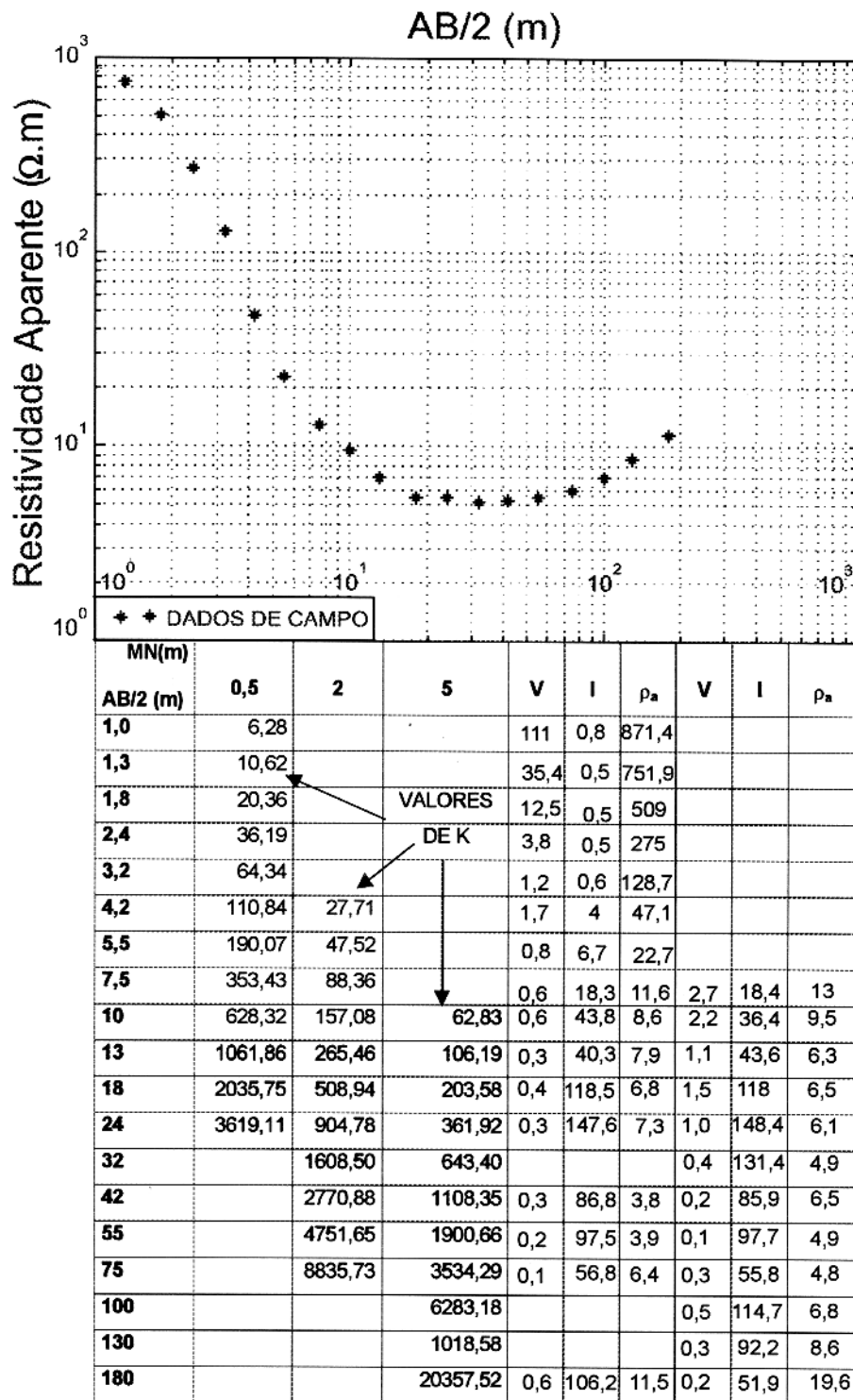


Figura 6 – Exemplo de uma caderneta de campo com AB/2 máximo igual a 180 m (K: constante geométrica; V: diferença de potencial medida (em mV); I: corrente injetada medida (mA); e ρ_a : resistividade aparente calculada (em $\Omega.m$)).

- Técnicas de Interpretação:

A interpretação tem por objetivo fazer com que os dados geofísicos tenham sentido geológico.

A interpretação pode ser qualitativa, semi-quantitativa e quantitativa. Nas duas primeiras, objetiva-se obter, respectivamente, relações de igualdade/não-igualdade e relações de desigualdade entre certas características das medidas geofísicas com o intuito de associá-las a algum significado geológico. Na interpretação quantitativa podemos criar modelos da subsuperfície que permitam coincidir os valores de resistividade aparente calculada com a curva dos dados observados. Esta forma de interpretação utiliza os métodos comparativos direto e inverso (LUIZ & SILVA, 1983).

Interpretação Quantitativa dos Dados

Método Direto

No método direto de interpretação são calculados os valores de resistividade aparente a partir de um modelo interpretativo e comparados visualmente os valores calculados com os obtidos no campo. Assim, modificamos os parâmetros do modelo até conseguir um ajuste satisfatório entre as curvas. O modelo teórico considerado é formado por n camadas paralelas, horizontais e os parâmetros que os formam são as resistividades e as espessuras das camadas.

O cálculo das resistividades é feito usando o programa EGSLIB/SEV1D desenvolvido por RIJO (1994a), que implementa o algoritmo apresentado por GONZALEZ & RIJO (1991). Para um dado modelo de camadas com espessuras h_i , $i=1, \dots, n-1$ e resistividades ρ_i , $i=1, \dots, n$, a resistividade aparente calculada em função de $\frac{AB}{2}$ através de:

$$\rho_a = s^2 \int_0^{\infty} R(\lambda, \vec{P}) J_1(\lambda s) \lambda \, d\lambda \quad (3.22)$$

Em que :

ρ_a : resistividade aparente;

\vec{P} : vetor dos valores de resistividade;

λ : variável de integração;

$J_1(\lambda s)$: função de Bessel de primeira espécie, de ordem um;

s : posição de medida de ρ_a .

O núcleo de integração R é dado pela seguinte recorrência:

$$R_i = \rho_1 \frac{R_{i+1} + \rho_i \tanh(\lambda h_i)}{\rho_i + R_{i+1} \tanh(\lambda h_i)}; \quad i = 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.23)$$

Onde:

$$R_N = \rho_N \quad (3.24)$$

Como sabemos, as SEVs são passíveis de ambigüidade, ou seja, vários modelos podem ser ajustados a mesma curva de campo. Para diminuir o número de modelos, introduz-se, sempre que possível, informações *a priori* da geologia na elaboração do modelo, como dados de poços próximos e de perfilagem geofísica. Neste trabalho foram usadas principalmente perfilagens e alguns dados de poços.

Método Inverso

O programa EGSLIB/SEV1DINV (RIJO, 1994b) aplica o algoritmo de GONZALEZ & RIJO (1991) que se baseia no método de LEVENBERG (1944) e MARQUARDT (1963) para calcular, a partir de um modelo inicial, os valores de um conjunto de parâmetros (resistividades e espessuras das camadas) usados para gerar valores de resistividade aparente que são ajustados no sentido dos mínimos quadrados aos dados de campo. O método em questão é um processo iterativo no qual a variação do $\Delta \vec{P}$ do vetor de parâmetros é calculada, em cada iteração, pelo estimador:

$$\Delta \vec{P}_k = (\underline{A}^T \underline{A} + \varepsilon^2 \underline{I})^{-1} \underline{A}^T \Delta \vec{\rho}_a^k, \quad (3.25)$$

em que A é uma matriz, chamada de matriz de sensibilidade, formadas pelas derivadas parciais das resistividades aparentes em relação a cada parâmetro:

$$A_{ij} = \frac{\Delta \rho_i^a}{\Delta P_j}; \quad (3.26)$$

onde ε^2 é o chamado parâmetro de Marquardt, que controla o tamanho do passo dado pelo vetor $\Delta \vec{P}$; I é a matriz identidade e i representa o número de iterações.

O modelo inicial usado é proveniente do método direto de interpretação.

- Formas de Apresentação dos Dados

Os dados são mostrados em gráficos de duas e três dimensões (perfis mapas). Dentre tais diagramas estão os perfis mostrando as curvas das SEVs (variação da resistividade X abertura de eletrodo - Figura 6 e Anexo A), as seções geoeletricas (junção de várias modelos de SEVs unidos lateralmente - Figuras 11, 12, 13 e 14) e mapas de isolinhas (Figuras 15 e 16).

3.2. PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO PARA ÁGUA

INTRODUÇÃO

A perfilagem geofísica é usada em hidrogeologia para determinação da litologia, do topo e base dos aquíferos, correlação estrutural e estratigráfica entre poços vizinhos, indicação de zonas permeáveis ou fraturadas, seleção de intervalos para colocação de filtros, variações texturais das camadas sedimentares, dentre outras aplicações (NERY, 1997). Sendo que a principal é a demarcação dos melhores aquíferos para a colocação dos filtros. Esta atividade possibilita um aproveitamento maior da vazão do poço com um aumento de sua vida útil.

FUNDAMENTOS E SUA APLICAÇÃO NO ESTUDO DE AQUÍFEROS

I - FERRAMENTA DE RAIOS GAMA - RG

Esta ferramenta tem por finalidade identificar litologias a partir de seu conteúdo de minerais radioativos. Os isótopos que propiciam tal característica a estes minerais são, principalmente: K^{40} , U^{238} , Th^{232} .

Segundo NERY (op. cit.), as rochas sedimentares podem ser divididas em três grupos, de acordo com sua radioatividade natural, em:

- Altamente radioativas: folhelhos de águas profundas (formados por lamias de radiolários e globigerinas), folhelhos pretos betuminosos, evaporitos potássicos (carnalita, silvita);
- Rochas mediamente radioativas: folhelhos e arenitos argilosos de águas rasas, carbonatos e dolomitos argilosos;
- Rochas de baixa radioatividade: grande maioria dos carvões e evaporitos não potássicos (halita, anidrita e gipsita) e arenitos limpos.

Esta ferramenta possui um cintilômetro para medir a radioatividade natural. Tal equipamento é baseado na luminescência provocada pela ação das radiações sobre certos materiais sólidos ou líquidos. No equipamento há um cristal de iodeto de sódio ativado por tálio que, ao ser exposto aos raios gama, emite luzes. A fraca corrente

produzida pela luminescência é amplificada e registrada em cps (contagens por segundo).

O potássio natural é um dos oito elementos mais abundantes na crosta terrestre. Apenas 0,012% é K^{40} (NERY op cit). Mesmo assim é o principal responsável pela radioatividade natural nas rochas. Abundante nas micas e feldspatos, seu produto de alteração compõem as argilas e os folhelhos. Urânio e tório são mais raros. O primeiro ocorre mais associado a folhelhos orgânicos e o segundo a minerais pesados.

LIMITAÇÕES

O raio de investigação da ferramenta de raios gama depende da energia do fóton, da litologia, do tipo de detetor, da lama, do diâmetro do poço e das massas específicas das camadas. O que não ultrapassa 40 cm.

A medida de radioatividade é um fenômeno estatístico que segue a Lei de Poisson e assume uma gaussiana para altos valores de contagem. Desta forma, quanto mais tempo o detetor permanecer em frente a uma formação, mais precisa será sua medida. Portanto, caso a velocidade da sonda varie no poço, alguns trechos serão melhor investigados que outros, o que imprime imprecisão ao levantamento.

Arenitos compostos por feldspatos (arcósios) serão indicados como folhelhos. Portanto o perfil produzido por esta ferramenta deve ser comparado a outros para evitar equívocos.

IMPORTÂNCIA NA PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

É um dos melhores indicadores litológicos, sobretudo de rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados. Com isso é possível identificar as unidades permo-porosas;

Auxilia na correlação entre poços vizinhos, contribuindo para avaliar a continuidade lateral dos aquíferos.

II - FERRAMENTA DE POTENCIAL ESPONTÂNEO - SP

A medição do potencial espontâneo (spontaneous potential - SP) em poços é feita na presença do fluido de perfuração (lama), o qual é composto por água, argilominerais e aditivos.

Três formas de potencial são desenvolvidos frente as camadas permo-porosas:

- Potencial Eletrocínético (E_k): ocorre em função da filtragem forçada que a lama sofre e empurra sua parte líquida, o filtrado da lama, para dentro das formações, o que faz com que ocorra um arraste de cargas iônicas. Este potencial é pouco importante pela pequena profundidade que os poços para captação de água alcançam;
- Potencial Eletroquímico de Junção Líquida (E_j): é desenvolvido em função da diferença de concentração iônica entre o líquido filtrado da lama que penetra nas formações e a água contida nestas. O contato entre as duas faz com haja deslocamento de cargas da solução mais concentrada para a menos concentrada. Este é o principal fenômeno responsável pelo potencial espontâneo em poços para captação de água;
- Potencial Eletroquímico de Membrana (E_m): este potencial decorre da estrutura das argilas e/ou folhelhos possuírem cargas negativas em suas superfícies. Quando argilas/folhelhos separam soluções de diferentes concentrações, têm a propriedade de facilitar a passagem dos cátions através de si. Isso permite que o potencial em arenitos limpos seja maior que em arenitos idênticos, porém com argila em seus poros.

A curva do potencial espontâneo para ser observada em sua plenitude deveria ser composta da seguinte forma (NERY, 1997):

$$SSP = E_m + E_j = i(r_m + r_{xo} + r_o + r_{sh}) \text{ (em mV)}, \quad (3.27)$$

onde:

SSP: potencial estático;

i: corrente elétrica produzida pela diferença de concentrações entre as soluções;

r_m : resistência da lama;

r_{xo} : resistência da zona lavada/invadida;

r_o : resistência da zona virgem;

r_{sh} : resistência da camada de folhelho adjacente;

No entanto, limitações operacionais permitem a medição de apenas uma fração do fenômeno total (SSP). Mede-se somente a diferença de potencial ocorrida na coluna da lama de perfuração. Ficando apenas:

$$SP = i \cdot r_m \text{ (em mV)}. \quad (3.28)$$

A situação: $SP = SSP$ só ocorre quando as camadas permo-porosas são bastantes espessas. A Figura 8 mostra a relação entre o SSP e o SP.

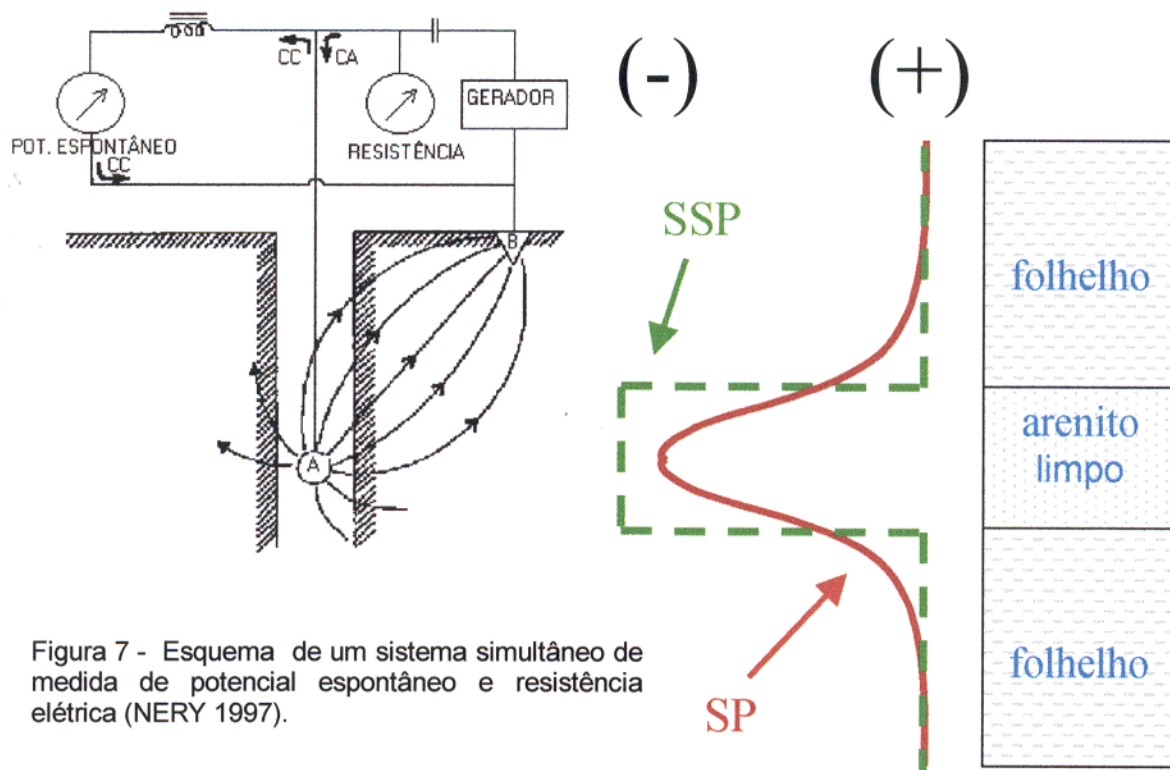


Figura 7 - Esquema de um sistema simultâneo de medida de potencial espontâneo e resistência elétrica (NERY 1997).

Figura 8 - Relação entre o SSP e o SP.

QUALIDADE DA CURVA DO SP

A curva produzida por esta ferramenta tem as seguintes características:

- Frente as camadas impermeáveis: permanece quase retilínea, chamada de linha base dos folhelhos (LBF);
- Frente as camadas permeáveis: a curva apresenta deflexão para a direita se o filtrado da lama for mais salgado do que a água da formação; deflexão para a esquerda se ocorrer o contrário (ver Figura 9). Caso não haja diferença de

concentração entre tais fluidos, a curva permanecerá retilínea (sem deslocamento) como A LBF.

LIMITAÇÕES

Caso a água da formação permo-porosa possua a mesma concentração que o líquido filtrado da lama, a curva não terá deslocamento, indicando ausência de poros. Por isso deve-se interpretar o SP acompanhado sempre de perfis de outras ferramentas.

RUÍDOS

A curva do SP sofre interferência na presença de correntes elétricas induzidas por fontes naturais ou artificiais como: o cabo de aço que reveste o cabo de perfilagem, por magnetização do cabo de perfilagem, peças metálicas próximas ao poço, rede de alta tensão, tempestades magnéticas, transmissões de rádio, etc.

APLICAÇÃO NA PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Contribui na identificação de zonas permeáveis (ELLIS, 1987), as quais estão propensas a conter água.

III - PERFIL DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA - RE

Sabe-se que o fluxo de uma corrente elétrica através de um condutor é diretamente proporcional a diferença de potencial entre os pontos que provocam tal fluxo (lei de Ohm):

$$I \propto \Delta V \Rightarrow r = \frac{\Delta V}{I}, \text{ onde } r \text{ é uma constante de proporcionalidade, a resistência.}$$

Esta, varia de acordo com o material implicado.

I: corrente elétrica (medida em A);

ΔV : diferença de potencial (medida em V);

r: medida em ohm.

Neste método um eletrodo é baixado em um cabo no poço e outro permanece na superfície do terreno. Desta forma mede-se a resistência da coluna de rocha entre os dois eletrodos (Figura 7). A variação das resistências se deve as modificações na

condutividade ocorridas entre o fluido do poço e um pequeno volume de rocha ao redor da ferramenta em subsuperfície. Sendo homogêneo o fluido de perfuração do poço, variações na condutividade ocorrerão devido a modificações litológicas as proximidades do poço.

Areias/arenitos e seixos/conglomerados possuem alta resistência. Isto devido a presença freqüente de quartzo nestas litologias, o qual é mau condutor de corrente elétrica. As argilas e folhelhos possuem baixa resistência. Neste caso é devido a presença de minerais argilosos, que são bons condutores.

Na prática, a corrente emitida é constante, então registra-se a diferença de potencial e converte-se em resistência elétrica através da lei de Ohm.

O mecanismo desta ferramenta é mostrado na Figura 7. Uma corrente alternada é enviada pelo gerador até o eletrodo A, a partir do qual se espalha por todas as direções nas rochas e retorna ao eletrodo B.

O volume de rocha investigado em um meio homogêneo e isotrópico é de 10 vezes o diâmetro do eletrodo A (NERY, 1997). Este sistema funciona como três resistências em série: as resistências dos semi-hemisférios dos eletrodos A e B, a resistência da lama e das rochas que circundam o eletrodo A e as resistências das rochas localizadas a partir daí até o semi-hemisfério do eletrodo B (Guyod⁶ *apud* NERY *op. cit.*).

LIMITAÇÕES

Qualquer aumento na salinidade (devido a composição na lama ou presença de água salgada na formação ou ainda arenitos contendo salmouras) provoca decréscimo na resistência. Isto decorre da facilidade ao fluxo da corrente frente a presença dos íons.

Se as paredes do poço forem alargadas, seja por desmoronamento de camadas arenosas inconsistentes, seja devido a presença de regiões fraturadas, prevalece a medida de resistência da lama. Este problema decorre do volume do material rochoso próximo ao eletrodo A estar mais afastado e o espaço deixado, ser preenchido por lama. Tal problema decorre do pequeno diâmetro do eletrodo A e por conseguinte um

⁶ GUYOD, H. 1952. *Electrical well logging fundamentals*: Houston: WIDCO Co. 164 p..

pequeno raio de ação da ferramenta. Por isso seria melhor usar esta ferramenta acompanhada do caliper para localizar os desmoronamentos.

APLICAÇÕES NA PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Localização e determinação de espessuras de aquíferos, variações litológicas, correlações entre poços.

3.3. INTERPRETAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS

A interpretação sempre é feita utilizando os três perfis juntos. As características acima mencionadas como favoráveis a identificação dos aquíferos e camadas impermeáveis devem ser sempre levadas em conta. A Figura 9 mostra um exemplo dos perfis de RG, SP e RE. Nela estão indicadas as regiões identificadas como aquíferos (AQ. ou simplesmente camadas permo-porosas) e folhelhos (FLH. ou impermeáveis).

Nos aquíferos, o RG é baixo, indicando pouco mineral radioativo, o que entende-se como pouco argilomineral dos folhelhos; o SP desloca-se, indicando que há fluidos nos poros, caso seja para a esquerda, a salinidade da água da formação é maior que a do líquido filtrado da lama, caso seja para a direita a água da formação é menos salgada que o concentrado da lama; o RE é elevado, o que leva a crer que o intervalo observado não possui minerais condutivos como argila, ou seja, provavelmente composto por areia/arenito limpo. Nos folhelhos o RG é elevado, o SP não se desloca e o RE é baixo.

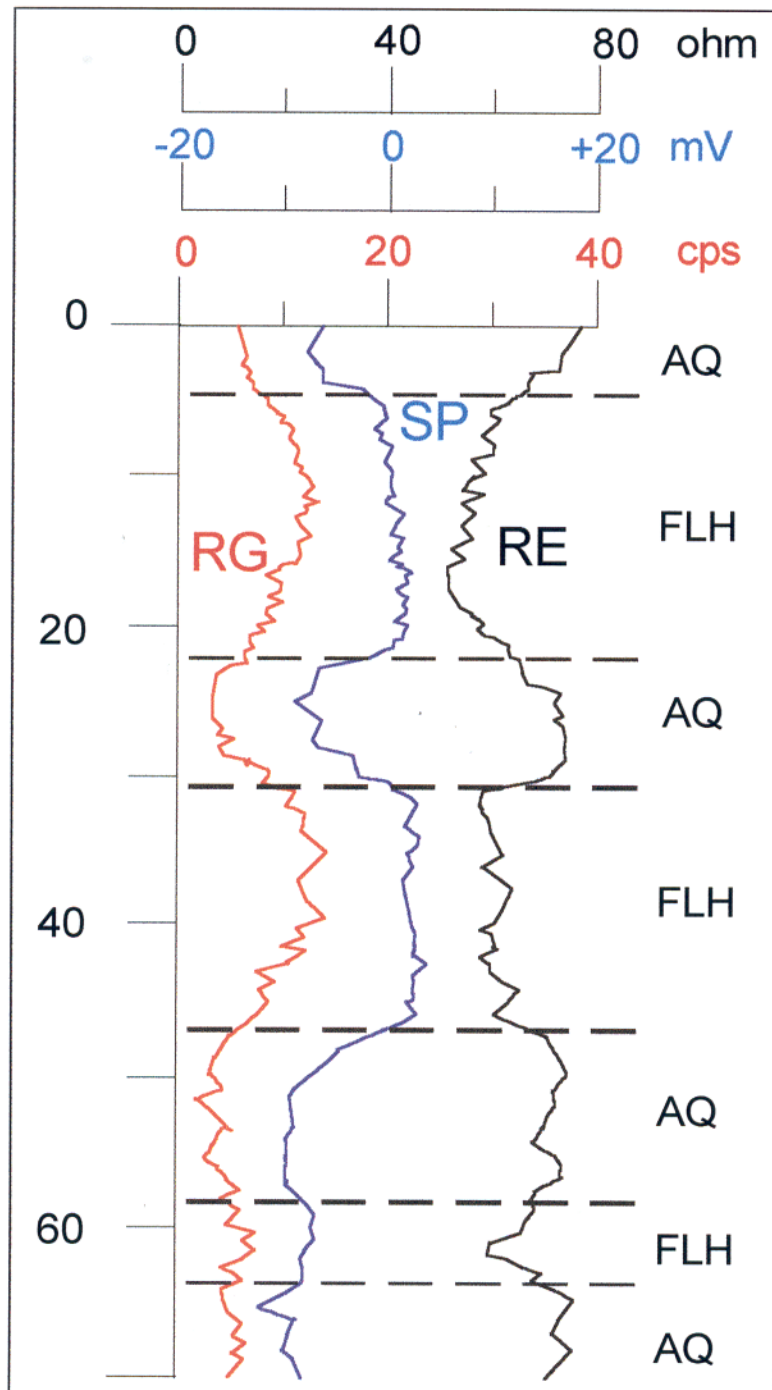


Figura 9 – Exemplo dos perfis de RG, SP e RE e a interpretação destes.

3.4. RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS GEOELÉTRICOS E HIDROGEOLOGÍCOS

As propriedades geoeletricas comumente são relacionadas as propriedades dos aquíferos. Isto se deve a semelhança com que se comportam a corrente elétrica e o fluxo da água. Isto é melhor explicado comparando as leis de Ohm e de Darcy (ver quadro abaixo).

	DENSIDADE	CONDUTIVIDADE	GRADIENTE DE POTENCIAL
$J = \sigma E$ (lei de Ohm)	J , de corrente	σ , Elétrica	E , Elétrico
$V = Ki$ (lei de Darcy)	V , de descarga	K , Hidráulica	i , Hidráulico

Partindo dessa semelhança matemática das leis podemos relacionar o parâmetro geoeletrico resistência transversal (R) e um dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos, a transmissividade (T). Esse parâmetro nos permite avaliar o potencial quantitativo dos aquíferos.

A transmissividade corresponde a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Ou seja, é a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário (CABRAL, 1997).

Para aquíferos confinados, a transmissividade é dada por:

$$T = Kh \quad (3.29)$$

onde:

T: transmissividade;

K: condutividade hidráulica; e

h: espessura do aquífero.

A constante condutividade hidráulica (K), também vista na lei de Darcy, é uma característica intrínseca do aquífero e depende da porosidade, do tamanho, distribuição e forma das partículas, bem como das características do fluido (viscosidade e massa específica).

SRI NIWAS & SINGHAL (1981) relacionaram analiticamente a transmissividade (T) e a resistência transversal (R), usando dados de KELLY (1977).

$$R = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i \quad (3.30)$$

$$T = \sum_{i=1}^n h_i K_i \quad (3.31)$$

Simplificando:

$$R = hp \quad (3.32)$$

$$T = hK \quad (3.33)$$

Sabendo que $\sigma = \frac{1}{\rho}$

Então:

$$T = K\sigma R \quad (3.34)$$

Para determinar T, seria então necessário, além de R, conhecer o produto $K\sigma$. KELLY (op cit) estabeleceu uma relação linear entre K e ρ . Isto é, a condutividade hidráulica aumenta linearmente com o aumento da resistividade elétrica ou para regiões com o mesmo ambiente geológico e qualidade de água, $K\sigma$ é constante. T, então, dependeria apenas de R.

Os valores de $K\sigma$ da região podem ser determinados a partir de testes de bombeamento de poços. No entanto, como T e R são diretamente proporcionais, as medidas de R são indícios dos valores de T. Neste trabalho não foi possível obter valores de T da região por falta de disponibilidade de dados de bombeamento.

Os mapas de resistência transversal seriam comparados a possíveis diferenças dos conjuntos de valores de transmissividade (SCARASCIA, 1976). Ou seja, a partir das medidas de resistividade, pode-se inferir que a porosidade subsequente pode indicar quantidade de água contida nos aquíferos é tão maior quanto maior for R. Com esse objetivo, mapas de resistência transversal (R) obtidos através de SEVs são apresentados nas Figuras 15 e 16.

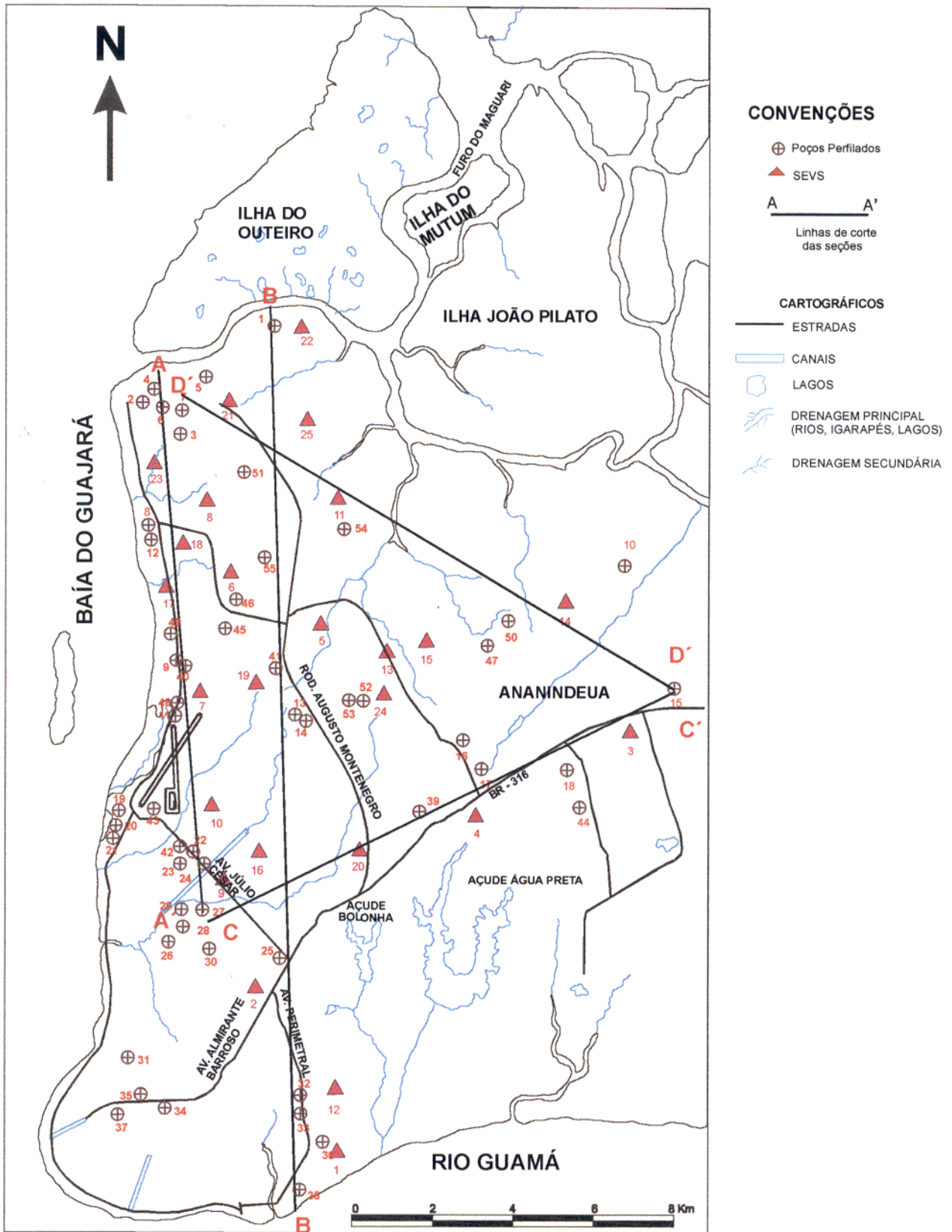
4. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

4.1. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL - SEV

A aquisição das sondagens elétricas verticais em meio urbano dificultou bastante a realização das mesmas. Foram grandes as dificuldades em encontrar locais não asfaltados (para cravar eletrodos) com pelo menos 600 m de extensão em linha reta, sem cruzamentos de vias ou com cruzamentos pouco movimentados (com poucos automóveis e/ou transeuntes). Isso fez com que a malha das SEVs seja bastante irregular (ver Figura 10). Para evitar ambigüidade deve-se escolher locais com ausência de variações geológicas laterais, o que não foi possível fazer pois a maioria dos locais já recebeu aterro ou asfalto. Caso ocorram variações geológicas laterais, como admitido por FARIAS *et al.* (1992), o problema da ambigüidade poderá ocorrer visto que a SEV tem como premissa o modelo de n camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas e, portanto, pode levar a erros nas interpretações (GONZALEZ, 1984). Como o meio é urbano, não se pôde escolher locais que permitam a abertura de eletrodos sempre na mesma direção. Isso dificulta que SEVs consecutivas possam investigar as mesmas seqüências.

O método de sondagem elétrica não consegue separar camadas muito delgadas, portanto o valor de resistividade aparente deve ser entendido como uma média dentro de um pacote que pode não ser homogêneo. Se uma porção do terreno tem elevada resistividade, deve-se considerar que o pacote referido pode possuir não somente camadas de areia grossa, por exemplo, mas também de finos e até pelitos, porém estes em menor quantidade. O contrário também pode ocorrer. Ou seja, um pacote argiloso de resistividade baixa pode possuir camadas mais delgadas de altas resistividades de material mais grosso ou médio (areia, seixo, etc). Deve-se lembrar que na SEV o valor de resistividade aparente é função do volume de material investigado.

Foram realizadas 25 SEVs com aberturas máximas de $AB/2$ variando entre 130 m e 500 m, sendo que muitas vezes o equipamento não obtinha boas respostas a aberturas superiores a 300 m, devido a instabilidade nos valores de potencial, e as vezes até menos que isso, o que impede a total confiança para investigações com aberturas superiores a este valor.



O equipamento usado foi o resistivímetro de modelo R100-A, construído pela Geotest Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos, cuja potência nominal de saída é de 100 W. O intervalo de leitura de potencial varia de 0,1 a 199,9 mV e o valor máximo de corrente é de 200 mA, tendo como fonte uma bateria de 12 V de automóvel.

O processamento seguiu as etapas descritas no Capítulo 3: ajuste da curva observada, para corrigir embreagens e ruídos geológicos; interpretação quantitativa, primeiramente pelo método direto, cuidando para que o resultado deste tenha menor ambigüidade possível, e para tanto, foi introduzido principalmente dados de perfilagem geofísica de poço como informação *a priori* para que o resultado seja o mais próximo da realidade geológica, e posteriormente fez-se a inversão destes para que se obtivesse um refinamento dos modelos.

A profundidade de investigação é variada tanto em função da abertura dos eletrodos quanto da presença de camadas condutivas, muitas vezes com grande espessura (cerca de 70 m), que impedem a passagem da corrente às porções subjacentes.

As curvas das sondagens produzidas são mostradas no Anexo A.

4.2. PERFILAGENS DOS POÇOS

Foram levantadas 55 perfilagens geofísicas de poços com profundidades variadas (mínima de 30 e máxima de 295 m) na região de Belém realizadas pelo Departamento de Geofísica (DGf) da Universidade Federal do Pará como prestação de serviços. Isso explica o porquê da malha ser bastante irregular (ver Figura 10). Para facilitar o manuseio e análise dos dados, os perfis foram digitalizados e são mostrados no Anexo 2. Os equipamentos utilizados para as perfilagens foram o 1000 – C da MOUNT SOPRIS e o WIDCO MODEL 1200, ambos analógicos com capacidade para perfilar até 400 m e combinam RG, SP-RE. A sonda usada pelo perfilador 1000 – C da MOUNT SOPRIS é a G375/A combinada de RG, SP-RE. As medidas dos raios gama são de 5 cps a 5 Kcps. As faixas de medidas de SP são de 2 mV/divisão até 100 mV/divisão e resistência (RE), 2 ohm/divisão até 100 ohm/divisão (RE). O perfilador WIDCO 1200 usa duas sondas separadas. Uma para raios gama e suscetibilidade

magnética (não é usado) e outra para SP-RE com faixa de unidade similar ao do perfilador 1000 – C da MOUNT SOPRIS.

As interpretações das curvas seguiram os princípios descritos no Capítulo 3. Nos aquíferos com água doce: RG é baixo, SP desloca-se para a esquerda (potencial negativo) e o RE é elevado, indicando presença de zonas resistivas, como areia/arenito com água doce. Nos folhelhos, o RG é elevado, o SP não é deslocado e o RE é baixo.

Caso o aquífero esteja com água salobra, a curva do SP desloca para a direita (potencial positivo), a RE é baixa e valores de raios gama se mantêm baixos.

5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SEÇÕES GEOELÉTRICAS

As seções geoeletricas foram confeccionadas usando principalmente os dados de perfilagem geofisica. Isto se deve a dois fatos: primeiro, a inversão dos dados das SEVs foi realizada usando o modelo 1D, o qual não é adequado pois a geologia da área não possui continuidade lateral das camadas; e segundo, a malha de investigação é bastante irregular e esparsa. Por isso os dados de SEV são limitados.

As SEVs fornecem informações da resistividade aparente de um grande volume de material em subsuperfície dependendo da abertura dos eletrodos de corrente. As seções geoeletricas são interpretações bidimensionais de um conjunto de informações unidimensionais, que são as SEVs. A extrapolação lateral tem base no modelo de n camadas horizontais homogêneas e isotrópicas.

Ao relacionar um horizonte geoeletrico com continuidade entre duas ou mais sondagens, tem-se em mente que o modelo deposicional permite que isso seja possível. Ou seja, o conhecimento geológico deve ser respeitado. Então deve-se considerar não apenas parâmetros geofisicos mas também a geologia em questão. As unidades geoeletricas são regiões com suas subunidades de resistividades similares entre as quais são colocadas linhas de correlação. Extrapolando para a geologia real, os horizontes geoeletricos separam supostos horizontes geológicos, que na verdade são especulações bem orientadas.

As seções não estão levando em conta a topografia, visto que essa não se torna relevante em uma região com desniveis modestos.

5.2. SEÇÕES

As seções litológicas interpretadas da área são mostrados nas Figuras 11, 12, 13 e 14 as quais são constituídas com base em dados geoeletricos e perfilagens de poços. Durante a confecção de tais seções, foram levados em consideração o conhecimento geológico da região descrito no Capítulo 2: a parte superior como sendo de ambiente estuarino e a inferior de mar raso.

Nas regiões superiores de tais seções, as sondagens definiram horizontes geoeletricos em geral bastante espessos, visto seu baixo poder de resolução. Já as perfilagens definiram camadas mais finas dentro de tais horizontes.

Nas regiões inferiores, onde as SEVs não alcançam, usou-se apenas as perfilagens.

As seções foram distribuídas ao longo da área de modo que se possa obter o maior número de SEVs e poços perfilados possíveis em direções que contribuíssem para o entendimento da área.

Nas seções pode-se perceber características gerais como a sucessão de unidades geoeletricas com baixa e alta resistividade. Tal variação se dá inclusive em ordem de grandeza. Assim, em termos gerais, foram classificados tipos litológicos: argila/argilito/folhelho de baixa resistividade e areia/arenito de alta resistividade. Do ponto de vista hidrogeológico, essas unidades correspondem, respectivamente, a camadas porosas mas impermeáveis, e por isso não permitem a transmissão de água, e a camadas permo-porosas, que são os aquíferos.

A seção **AA'** (Figura 11) atravessa a área na direção N-S paralelamente à margem da baía do Guajará e próximo a esta (ver Figura 10). É composto pelas SEVs 23, 08, 18, 17, 07, 10 e as perfilagens dos poços 06, 03, 12, 49, 9, 48, 11, 42 e 27. A seção **BB'** (Figura 12) também atravessa a área com direção relativamente N-S, mas um pouco mais ao centro desta e é formado pelas SEVs 22, 25, 05, 19, 16, 02, 12 e 01 e as perfilagens dos poços 51, 55, 46, 45, 41, 13, 14, 25, 32, 36 e 38. A seção **CC'** (Figura 13) é composto pelas SEVs 02, 20, 04 e 03 e pelas perfilagens dos poços 27, 25, 39, 17 e 15. Esta seção está posicionada no centro-sul da área, com direção NE-SW. A seção **DD'** (Figura 14) está posicionado na porção centro-norte, com direção

NW-SE e é constituído pelas SEVs 21, 25, 11, 14 e 03 e as perfilagens dos poços 06, 03, 05, 51, 55, 47, 50 e 15.

Em termos gerais, considera-se que materiais pelíticos (argila/argilito ou folhelho), os quais são compostos por argilominerais, possuem resistividade até 50 Ω .m. Valores superiores a este referem-se a areia, grânulo, seixo, em geral de quartzo, sendo tais valores tão maiores quanto seu tamanho. No entanto, percebe-se que valores intermediários correspondem a seqüências compostos por variações entre pelitos e areias, como na SEV 20 vista na seção **CC'**.

Muitas vezes, unidades geoeletricas com baixas resistividades, tipicamente de argila ou folhelho, estão lado a lado a unidades com resistividades médias a elevadas, que caracterizam areias ou conglomerados. Além disso, as espessuras são variadas. Isso implica em dizer que os estratos têm sua continuação lateral interrompida, o que induz a inferir interdigitação ou gradação lateral que resultaria em resistividades variadas à mesma profundidade.

Nas seções são vistas seqüências de corpos sedimentares arenosos e pelíticos, muitas vezes interdigitados. A forma de lente também é muito freqüente, com dimensões nada uniformes. As espessuras variam entre dezenas de metros.

Em geral, o topo das seções é composto por um conjunto de resistividades bastante variadas em função da lixiviação, produto do forte intemperismo da região, que descaracteriza as unidades superficiais e gera um solo de espessura bastante variada. Por isso foram agrupadas em apenas uma unidade geoeletrica.

Os resultados das SEVs dificilmente se correlacionam, mesmo possuindo ou não profundidades de investigação semelhantes.

Os valores de resistividade e espessura obtidos após a interpretação de cada SEV são mostrados na Tabela 4.

Verificando as seções **AA'** e **BB'**, vê-se que somente a partir de 160 m a correlação é contínua ao longo de todo o perfil. Nesta porção, a composição é predominantemente arenosa com intercalações argilosas.

A seção **CC'** possui apenas 3 poços profundos (27, 39 e 17, com 265 m, 285 m e 200 m, respectivamente), separados por vários quilômetros e assim mesmo apresentam

continuidade lateral a partir de 170 m de profundidade, onde prevalece a composição arenosa com níveis argilosos.

Na seção **DD'** há mais poços profundos (260 a 285 m) e é possível avaliar melhor a continuidade lateral dos corpos sedimentares em profundidade, que ocorre no mesmo limite e possui mesma composição da seção anterior.

Na seção **AA'** os estratos acima de 160 m são correlacionáveis, mas apenas localmente, como entre os poços 42 e 27, de 50 a 80 m de profundidade, aproximadamente. Na seção **BB'** os poços 41, 13 e 14 são quase totalmente correlacionáveis, mas são poços muito próximos. Na seção **CC'** entre os poços 27 e 25, de 23 a 65 m também tem correlação lateral. Nota-se que tais casos ocorrem geralmente entre poços contíguos, o que mostra que nesta porção a correlação lateral é limitada.

Estas seções mostram elementos que foram projetados lateralmente de distâncias variadas (até quilométricas) para uma única linha. Por isso, alguns valores de resistividade, como 246 Ω .m na SEV 02 (Figura 12), são elevados para uma porção argilosa da seção, assim como valores muito baixos, como 15 Ω .m na SEV 19 (Figura 12), em uma porção arenosa.

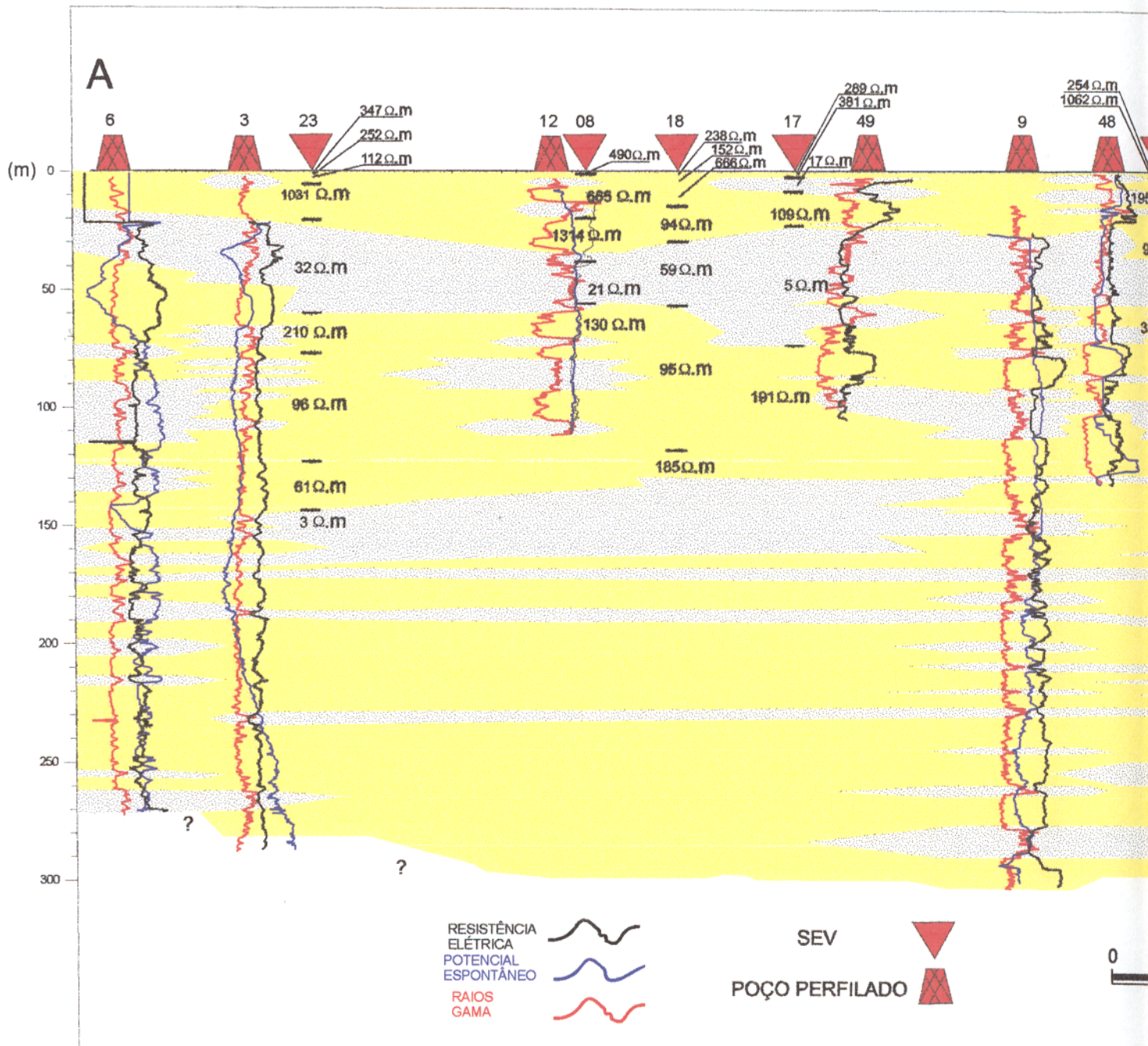
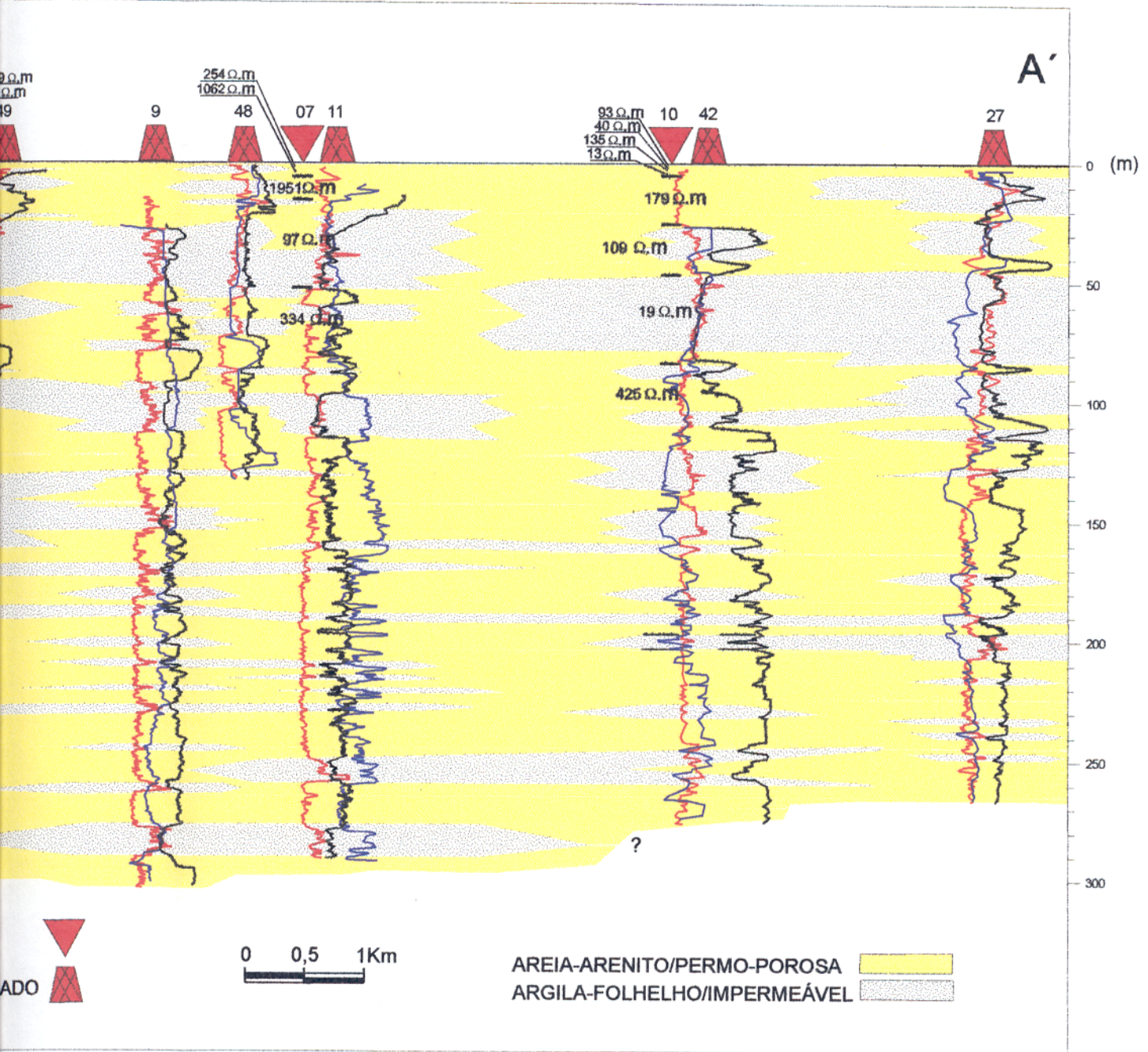


FIGURA 11 - Seção geológica interpretada AA'. Atravessa



geológica interpretada AA'. Atravessa a área na direção N - S.

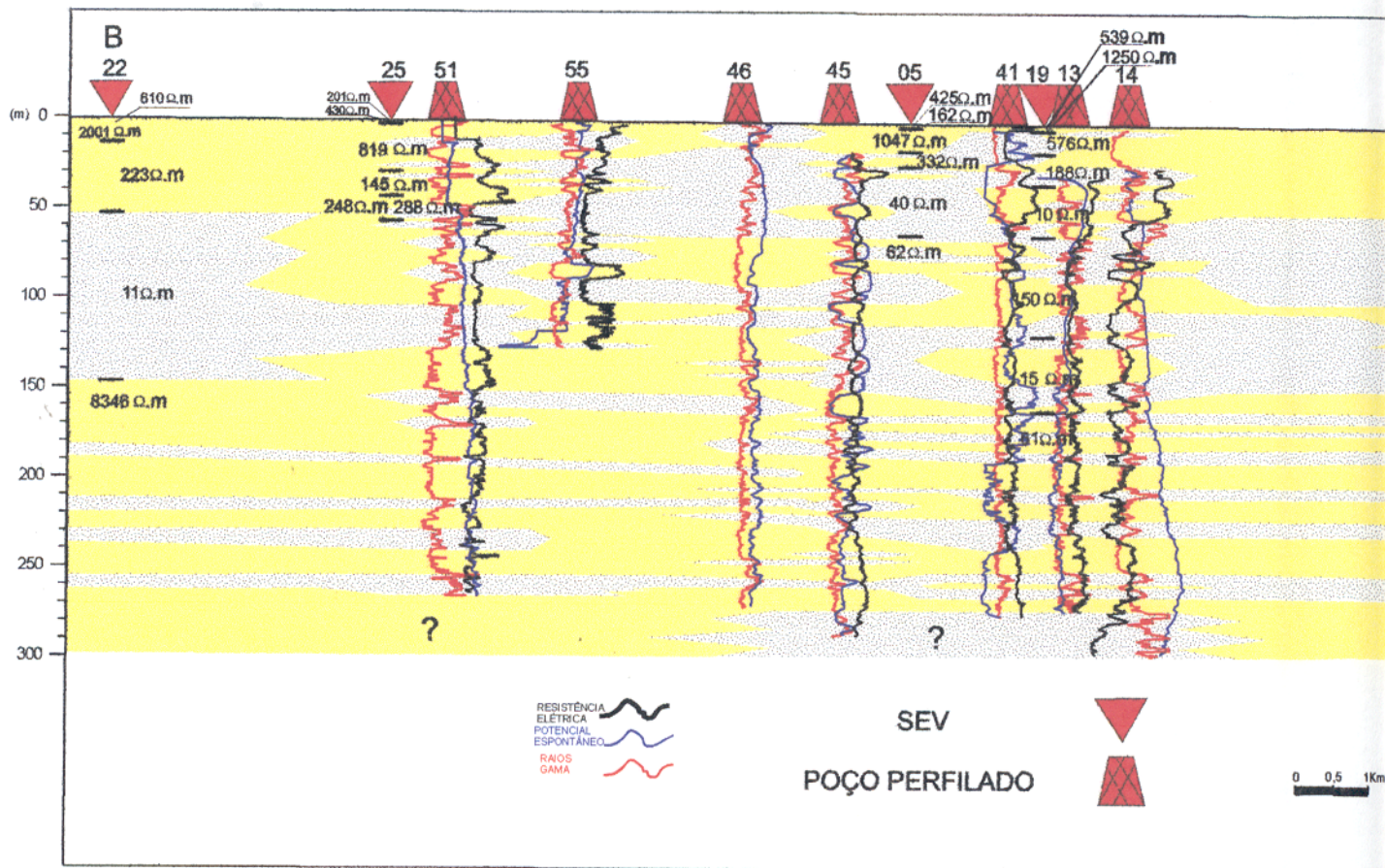
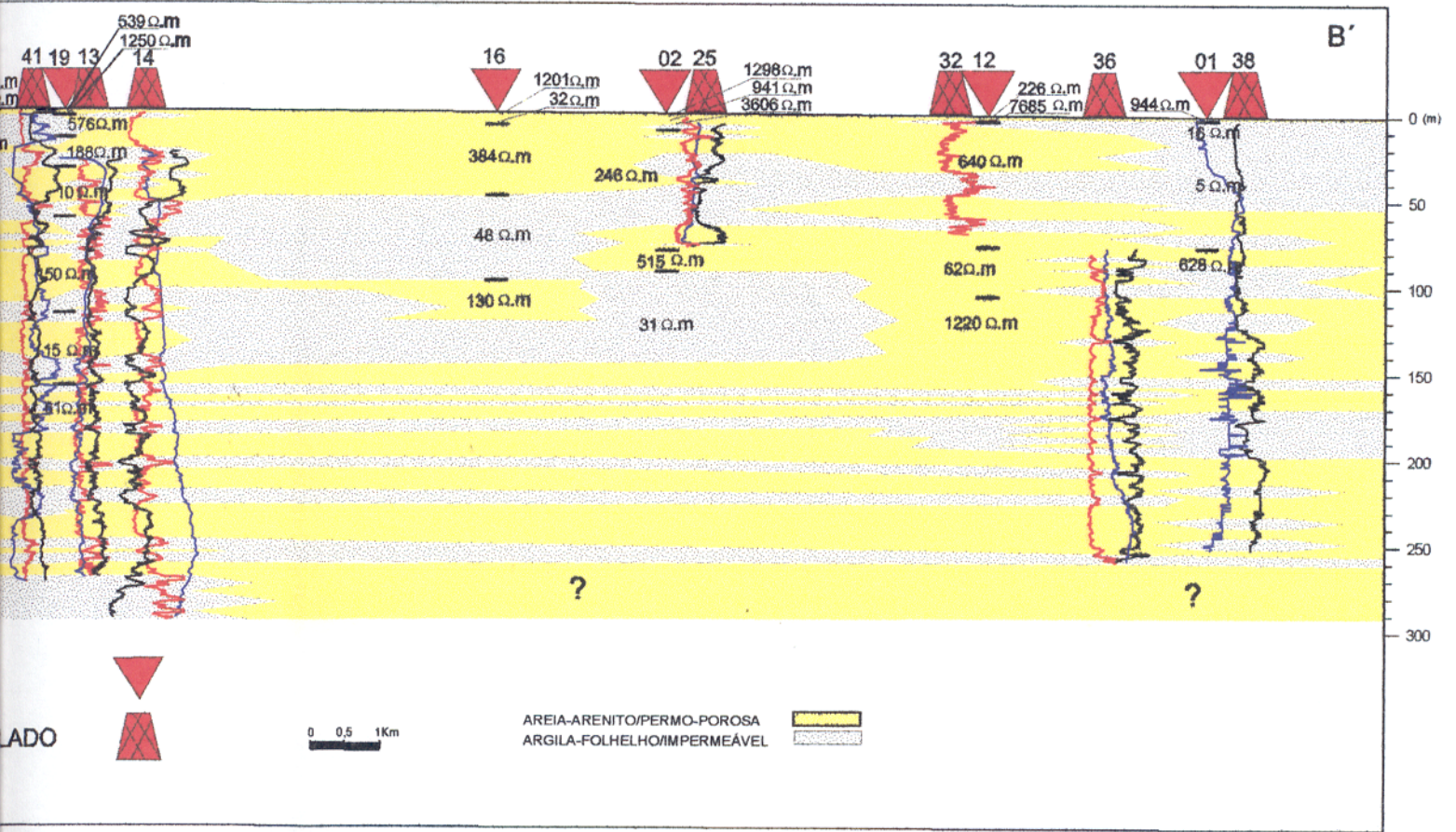


FIGURA 12 - Seção geológica interpretada BB'. Atraves



ção geológica interpretada BB'. Atravessa a área na direção N - S.

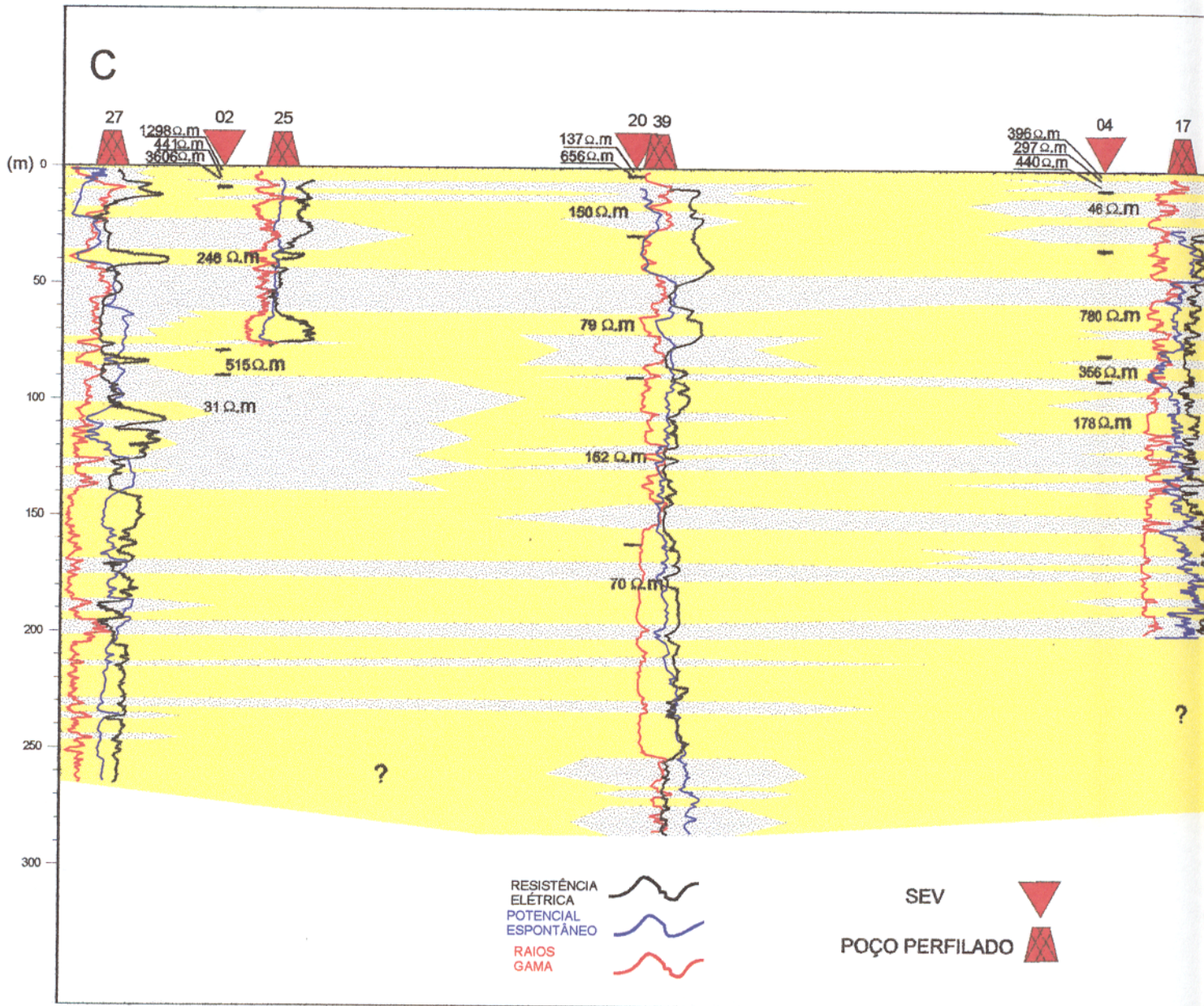
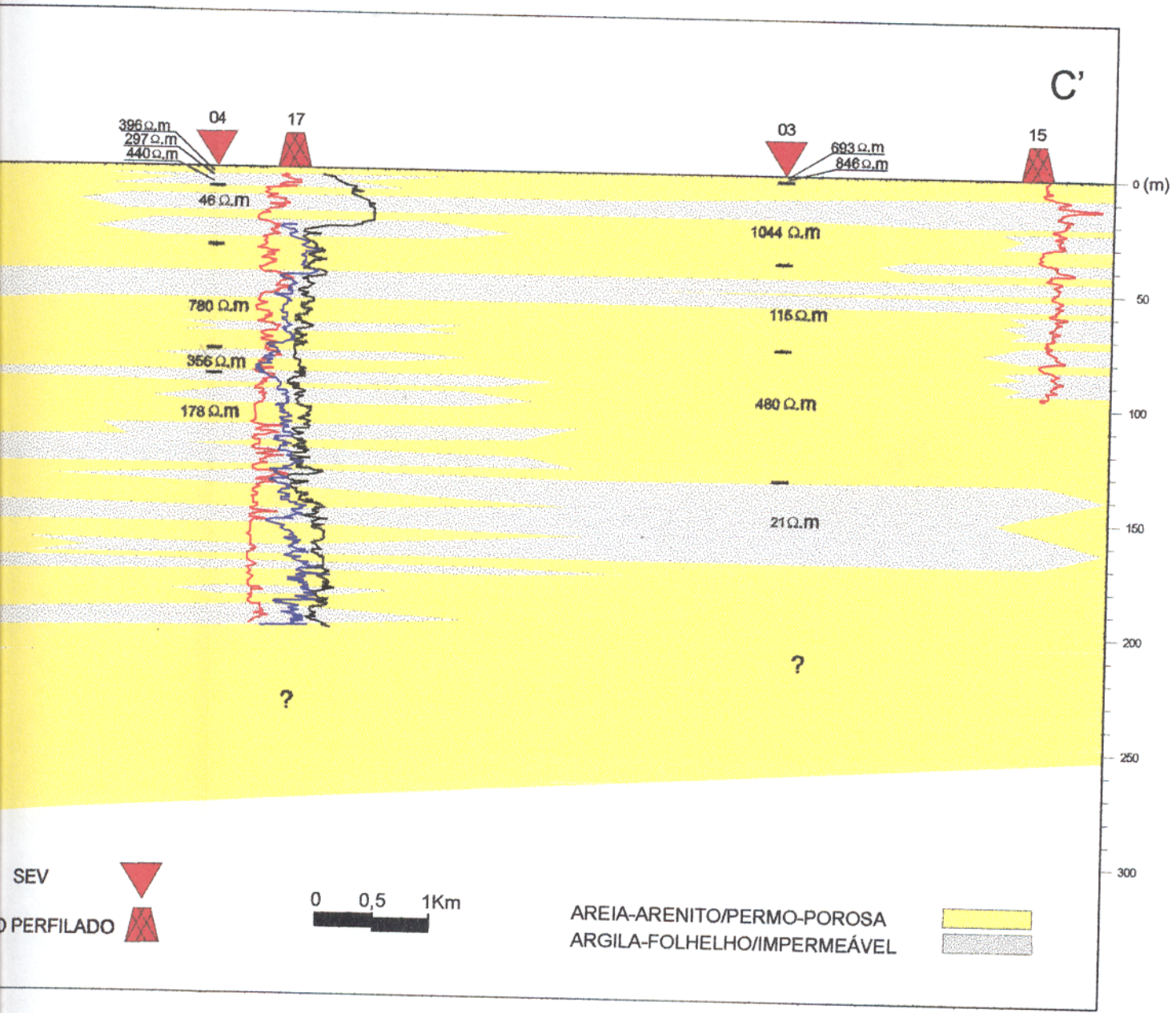


FIGURA 13 - Seção geológica interpretada CC'. Atravessa a á



... interpretada CC'. Atravessa a área na direção NE - SW.

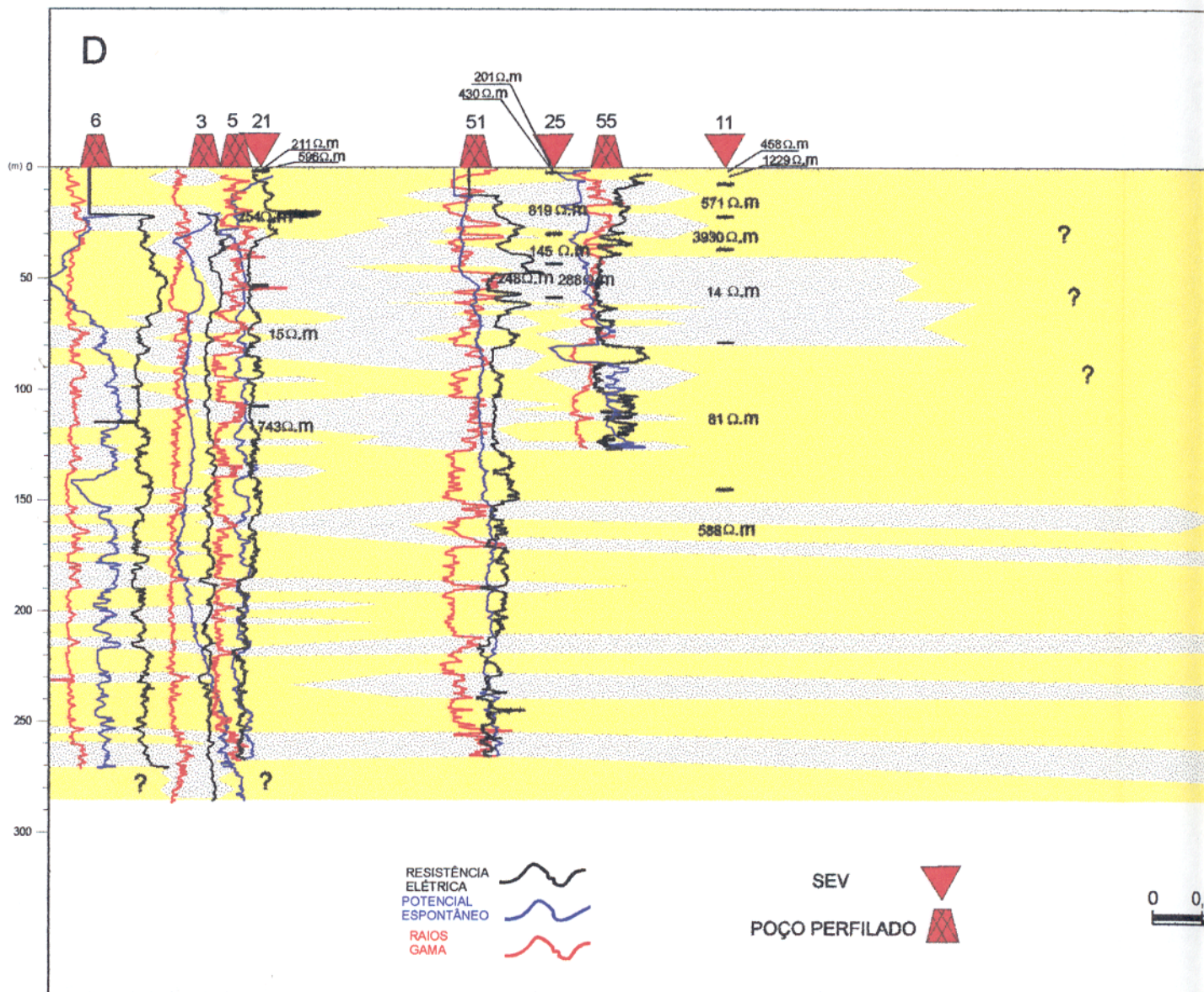
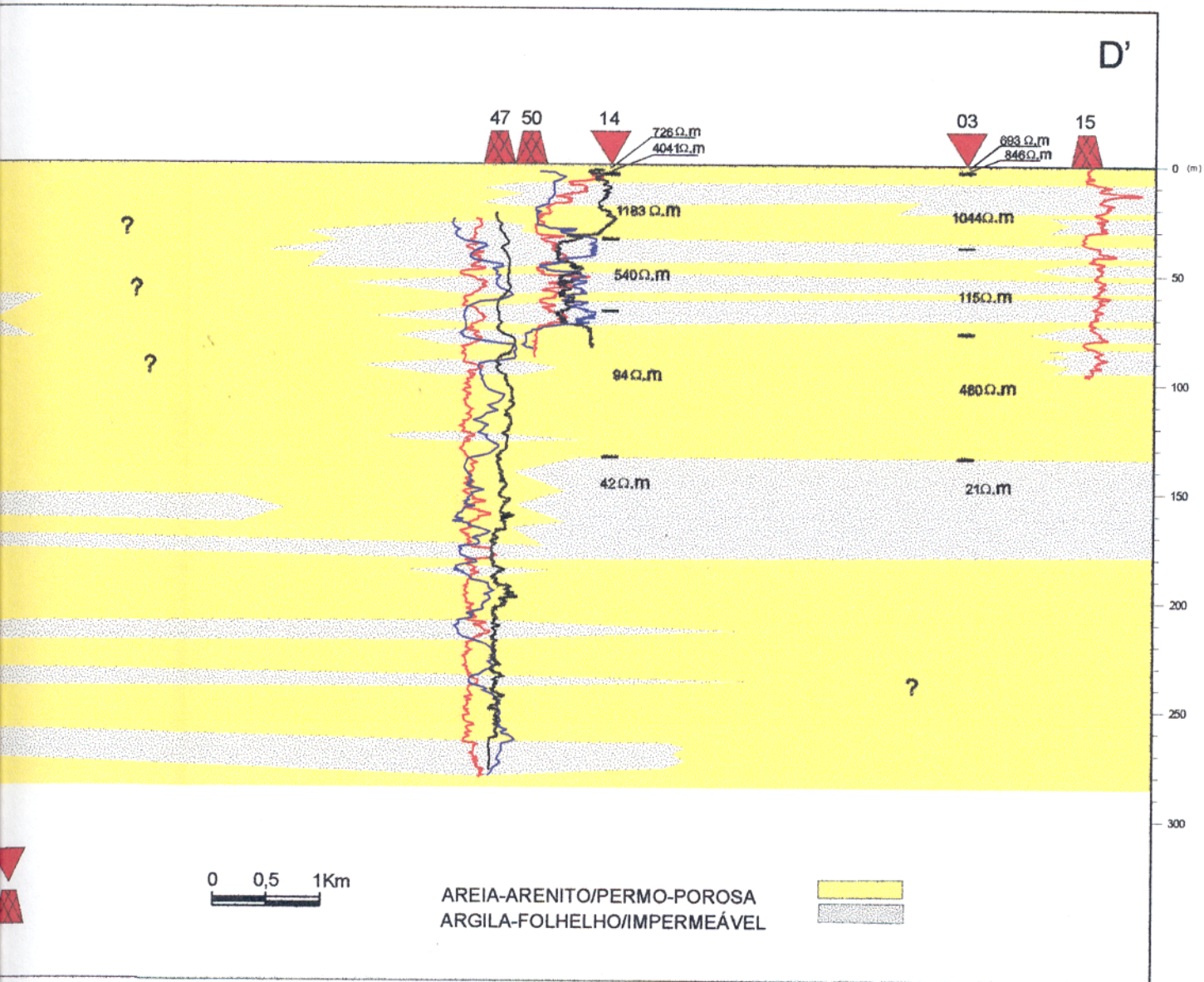


FIGURA 14 - Seção geológica interpretada DD'. Atraves



ca interpretada DD'. Atravessa a área na direção NW - SE.

Tabela 4 – Resultado do processamento das SEV's (valores de resistividade em ohm.m e espessura em m das respectivas unidades geoeletricas).

Nº da SEV	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4			Camada 5			Camada 6			Camada 7			OB..
	h1	p1	h2	h2	p2	h3	p3	h4	p4	h5	p5	h6	p6	h7	p7	h7	p7					
01	1	944	4; 72	16; 5	628																	
02	0,5 2 6	1288 941 3606	71	246	515	18		31														
03	1 1,5	683 845	36	1044	115	38		56	480	21												
04	0,5 0,5 7	396 297 440	26	46	780	45		14	356	178												
05	1 3	425 162	15	1047	332	9		36	40	62												
06	1 5	481 254	13 10	613 1951	58 97	36 36		41 334	20	230												
07	1 5	1062	18	665	1314	18		21		130												
08	1 4	750 29	10	7	343	68		16														
09	0,5 1 2 2	93 40 135 13	19	179	109	22		36	19	425												
10	1 6	458 1229	15	571	3930	15		42	14	81												
11	1 1	568 96	8	1147	62	29		36	382	47												
12	1 1	2267 685	74	640	187	27		36	382	47												
13	1 1	568 96	8	1147	62	29		36	382	47												
14	0,5 3	726 4041	30	1183	540	33		66	94	42												
15	1 9	568 3078	17	138	85	62		87	294	47												
16	1 4	1201 32	42	364	48	48		130														
17	0,5 2	289 381	6	17	109	15		50	5	191												
18	1 4 10	238 162 666	15	94	59	27		61	95 185													
19	1 2	539 1249	18	576	188	19		28	10	55												
20	1 2	137 656	26	150	79	61		72	152	70												
21	0,5 1	211 596	51	254	15	54		743														
22	1 12	610 2009	40	223	11	94		8346														
23	1 2 3	347 252 112	15	1031	32	39		17	210	96												
24	1 11	106 410	30	52	102	25		41	176	94												
25	1 1	201 430	28	819	145	13		15	248 285													

p5 incluído na
camada 4.
h5 $\Rightarrow \infty$

p5 incluído na
camada 4.
h5 $\Rightarrow \infty$

5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos levantamentos com SEV e perfilagens de poços têm mostrado que a continuidade lateral não é uma característica do ambiente geológico em Belém em porções superiores a 160 m. Por vezes consegue-se relacionar lateralmente as unidades geoeletricas a quilômetros de distância, no entanto SEVs separadas por distâncias menores têm um descompasso que leva até mesmo a descrença de que tais estratos, mencionados anteriormente, tenham continuação a tão grande extensão. Neste caso entende-se que os horizontes geoeletricos correlacionados podem estar sendo separados por vários outros de extensões laterais e até mesmo verticais diferentes.

Observando os igarapés e os rios atuais, dos quais o rio Guamá (com seção transversal de até 2 km em Belém) é o maior, o ambiente deposicional dos sedimentos da região poderiam ter canais de seções transversais as mais variadas possíveis, com extensões métricas e até quilométricas. As espessuras as mais variadas em função do aporte diferencial dos sedimentos ao longo do tempo da migração do canal. As regiões entre os rios (planícies dos rios), que comportam material pelítico, também teriam variações areais e espessuras de acordo com os rios que se relacionam. Podem também ser planícies de lama de ambiente transicional.

Analisando os dados das SEVs, é nítida a não continuação lateral das unidades geoeletricas. Na confecção das seções geoeletricas, sabe-se da impossibilidade em definir as formas dos corpos e sobretudo caracterizar um sistema deposicional, principalmente com a escassez de dados e malha irregular devido ao ambiente urbano. No entanto, usando os conhecimentos geológicos regional e local dos sedimentos Barreiras, tido como estuarino, sabe-se que é possível desenvolver corpos arenosos e planícies de lama. Estes corpos arenosos possuem faixas de resistividade bastante variadas, desde 61 Ω .m até 3930 Ω .m. Formas de corpos arenosos ou siltosos interdigitados também são freqüentes, os quais possuem resistividades igualmente variada.

Os aquíferos estariam localizados nos pacotes mais arenosos, os quais são freqüentes em toda a região, contudo sem grande continuidade lateral assegurada. No entanto, como visto no Capítulo 2, dados de poços da região mostram que os teores de

ferro desses aquíferos são bastante elevados, acima dos níveis de potabilidade. Isto inviabiliza o uso dos mesmos, salvo se houver tratamento, exceto daqueles mais superficiais onde os teores são menores. A presença do ferro estaria relacionada a grande quantidade de níveis lateríticos descritos ao longo dos perfis dos poços da área, o que também explicaria os valores bastante elevados de resistividade em algumas unidades geoeletricas possivelmente relacionados a este material.

De acordo com as características mostradas pela geologia superficial local e regional e pelos dados de poços, entende-se que a unidade então descrita faria parte dos sedimentos Barreiras.

A porção inferior, a partir de 160/170 m, possui correlação lateral elevada, mesmo a grandes distâncias. É predominantemente composta por areia com níveis argilosos. Perfis de poços descrevem também calcário. Tal característica leva a entender que esta seqüência sedimentar pertence à Formação Pirabas, de ambiente deposicional de mar raso e por isso continuidade lateral significativa. Estes pacotes arenosos são os melhores aquíferos da área justamente por tal continuidade lateral. A proteção a contaminantes e poluentes em meio urbano também induzem ao uso de mananciais aquíferos mais profundos e por isso supostamente mais protegidos.

Os métodos geofísicos aqui empregados tiveram como principal objetivo reconhecer propriedades que pudessem ser associadas a padrões litológicos e posteriormente correlacionar, tais padrões, lateralmente, com vistas a identificação de aquíferos contínuos o suficiente, que possibilitasse sua exploração com maior vazão possível. Admitindo que o sistema deposicional dos sedimentos Barreiras seria estuarino e o da Formação Pirabas, de mar raso, presume-se que a continuidade lateral do segundo seja maior. Certamente, como foi mostrado, há porções mais superficiais, acima dos limites aqui encontrados, que tem certa continuidade. No entanto, tais porções podem estar associadas a erosão diferenciada da Formação Pirabas. Seriam altos e baixos que poderiam estar relacionados a atividade tectônica, porém a correlação lateral entre os estratos, em maiores profundidades, descarta tal possibilidade. É possível que a porção superior (até cerca de 76 m) faça parte da Formação Pirabas, como consideram alguns autores (SOARES, 1984; LIMA FILHO, 1985; CHAGAS, 1990 e PARÁ, 1995). Seria uma ou as duas fácies não marinhas desta

formação: fácies a Capanema, de ambiente lagunar de borda de bacia ou estuarino, também composta por calcários e contendo fósseis, ou então a Baunilha Grande, bastante argilosa, formada em mangue e, portanto, ambas sem continuidade lateral significativa.

Foi feito ainda análise quanto a variação lateral, agora em X e Y, em mapa, portanto, do potencial aquífero da região a partir da Resistência Transversal (T). Lembrando que tal parâmetro é vinculado a resistividade e a espessura de cada horizonte. Sendo assim, quanto maior o valor de T, maior a quantidade disponível de água àquela zona de profundidade. As Figuras 15 e 16 mostram a variação deste parâmetro nas profundidades de 0 a 50 m e de 50 a 100 m, respectivamente.

O mapa da Figura 15 tem maior abrangência que o mapa da Figura 16, visto que parte das SEVs não tem alcance até 100 m. Neste primeiro mapa, os locais mais favoráveis a obtenção de água são a porção centro-norte, nordeste e este da área, onde os valores de T são superiores a 30 mil $\Omega.m^2$ e, mais localmente, quase no extremo sul da área, onde os valores também são significativos. Na Figura 16, onde os valores de T são menores que no mapa da Figura 15, a posição do extremo norte da área, persiste como sendo uma das maiores possibilidades em obtenção de água, cujos valores são superiores a 16 mil $\Omega.m^2$. Destaca-se também a porção sudeste.

É relevante entender que tais mapas têm sua função limitada pela malha empregada. Isto é bem claro quando se observa amostragem dos mapas supracitados em que o primeiro tem 9 sondagens a mais que o segundo. A interpolação feita é tão melhor quanto maior a amostragem.

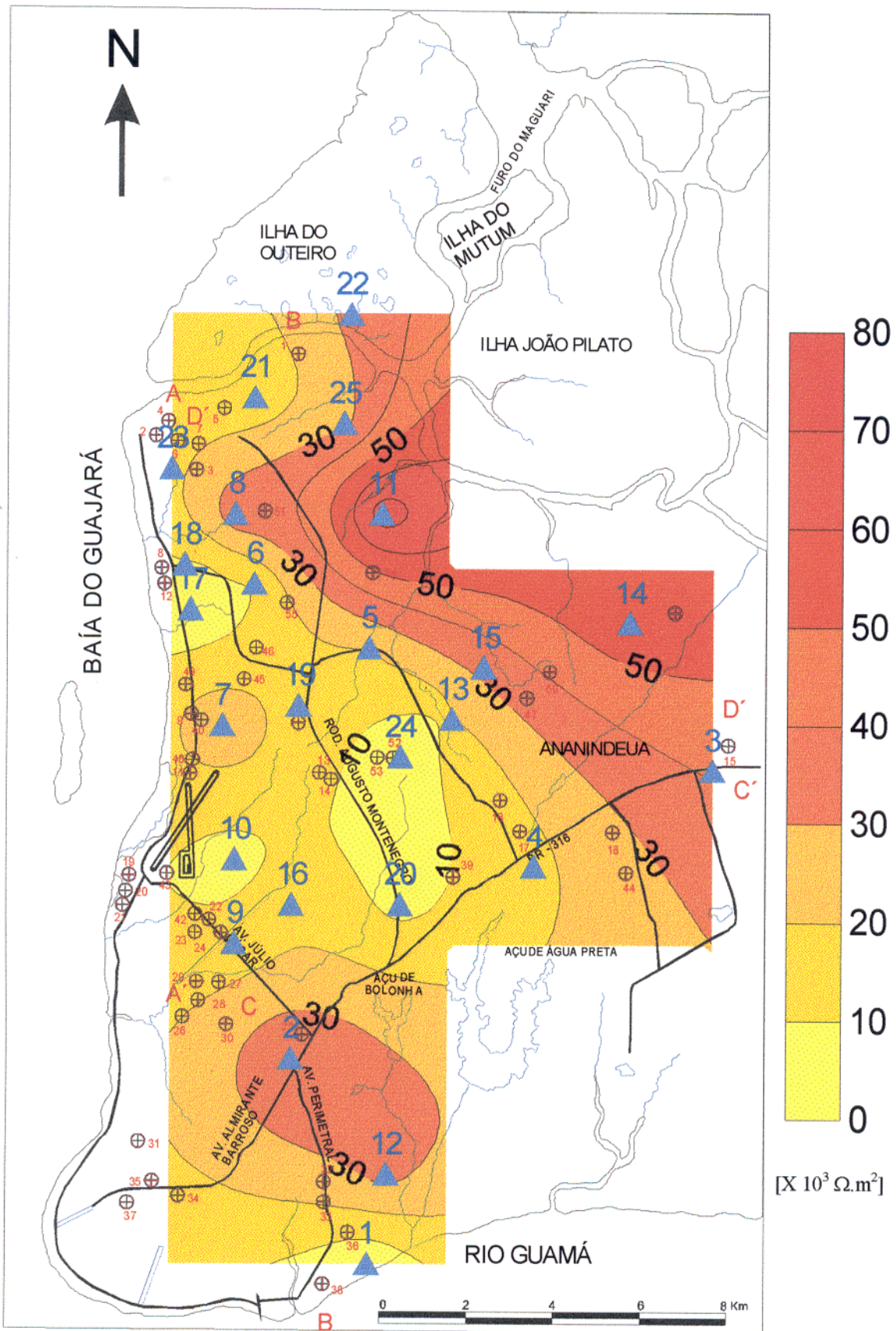


FIGURA 15 – Mapa de Resistência Transversal dos horizontes geoeletricos entre 0 e 50 m de profundidade.

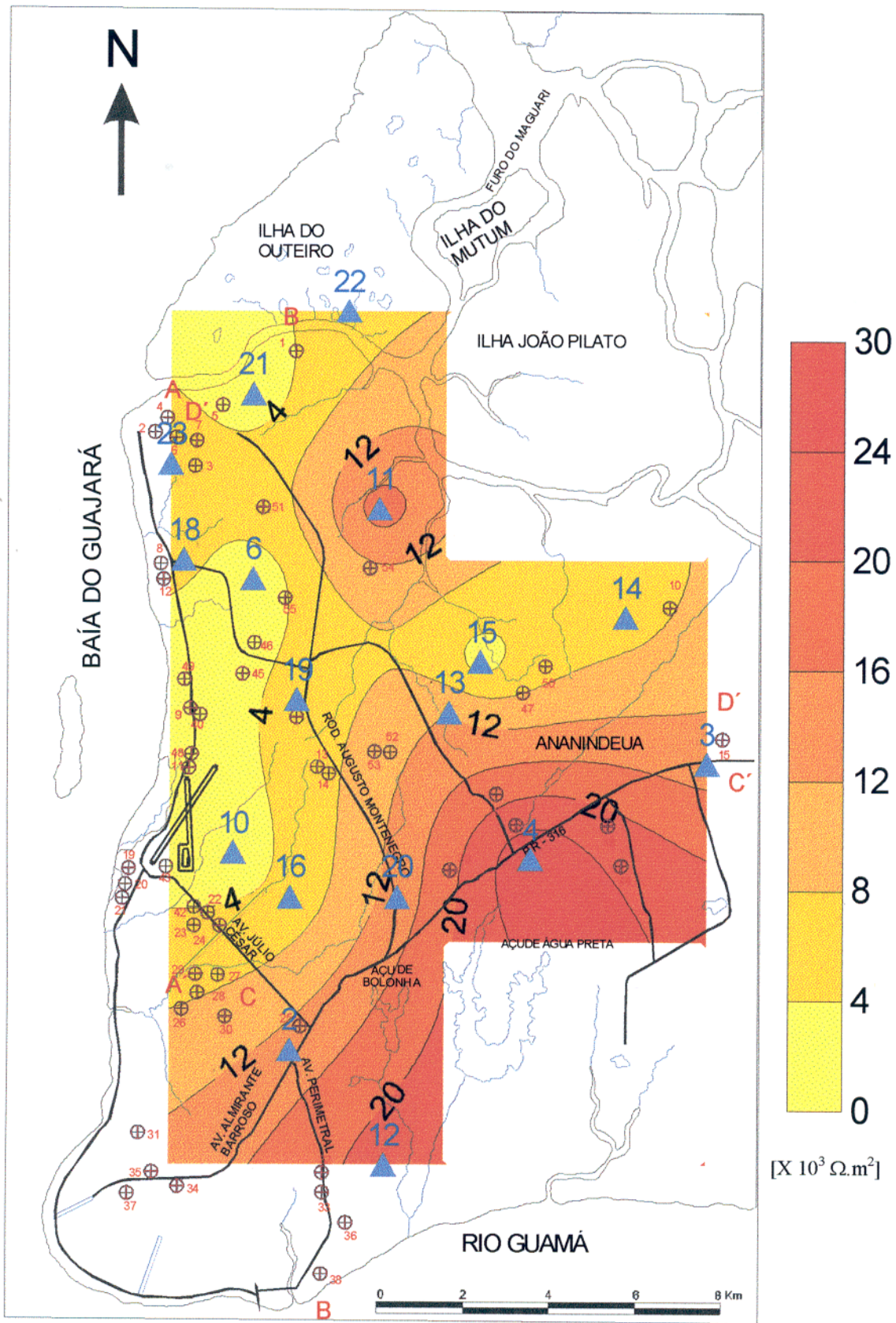


Figura 16 – Mapa de Resistência Transversal dos horizontes geolétricos entre 50 e 100 m de profundidade.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Aplicando os métodos geofísicos de perfilagem de poço e sondagem elétrica vertical e levando em conta o conhecimento geológico na interpretação de dados, podemos concluir que a região é composta de duas zonas aquíferas bastante distintas.

A primeira se estende até a profundidade em torno de 160 m com corpos arenosos das mais variadas dimensões interdigitados a pelitos. Seriam corpos arenosos em meio a planícies de lama de um estuário e gradações laterais também neste sistema, seqüência sedimentar conhecida por sedimentos Barreiras. O teor elevado de ferro a partir dos 30 ou 40 m o inviabiliza enquanto fonte de água potável, a não ser que algum tratamento seja empregado. Sua produção seria razoável, no entanto para abastecimento público pode não ser favorável visto que a os corpos arenosos têm continuidade lateral limitada.

A segunda zona aquífera se estende a partir de 160 m até em torno de 300 m pelo menos, onde há dados. É constituída predominantemente por areias com níveis argilosos. Sua característica principal, a continuidade de seus depósitos por grandes distâncias, induz a interpretar um possível ambiente deposicional marinho. Seria a Formação Pirabas, gerada em ambiente marinho raso. Esta seria a melhor aquífero para exploração de água potável da região, com grande volume de armazenagem e livre de estorvos antrópicos superficiais, servindo ao abastecimento público. Bastaria, de uma forma geral, avaliar se sua recarga propiciaria renovação em quantidade satisfatória e em condições ambientais favoráveis, o que até então vem ocorrendo. Há possibilidade de a Formação Pirabas ocorrer acima da profundidade referida anteriormente. Contudo, seriam as fácies Capanema, de ambiente lagunar ou estuarino e/ou a fácies Baunilha Grande, que é de mangue.

A limitação da SEV quanto a profundidade de investigação, no que diz respeito ao pouco espaço para a abertura dos cabos em meio urbano e a baixa potência do equipamento, poderia ser superada através do uso de técnicas eletromagnéticas. Estas produzem levantamentos mais rápidos pois não necessitam de contato físico. Sendo necessário cuidado com os ruídos urbanos durante a aquisição e o processamento.

Durante novas investigações através de eletrorresistividade, é necessário um equipamento de maior sensibilidade e maior potência para que se possa investigar a maiores profundidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

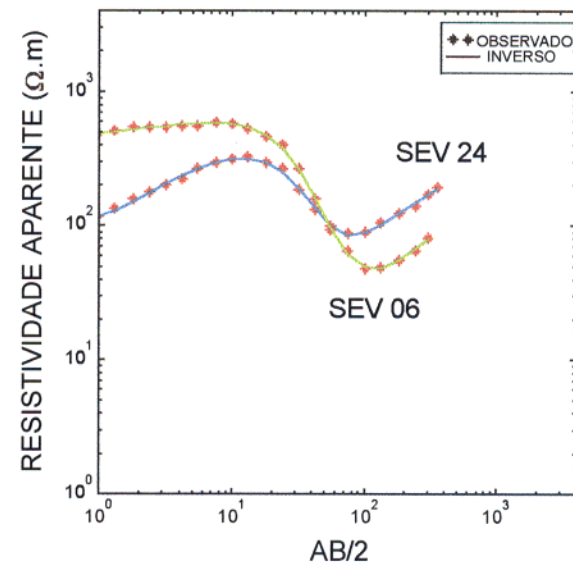
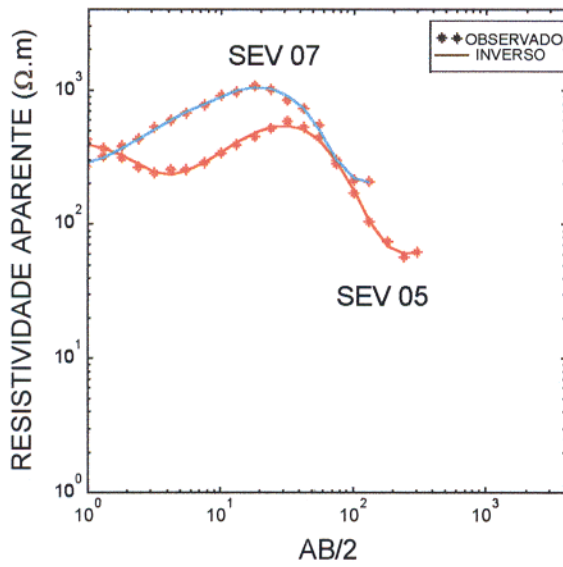
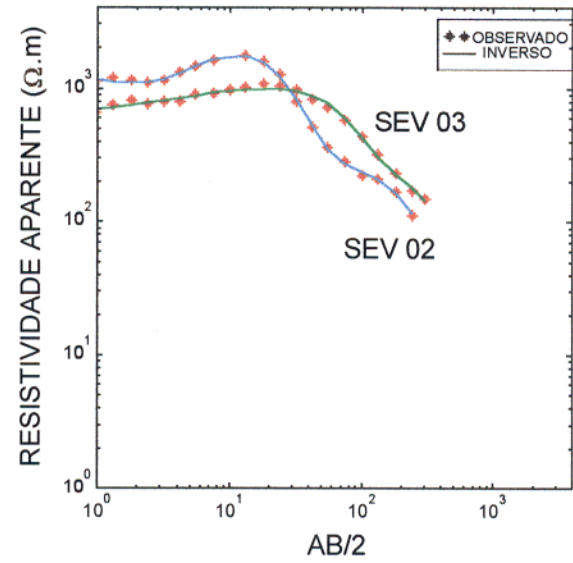
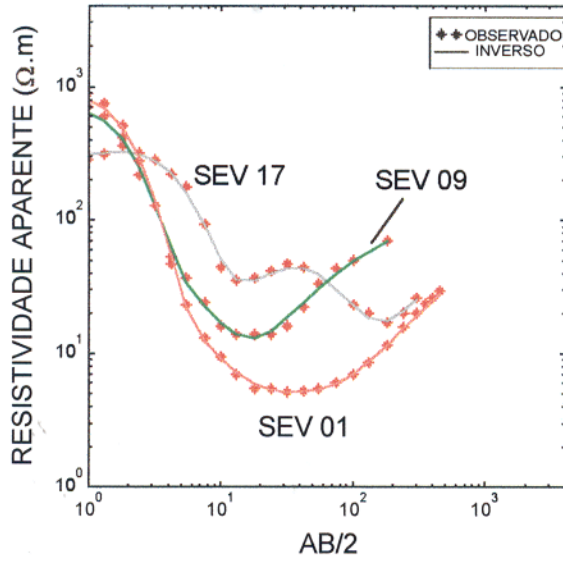
- CABRAL, J. 1997. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, A. C. & FILHO, J. M., (coord). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM. p. 35 – 51.
- CARVALHO, L. F. M. de. 1999. *Caracterização da Geometria das Camadas Aqüíferas do Bairro do Umarizal como Base para uma Proposta de Abastecimento de Água Subterrânea*. Belém. UFPA. Centro de Geociências. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia).
- CHAGAS, M. A. A. 1990. *Estudos sedimentológicos e paleontológicos dos sedimentos cenozóicos de subsuperfície do Poço Furo do Museu*. Belém, UFPA. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia).
- ELLIS, D. V. 1987. *Well logging for Earth scientists*. Ed: New York. Elsevier. 532 p.
- FARIAS, E. S.; NASCIMENTO, F. S; FERREIRA, M. A. A. 1992. *Estágio de Campo III: Relatório Final*. Área Belém/Outeiro. UFPA. 247 p.
- FERREIRA, C. S. 1982. Notas Estratigráficas sobre o Cenozóico Marinho do Estado do Pará. In: SIMP. GEOL. AMAZ., 1., Belém. *Anais...* Belém. V. 1. p. 84-88.
- FERREIRA, C. S. & FRANCISCO, B. H. R. 1988. As relações da Formação Pirabas (Oligiceno-Mioceno) com as formações continentais terciárias no NE do Pará. In: CONG. BRAS. GEOL., 35., Belém. *Anais...* Belém, SBG. V. 2. p. 761-764.
- GONZALEZ, C. A. A. 1984. *Estudo geofísico regional sobre águas subterrâneas na Ilha do Marajó – Pará – Brasil*. Belém, UFPA. 142 p. (Tese de mestrado).
- GONZALEZ, C. A. A., RIJO, L. 1991. Análise da utilização da teoria os meios estratificados na interpretação de SEVs da Ilha do Marajó, Pará. *Revista Brasileira de Geofísica*. 9 (2): 187-197.
- KELLY, W. E. 1977. Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. *Groundwater*. 15.: 420-425.
- LEVENBERG, K. 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least square. *Quart. Appl. Math.* 2: 164-168.

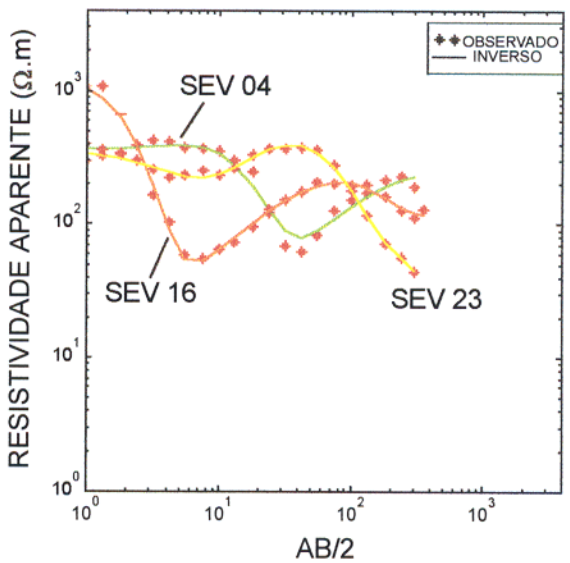
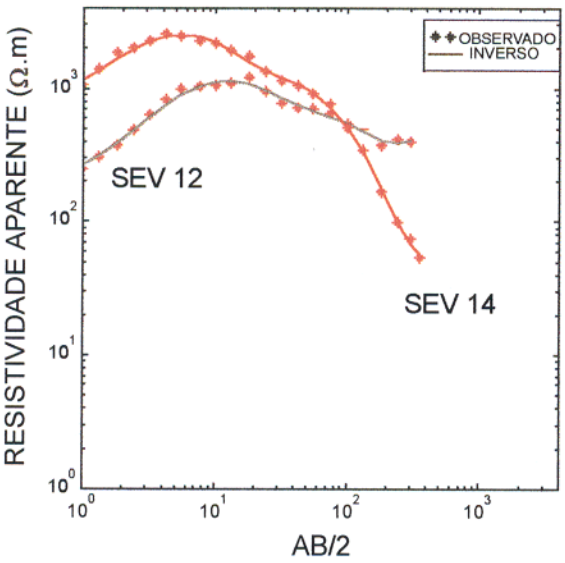
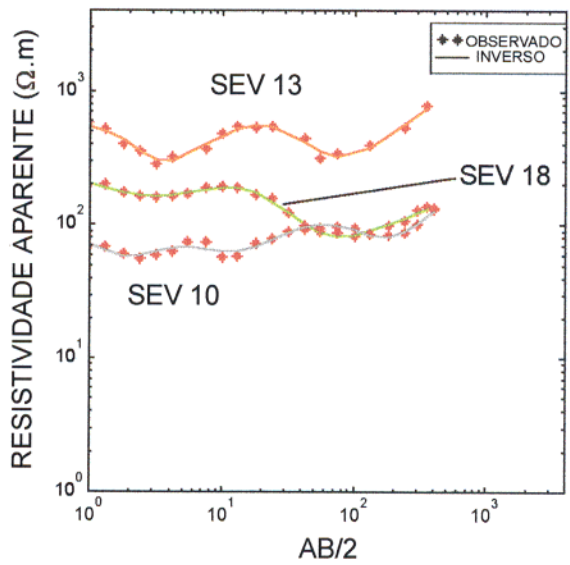
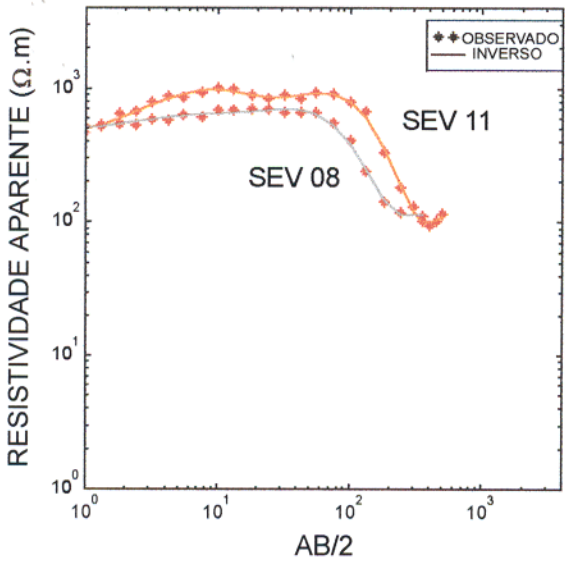
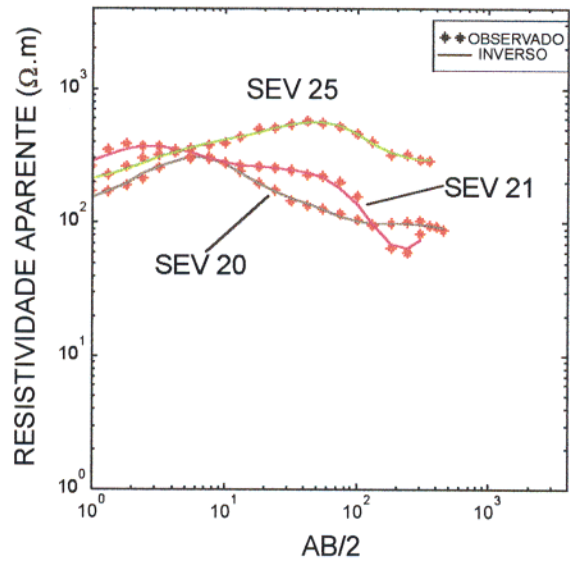
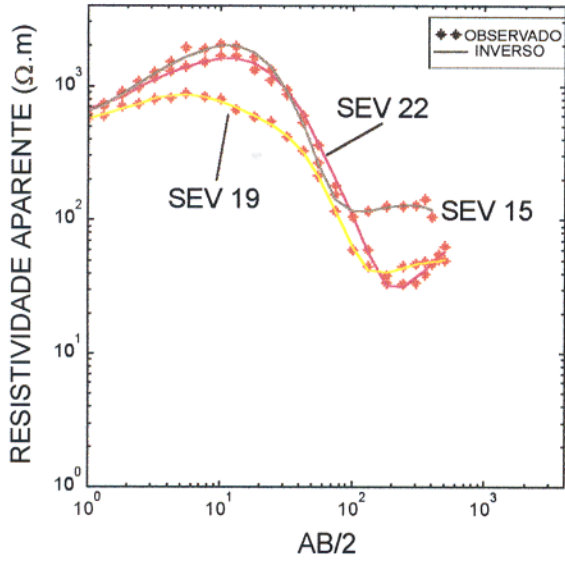
- LIMA FILHO, M. F. 1985. *Estudo sedimentológico e paleontológico de subsuperfície. Poço AMASA – 1, Icoaraci/Belém*. Belém, UFPA. 30 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia).
- LUIZ, J. G. & SILVA, L. M. C. 1983. *Curso de geofísica de prospecção*. Belém. UFPA. 262 p. (apostila).
- LUIZ, J. G. & SILVA, L. M. C. 1995. *Geofísica de Prospecção*. Belém. Universidade Federal do Pará. Ed. CEJUP. v. 3. 311 p.
- MARQUART, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 11:431-441.
- MUTÓ, J. 1997. *Caracterização geométrica das camadas aquíferas da região metropolitana de Belém (PA) – Bairro de Nazaré*. Belém. UFPA. Centro de Geociências. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia).
- NERY, G. G. 1997. Perfilagem geofísica aplicada a água subterrânea. In: FEITOSA, A. C. & FILHO, J. M., (coord.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM. p. 203 – 241.
- NIWAS, S. & SINGHAL, D. C. 1981. Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media. *Journal of Hydrology*. 50: 393 – 399.
- ORELLANA, E. 1982. *Prospeccion Geoeletrica em corriente continua*. 2. ed. Madrid. Ed. Paraninfo S.A.. 587 p.
- PARÁ. Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração; Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1995. *Plano Diretor de Mineração em Áreas Urbanas. Região de Belém e adjacências: projeto estudo do meio ambiente em sítios de material de construção na região de Belém – Benevides, Estado do Pará, relatório final*. Belém. 157 p.
- PETRI, S. & FÚLFARO, J. V. 1983. *Geologia do Brasil*. São Paulo. Ed. EDUSP. 631 p.
- PONTES, G. L. L. A. 1998. *Estudos geofísicos sedimentológicos nos poços SAEEB 1 e SAEEB 2/SESAN/PMB*. Belém – PA. Belém. UFPA. Centro de Geociências. 89 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia).

- RAMALHO, R. 1984. Distribuição das ocorrências minerais no Cenozóico brasileiro. In: CONG. BRAS. GEOL., 33., Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro. SBG. V. 1. p. 381-384.
- RIJO, L. 1994a. SEV1D. *Programa para modelagem de sondagem elétrica vertical unidimensional*. EGGSLIB (Electrical Geophysics Software Library). Belém, DGF/UFPa.
- RIJO, L. 1994b. SEV1DINV. *Programa para inversão de sondagem elétrica vertical unidimensional*. EGGSLIB (Electrical Geophysics Software Library). Belém, DGF/UFPa.
- ROSSETTI, D. F. de; TRUCKENBRODT, W.; GOES, A. M. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráficos dos sedimentos Barreiras na Região Bragantina, Nordeste do Pará. *Bol. M. P. E. G., Ciências da Terra*, Belém, 1 (1): 25-74. Jul.
- SÁ, J. H. S. 1969. Contribuição a geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região Bragantina. *bol. inst. geol.*, Rio de Janeiro, 3:21-36.
- SAAEB. 1999. *Sistema de abastecimento de água e esgoto sanitário de Belém – Pará: Relatório preliminar para análise da municipalização dos sistemas de abastecimento de água e esgoto de Belém – PA*. Belém. 80 p.
- SCARASCIA, S. 1976. Introduction to the round table on remote-sensing applications in water surveys. *Geoexploration*. 14: 267-268.
- SOARES, A. D. V. 1984. *Novo registro em subsuperfície de sedimentos terciários (Formação Pirabas) dentro da área da grande Belém (Poço n 3. Campus universitário)*. UFPA. 21 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia).
- SOUZA, C. W. M & LUIZ, J. G. 1994. Aquíferos na região de Belém: um estudo com base em perfilagem de poços. *Bol. M. P. E. G., Ciências da Terra*, Belém, 6 : 31-52.

ANEXOS

ANEXO A



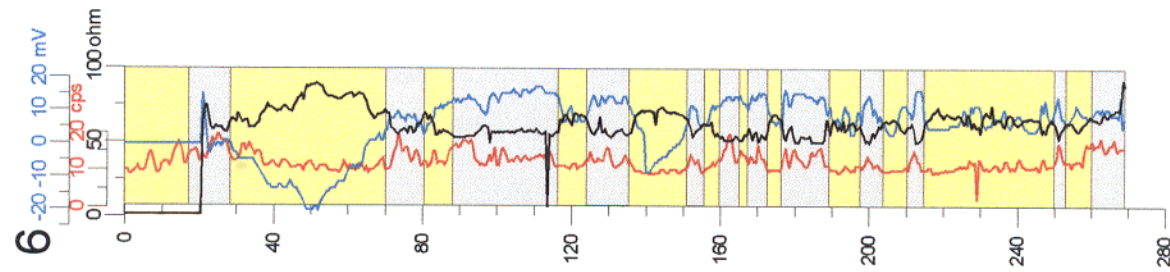
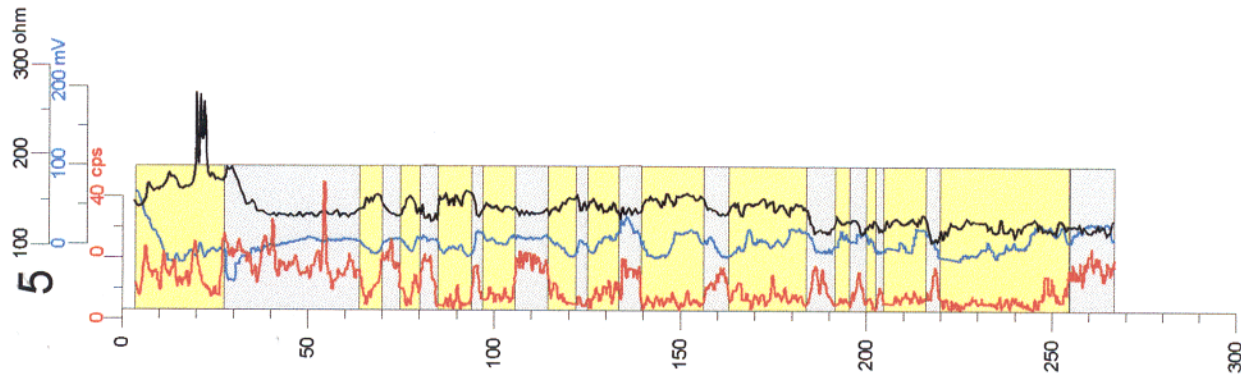
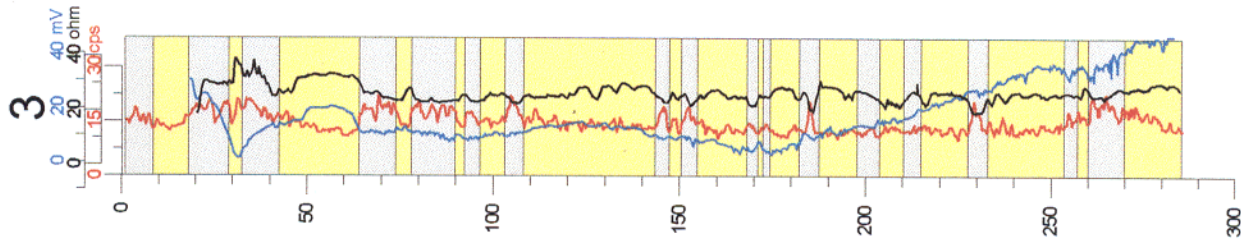
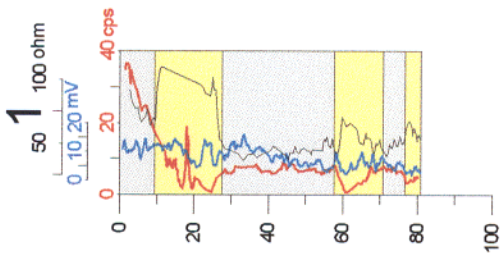


ANEXO B

LEGENDA

- AREIA/ARENITO
(NÍVEL PERMO-POROSO)
- ARGILA/ARGILITO
(NÍVEL NÃO PERMEÁVEL)

- RESISTÊNCIA ELÉTRICA
- POTENCIAL ESPONTÂNEO
- RAIOS GAMA



OB.: Algumas perfilagens de poços não constam neste anexo devido estarem muito próximas a outras. Há duas que têm localização bastante imprecisa.

