



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO HIDROLÓGICA DOS AQÜÍFEROS NA
REGIÃO SUDESTE DO COMPLEXO INDUSTRIAL
DE CAMAÇARI UTILIZANDO
GEOFÍSICA ELÉTRICA

CARLOS EDUARDO BARBOSA LEMOS FILHO

SALVADOR – BAHIA

NOVEMBRO - 2003

Avaliação hidrológica dos aquíferos na região sudeste do Complexo Industrial
de Camaçari utilizando geofísica elétrica

por

CARLOS EDUARDO BARBOSA LEMOS FILHO

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

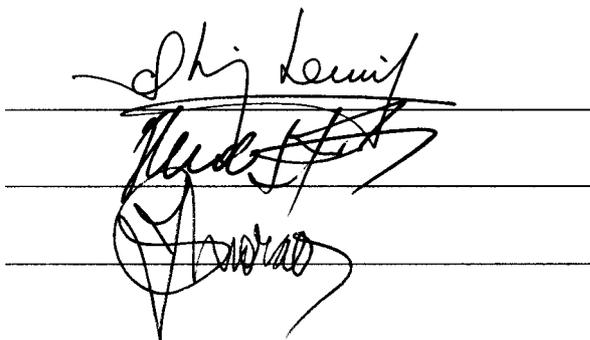
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



The image shows three horizontal lines, each with a handwritten signature written over it. The signatures are in black ink and appear to be cursive. The top signature is the most legible, followed by the middle one, and the bottom one is the most stylized and difficult to read.

Comissão Examinadora

Dr. Olivar Antônio Lima de Lima- Orientador

Dr. Hédison Kiuity Sato

Bc. Jander Welton Oliveira de Moraes

Data da aprovação: 25/11/2003

Aos meus avós queridos,
Carlos da Silva Lemos
(em memória),
Olindina Maria Barbosa Lemos,
Pedro Vieira Santana,
Noélia Freitas Santana,
obrigado por tudo.
Duda

RESUMO

Este trabalho de graduação versa sobre a utilização de métodos geofísicos elétricos na área do Espaço Alfa no setor sudeste do Complexo Industrial de Camaçari, Bahia, com o objetivo de caracterizar seus aquíferos até profundidades da ordem de 300 metros. Entre os dias 27/05/03 e 18/06/03 realizamos sondagens elétricas verticais utilizando o arranjo Schlumberger de eletrodos. Os dados de resistividade aparente e alguns de polarizabilidade foram invertidos e interpretados quantitativamente. Para auxiliar nesta interpretação foram usados perfis litológicos de onze poços de produção instalados na área, além de perfis geofísicos de três deles. Os resultados possibilitaram determinar a configuração estrutural dos principais horizontes aquíferos da área na profundidade máxima investigada, avaliar qualitativa e quantitativamente a interferência entre os bombeamentos dos poços e a vulnerabilidade do intervalo freático superior, relacionada a presença de aterro sanitário e instalações comerciais e industriais nas suas vizinhanças. Além disso, com base nesses resultados, foi possível indicar áreas mais favoráveis para instalação de novos poços de produção, e sugestões para melhor orientar a exploração conservativa dos recursos hídricos da área.

ABSTRACT

In this undergraduate research work I present the results of an electrical geophysical survey conducted in the Espaço Alfa area, in the southwest sector of the Camaçari Industrial Complex, Bahia, aiming to characterize their aquifer horizons up to 300m depths. Between 27/05/03 and 18/06/03 I performed 31 vertical electrical soundings using the Schlumberger electrode array. The apparent resistivity data and some polarizability data were quantitatively inverted and geologically interpreted. To add in these interpretations I have used lithological logs from 11 water production wells drilled in the area, besides valuable geophysical logs of three of such wells. The results allowed the structural delineation of the main aquifer horizons of the area, within the maximum investigated depth, to evaluate the actual interferences between well pumpings as well as the vulnerability of the upper phreatic aquifer related to the presence of a sanitary landfill and some industries in their neighbourhood. Further, on basis of such results I pointed out the most adequate places for sitting new production wells and suggest some practical rules to conduct an efficient and conservative exploration of its groundwater resources.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Caracterização Geológica da Área de Estudo	3
1.1 Geologia	3
1.2 Hidrogeologia	4
1.3 Reconhecimento de litofácies	5
CAPÍTULO 2 Bases Teóricas dos Métodos Geométricos	14
2.1 Propriedades Elétricas das Rochas	14
2.2 Fundamentos do Método Elétrico	15
2.2.1 Procedimentos de Aquisição dos Dados	18
2.2.2 Tipos de Arranjos de Eletrodos	18
2.2.3 Inversão dos Dados	19
2.2.4 Aplicações	20
CAPÍTULO 3 Aquisição e Interpretação dos dados	23
3.1 Aquisição dos dados	23
3.1.1 Possíveis Fontes de Erros	24
3.2 Inversão e Interpretação dos dados	25
CAPÍTULO 4 Conclusões e Recomendações	34
AGRADECIMENTOS	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXO I Sondagens Elétricas Verticais	41
ANEXO II Perfis de alguns poços	56

ANEXO III	Tabelas	58
ANEXO IV	Mapa com indicação de piezômetros e poço estratigráfico sugeridos.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Seção geológica transversal da região de Camaçari-Dias D'Ávila orientada de NO para SE (extraída de Lima, 1999)	6
1.2	Coluna composta pelos membros Rio Joanes e Passagem dos Teixeiras, segundo o zoneamento de litofácies proposto por Lima (1999) para a Formação São Sebastião na região de Camaçari-Dias D'Ávila.	7
1.3	Mapa de situação da bacia sedimentar do Recôncavo.	8
1.4	Seção Geológica Esquemática da Bacia do Recôncavo, mostrando a conformação estrutural do Baixo de Camaçari (modificado de Penteado,1999).	9
1.5	Mapa da região do Espaço Alfa com cotas topográficas.	10
1.6	Detalhe do mapa anterior com a localização das SEVs e poços de produção. Escala em metros.	11
1.7	Detalhe do mapa geológico da Petrobrás mostrando afloramentos na área de estudo.	12
1.8	Coluna Estratigráfica da Bacia do Recôncavo (segundo Netto e Oliveira, 1984).	13
2.1	Valores típicos para resistividade de diferentes tipos de rochas (modificado de Kearey, Brooks & Hill (2002).	15
2.2	Arranjo genérico de 4 eletrodos em medidas elétricas de campo.	16
2.3	Curva mostrando a profundidade de penetração de corrente no solo com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente (segundo Telford, <i>et al.</i> , 1990).	17
2.4	Arranjo Schlumberger de eletrodos.	19
2.5	Curva exemplo da função resistividade aparente para o arranjo Schlumberger de eletrodos (extraído de Parasnis, 1996)	20
2.6	Distribuição das linhas de fluxo e configuração de superfícies equipotenciais para um meio isotrópico e homogêneo devido a uma fonte pontual em superfície (modificado de Kearey, Brooks & Hill (2002).	21
2.7	Distorção das linhas de fluxo através de uma interface vertical, quando: (a) $\rho_1 > \rho_2$, (b) $\rho_1 < \rho_2$	21
2.8	Modelo genérico - camadas horizontais homogêneas e isotrópicas (modificado de Reynolds, 1997).	22
3.1	Curva de resistividade aparente para a SEV01 e modelo proposto por inversão automática.	26

3.2	Pseudo-seção de resistividade aparente a partir das SEVs 02, 31, 14, 15, 16, 17, 18, 24, 23 e 03. Resistividades em <i>Ohm.m</i>	28
3.3	Curva da sondagem SEV22.	30
3.4	Seção geolétrica esquemática de acordo com as SEVs 11, 05 e 20.	31
3.5	Pseudo-seção de resistividade aparente nas seis SEVs realizadas atrás do novo aterro sanitário da LIMPEC.	32
3.6	Pseudo-seção de cargabilidade aparente.	32
3.7	Seção esquemática de acordo com as SEVs 03, 10, 21 e os perfis dos pocos 122/03 e 47/20.	33
I.1	SEV02.	41
I.2	SEV03	42
I.3	SEV04	42
I.4	SEV05	43
I.5	SEV06	43
I.6	SEV07	44
I.7	SEV08	44
I.8	SEV09	45
I.9	SEV10	45
I.10	SEV11	46
I.11	SEV12	46
I.12	SEV13	47
I.13	SEV14	47
I.14	SEV15	48
I.15	SEV16	48
I.16	SEV17	49
I.17	SEV18	49
I.18	SEV19	50
I.19	SEV20	50
I.20	SEV21	51
I.21	SEV23	51
I.22	SEV24	52
I.23	SEV25	52
I.24	SEV26	53
I.25	SEV27	53
I.26	SEV28	54
I.27	SEV29	54
I.28	SEV30	55
I.29	SEV31	55

II.1	Perfil do poço 122/03, de acordo com perfil elétrico e amostras de calha.	56
II.2	Perfil geofísico do poço 140/01, utilizado para correlação com as SEVs 12 e 13	57
III.1	Tabela mostrando a localização das sondagens e poços de produção.	58
IV.1	Localização dos piezômetros e do poço estratigráfico sugeridos no capítulo 4 deste trabalho.	59

INTRODUÇÃO

O dimensionamento de mananciais de água potável como riquezas naturais de valor inestimável para as nações tem sido uma tendência mundial nos últimos anos. Estudos já apontam para futuros problemas de abastecimento em alguns países, caso pouco seja feito no sentido de preservar e utilizar de forma racional os recursos hídricos disponíveis. Em comparação aos mananciais de água superficial, as águas subterrâneas têm sido pouco e mal exploradas, já que há falta de conhecimento por parte da maioria das pessoas em relação a ocorrência e comportamento da água em subsuperfície, bem como das metodologias úteis na sua avaliação.

A geofísica vem ganhando maior importância na avaliação de aquíferos por utilizar métodos não invasivos. Este aspecto a torna importante em casos que envolvem contaminação da água subterrânea. Além disso, representa uma ferramenta de baixo custo para trabalhos de reconhecimento, monitoramento e até mesmo detalhamento, em comparação aos métodos tradicionalmente utilizados.

Pólos industriais, como o Complexo Industrial de Camaçari, possuem em geral, uma grande demanda por água (de boa qualidade) para utilização em seus processos industriais. A exploração das águas subterrâneas é uma alternativa bastante atraente para ajudar a suprir essa necessidade devido a sua abundância e boa qualidade, como comprovam os resultados das análises químicas da água extraída de poços da área de estudo.

No que concerne a exploração de água subterrânea na região do Complexo Industrial de Camaçari e adjacências, duas questões têm preocupado os órgãos governamentais responsáveis pela conservação dos aquíferos regionais há algum tempo: o risco ambiental em decorrência da atividade industrial na região, bem como a vulnerabilidade própria do componente freático, e a exploração desordenada (ou superexploração) do sistema como um todo.

A Cetrel S/A - Empresa de Proteção Ambiental é a gestora do Programa de Monitoramento das Águas Subterrâneas do Complexo Industrial de Camaçari, por delegação do CEPRAM. A área do Espaço Alfa, e sua extensão para leste dentro do município de Camaçari, foi escolhida para realização deste trabalho, por ser considerada como de grande potencial para perfuração de novos poços de produção, pois os que já existem no local possuem boa produtividade e águas de boas qualidades físico-químicas.

Com o apoio da Cetrel S/A e do CPGG/UFBA, foram realizadas 31 sondagens elétricas

verticais na área de estudo. Foram também trabalhados os dados litológicos e os parâmetros hidrodinâmicos dos onze poços da região. Com isso espera-se ter uma idéia do impacto causado no aquífero freático local pelo bombeamento, avaliar sua vulnerabilidade e o potencial da área para perfuração de novos poços.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 1 apresentamos a descrição geológica da área, com ênfase nos aspectos estratigráficos, estruturais e hidrogeológicos; o capítulo 2 contém um resumo do embasamento teórico sobre os métodos geométricos empregados neste estudo; o capítulo 3 inclui a etapa de aquisição dos dados e sua interpretação geológica considerando as possíveis ambigüidades e fontes de erros; o capítulo 4 resume as principais conclusões e recomendações do trabalho.

CAPÍTULO 1

Caracterização Geológica da Área de Estudo

1.1 Geologia

A Bacia do Recôncavo faz parte do sistema de bacias eo-cretáceas do leste brasileiro, estando geneticamente associada ao processo de rifteamento que afetou o paleocontinente Gondwana resultando na separação dos continentes africano e sul-americano (Lima, 1999).

A bacia é constituída de uma série de grabens assimétricos alongados na direção NE-SO, implantados sobre rochas pré-cambrianas do cráton São Francisco, que foram gradativamente preenchidos por sedimentos continentais flúvio-lacustres (com horizontes ricos em matéria orgânica) desde o neojurássico. Esse pacote de sedimentos é denominado Supergrupo Bahia. Sua espessura é variável, chegando a até 6000m (Viana *et al.*, 1971) próximo à borda leste da bacia, onde o embasamento está mais profundo.

A área de estudo (Espaço Alfa) apresenta afloramentos do Grupo Massacará (Formação São Sebastião), da Formação Marizal e do Grupo Barreiras.

A Formação Marizal encontra-se sobreposta à Formação São Sebastião de forma discordante e apresenta uma espessura máxima de 20m na área em questão. A espessura da Formação São Sebastião na Bacia do Recôncavo varia de 30m a 2800m, possuindo até 1000m de sedimentos saturados com água doce (Leite, 1964).

Espessas camadas de arenitos, intercalados por folhelhos e siltitos (por muitas vezes lenticulares) compõem a Formação São Sebastião. A coloração e granulometria destes arenitos varia bastante. De acordo com geólogos da Petrobrás (Viana *et al.*, 1971) a Formação São Sebastião é dividida em três membros: Paciência, Passagem dos Teixeiras e Rio Joanes.

Membro Paciência: constituído por um arenito de granulação fina a grossa, quartzoso, com matriz caulínica, apresentando colorações que variam de branco a cinza;

Membro Passagem dos Teixeiras: formado por arenitos cinzas, amarelos e rosados com camadas de siltitos, possuindo estratificações cruzadas, sendo, porém, mais comuns estruturas de escorregamento subaquosas;

Membro Rio Joanes: composto principalmente por arenitos vermelhos e amarelos, sendo

comum a presença de estratificações cruzadas. Seus sedimentos podem estar recobertos de forma discordante pelos sedimentos da Formação Marizal e Grupo Barreiras, ou ainda pelas areias de dunas e de aluviões recentes.

A Formação Marizal e o Grupo Barreiras são mais recentes que o Grupo Massacará, sendo a primeira constituída por um conglomerado basal e arenitos variegados, tendo sido depositada por sistemas fluviais entrelaçados, associados a leques aluviais. Já o Grupo Barreiras é composto principalmente por arenitos, possuindo 30m a 40m de espessura máxima na Bacia do Recôncavo. Não há informações suficientes que permitam identificar a presença de sedimentos do Barreiras na área estudada, contudo eles podem estar presentes em alguns pontos de topografia mais elevada, não apresentando, porém, grandes espessuras. Já a formação Marizal aparece na parte norte da área estudada, próxima aos poços PP140/01 e PP140/02.

É importante salientar a existência de depósitos aluviais do Quaternário na área em questão. São sedimentos pouco representativos e de ocorrência restrita, apresentando pequena espessura, preenchendo vales e baixadas.

1.2 Hidrogeologia

A Formação São Sebastião representa o aquífero mais importante da Bacia do Recôncavo. Dela vem parte da água que abastece o Complexo Industrial de Camaçari, o Centro Industrial de Aratu, além de vários municípios da região e pequenos povoados locais. Além de quantidade, este aquífero se destaca pela qualidade mineral da sua água.

A Bacia do Recôncavo possui um fluxo regional de água subterrânea partindo de O-NO para S-SE. Este fluxo é concordante com o mergulho regional dos estratos. Localmente há variações no fluxo, devido à existência de falhas, heterogeneidades e também por influência do bombeamento em poços de produção. Segundo Lima (1999), existe um paralelo muito forte entre as linhas de fluxo subterrâneo e as de fluxo superficial.

O aquífero São Sebastião cobre uma área de aproximadamente 7000 km² (o que representa cerca de 2/3 da área da Bacia do Recôncavo). Sua espessura varia bastante, como foi dito anteriormente, entretanto, na área de estudo pode chegar a mais de 1000m.

Pouco espessos, a Formação Marizal e o Grupo Barreiras encontram-se normalmente relacionados a altos topográficos na região de Camaçari-Dias D'Ávila. Do ponto de vista da hidrogeologia, constituem um componente freático pouco expressivo em relação ao sistema aquífero Recôncavo. Contudo, desempenham papel fundamental na recarga (natural e induzida) do aquífero São Sebastião.

Geralmente, os arenitos da Formação São Sebastião são bastante porosos e permeáveis.

Podemos considerar como valores médios para os primeiros 500m da formação uma porosidade de 27,5% e permeabilidade de $1,80 \times 10^{-3}$ cm/s (para os arenitos), de acordo com Lima (1993).

Apesar da predominância de arenitos, algumas camadas espessas de folhelhos ocorrem na Formação São Sebastião confinando o fluxo hidráulico. Porém o mergulho natural da formação associado a sistemas de falhas gravitacionais que a recortam torna este confinamento bastante irregular. A heterogeneidade da Formação proporciona a ocorrência de efeitos de confinamento local também devido à presença de camadas impermeáveis e semi-permeáveis sem continuidade lateral a nível regional. Também é possível a existência de níveis suspensos. Em geral, o topo da Formação São Sebastião acoplado à Formação Marizal pode ser considerado como um sistema aquífero livre. Esse sistema livre tem espessura bastante variada, de alguns poucos metros a centenas de metros. Ao que tudo indica, essa espessura aumenta de NO para SE na região do Espaço Alfa. Abaixo deste sistema livre, dentro da própria Formação São Sebastião, encontra-se um sistema multi-confinado e bastante espesso.

1.3 Reconhecimento de litofácies

O zoneamento de litofácies da Formação São Sebastião foi proposto por Lima (1999), com base em uma série de perfis geofísicos de poços, descrições de amostras de calha e de testemunhos, além de comparações com dados de afloramentos, na área de Camaçari-Dias D'Ávila.

Segundo este zoneamento, as seções atualmente exploradas dentro do aquífero São Sebastião estão completamente dentro dos membros médio (Passagem dos Teixeiras) e superior (Rio Joanes). O limite entre estes dois membros está muito bem caracterizado por uma seqüência argilosa de extensão regional, sendo facilmente identificado em perfis elétricos.

Os poços que exploram água do Membro Passagem dos Teixeiras encontram-se a noroeste da falha de Camaçari, onde esta unidade, geralmente em subsuperfície, encontra-se a uma menor profundidade que na parte sudeste da falha.

A sudeste da falha de Camaçari localiza-se o Espaço Alfa. Ao que tudo indica, um bloco rebaixado em relação ao bloco noroeste. Todos os poços desta área possuem seções filtrantes no Membro Rio Joanes. Em alguns poços, na base, aparece a camada limite (um folhelho) a uma profundidade mínima aproximada de 320m. Este embasamento condutivo, de extensão regional, foi denominado por Lima (1999) como Seqüência Argilosa Superior (SAS) do Membro Passagem dos Teixeiras e possui espessura entre 80 e 120 metros, confinando o fluxo hidráulico no Membro Passagem dos Teixeiras. De fato, nenhum dos poços da área atravessa totalmente esta camada, indicando espessura superior a 80 metros.

A partir da SAS, em ordem estratigráfica ascendente, sucedem-se as cinco litofácies

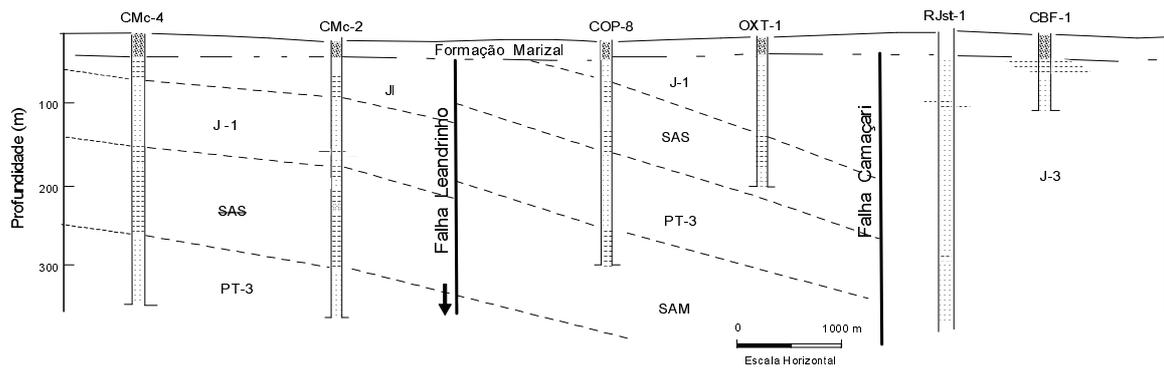


Figura 1.1: Seção geológica transversal da região de Camaçari-Dias D'Ávila orientada de NO para SE (extraída de Lima, 1999)

componentes do Membro Rio Joanes são: (1) Fácies Arenosa J1, (2) Fácies Argilosa JI, (3) Fácies Arenosa J2, (4) Fácies Argilosa JM e (5) Fácies Arenosa J3, descritas por Lima(1999) da seguinte forma:

1) Fácies Arenosa J1 - A parte basal do Membro Rio Joanes é composta de uma sucessão vertical de bancos arenosos caracterizados por erosão basal e acamadamento gradacional em direção ao topo. Os arenitos são laranja avermelhados a castanho avermelhados, conglomeráticos com seixos de quartzo e de folhelhos, e portadores de estratos cruzados na parte da base; passam a arenitos friáveis, maciços, de granulação média a fina, mas com níveis esparsos de grânulos, seixos quartzosos e pelotas de argilas; tornam-se finamente granulados no topo, argilosos e micáceos, e com estratificação cruzada tabular; finalmente, são recobertos por folhelhos castanho-avermelhados, bandeados com siltitos e arenitos finos, na zona de transição. Os folhelhos, pobres em fósseis, podem conter diques centimétricos de arenitos finos, níveis limoníticos e nódulos de manganês.

2) Fácies Argilosa JI - Folhelhos castanho-avermelhados, duros, com intercalações de siltitos e arenitos finos argilosos. Sua espessura pode atingir de 15 a 20 metros.

3) Fácies Arenosa J2 - Lençóis empilhados de arenitos rosa a cinza-amarelados, de granulometria média a fina, mas localmente conglomeráticos, separados por intercalações métricas de folhelhos e siltitos micáceos. Acumulam uma espessura da ordem de 200m e mostram padrões elétricos similares aos de J1.

4) Fácies Argilosa JM - Folhelhos castanho-amarelados e cinza esverdeados, maciços, bandeados e com fissilidade irregular, com intercalações de siltitos e arenitos finos argilosos, como acima. Incluem diques centimétricos de siltitos argilosos. Espessura em torno de 15m. JI e JM possuem características diagnósticas que permitem utilizá-los em estudos de

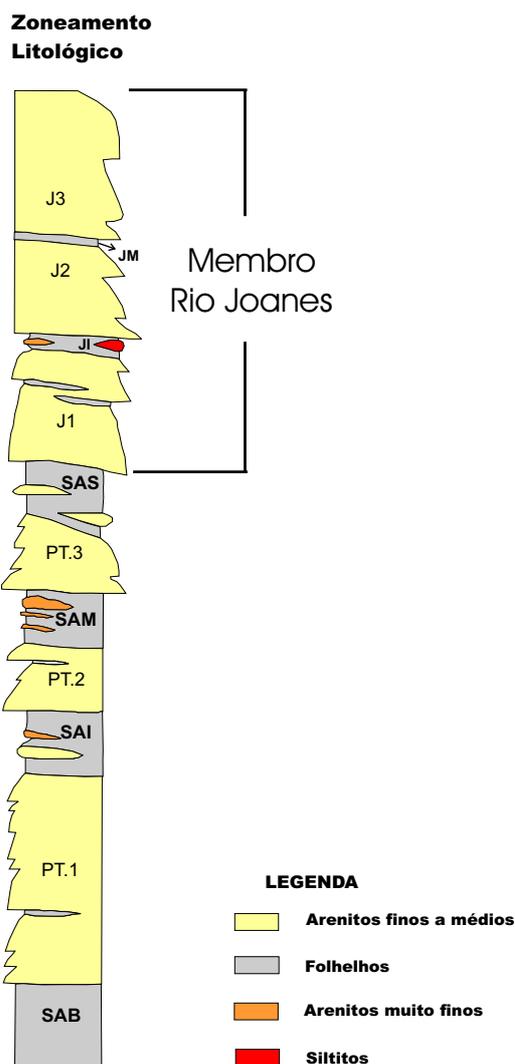


Figura 1.2: Coluna composta pelos membros Rio Joanes e Passagem dos Teixeiras, segundo o zoneamento de litofácies proposto por Lima (1999) para a Formação São Sebastião na região de Camaçari-Dias D'Ávila.

correlação litoestratigráfica mas, provavelmente, não são de extensões regionais.

5) Fácies Arenosa J3 - Arenitos cinza, rosa e alaranjados, friáveis, de granulação fina a média, em estratos cruzados acanalados e tabulares de ângulos altos. Níveis esparsos de materiais mais grosseiros com seixos e grânulos acentuam essa estratificação. Intercalam-se níveis de folhelhos castanho avermelhados, físeis, siltosos e micáceos, de até 5m de espessura, como em J2. Espessura composta de, pelo menos, 250m.

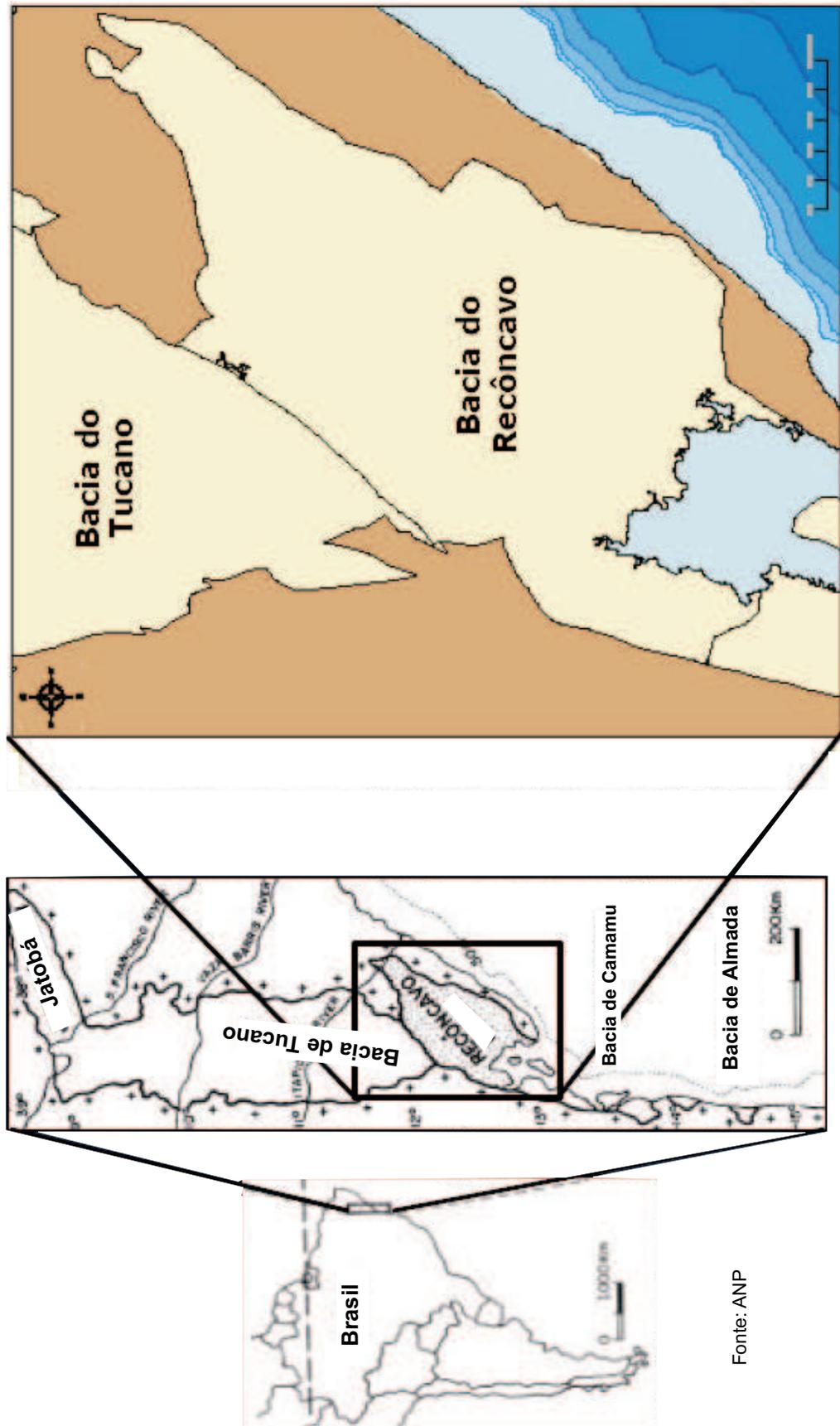


Figura 1.3: Mapa de situação da bacia sedimentar do Recôncavo.

SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DA BACIA DO RECÔNCAVO RECÔNCAVO BASIN SCHEMATIC CROSS-SECTION

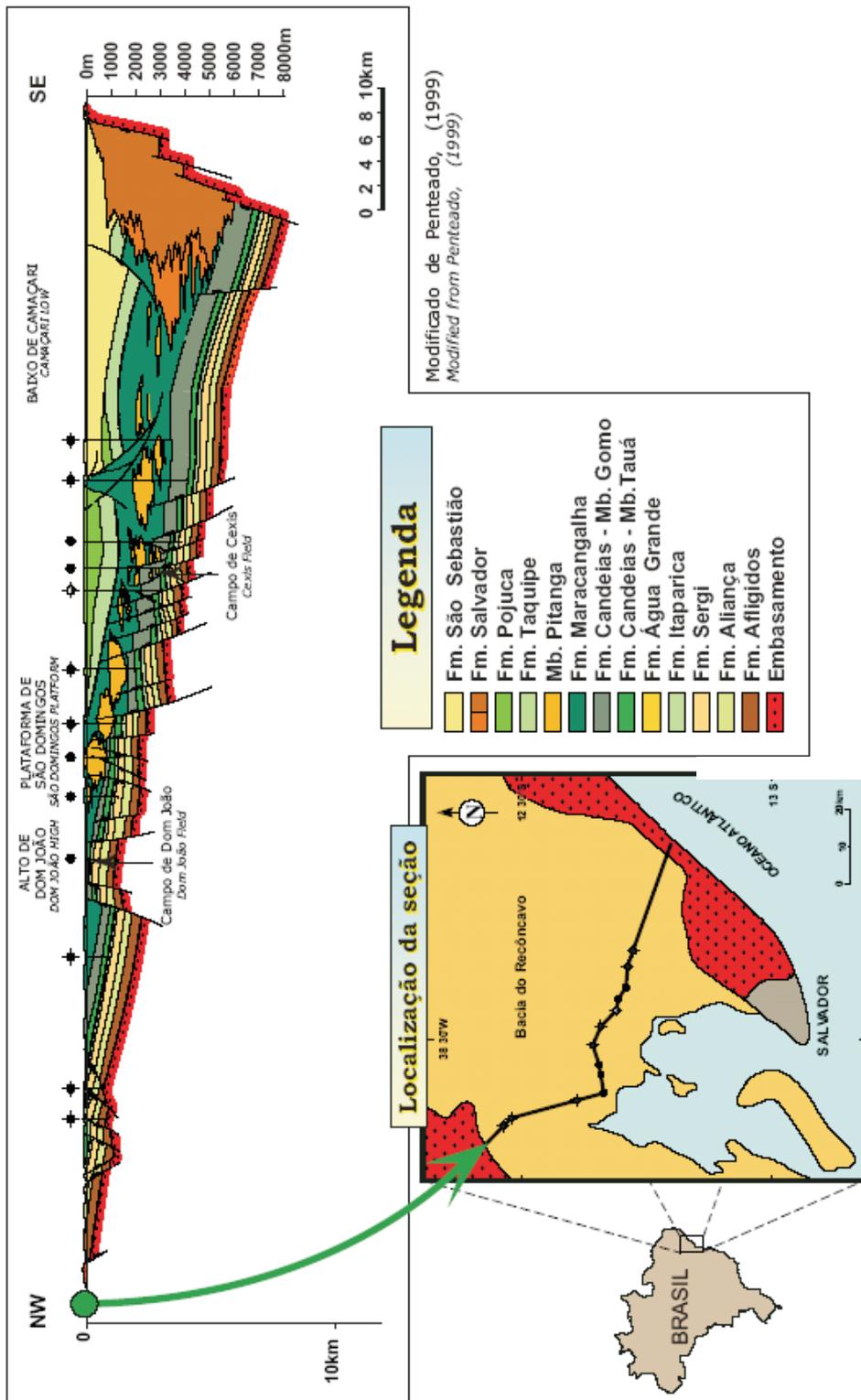


Figura 1.4: Seção Geológica Esquemática da Bacia do Recôncavo, mostrando a conformação estrutural do Baixo de Camaçari (modificado de Penteado,1999).

Fonte:ANP

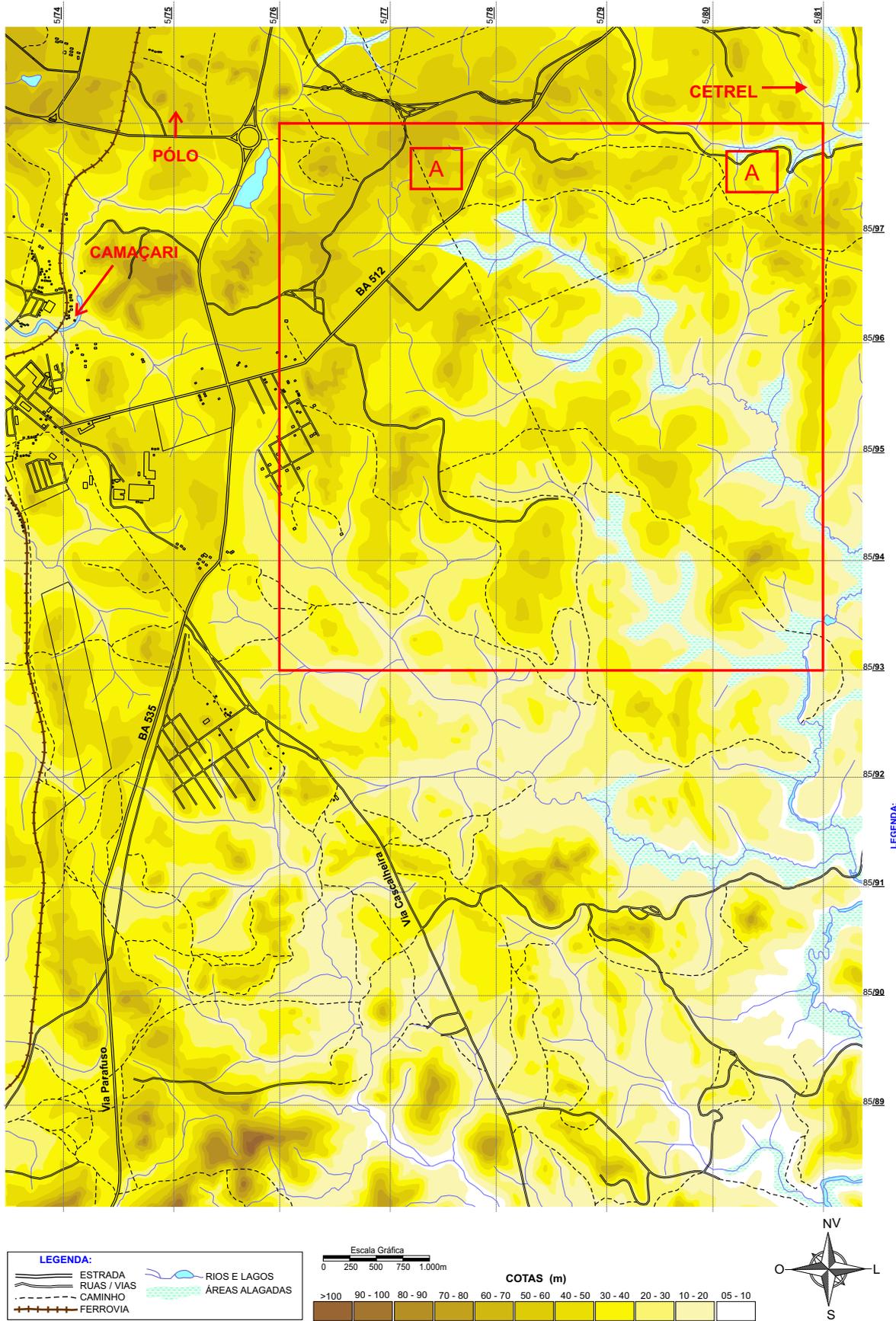
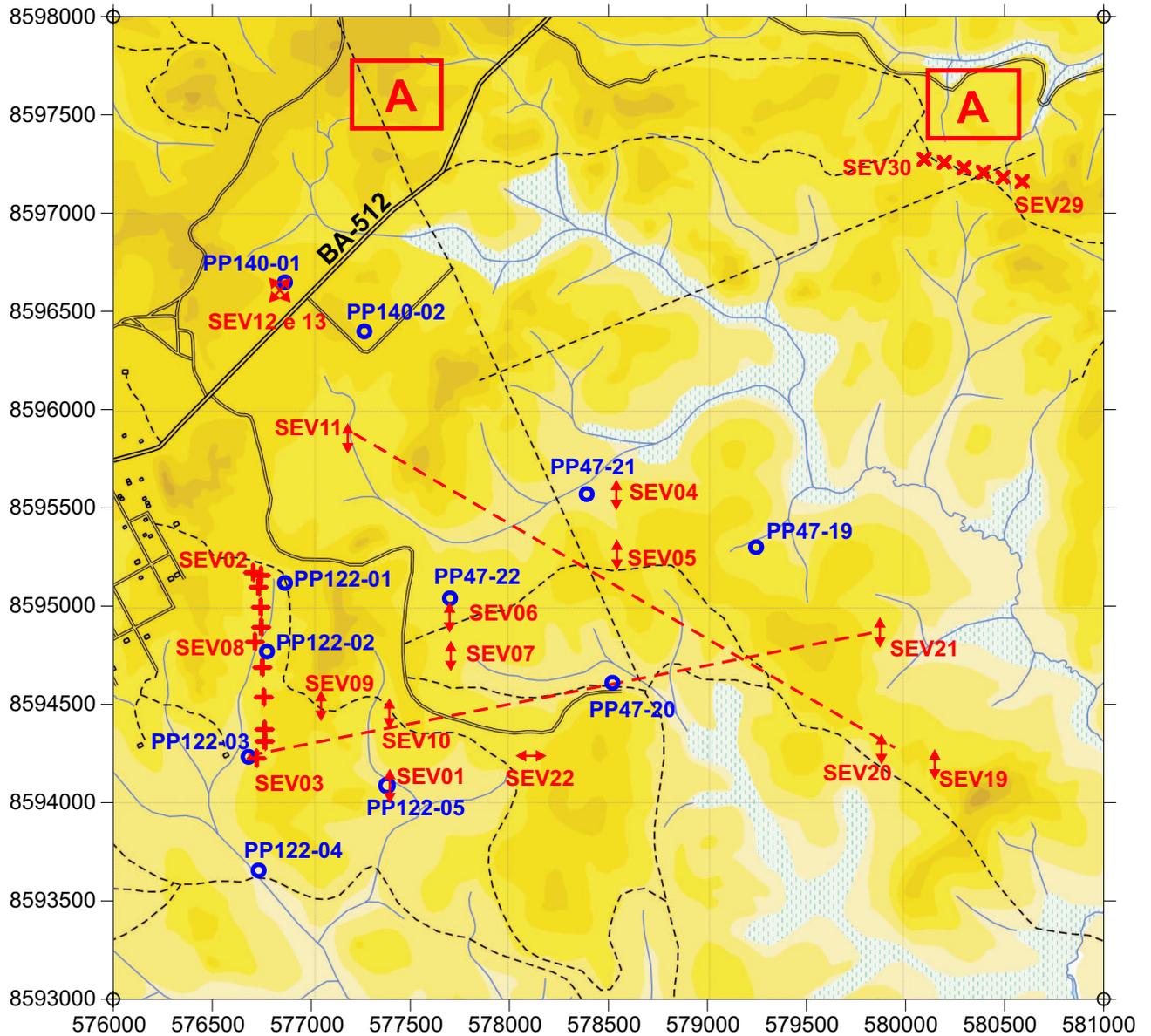


Figura 1.5: Mapa da região do Espaço Alfa com cotas topográficas.

**LEGENDA:**

- | | |
|------------------|---|
| SEV07 ↓ | SONDAGENS (DIREÇÃO DE EXPANSÃO INDICADA) |
| SEV30 × | SONDAGENS ATRÁS DO ATERRO DA LIMPEC (EXPANSÃO NO-SE) |
| SEV02 + | SONDAGENS DA ESTRADA DOS POÇOS DA EMBASA (EXPANSÃO N-S) |
| PP47-20 ○ | POÇOS DE PRODUÇÃO |
| - - - - | SEÇÕES GEOELÉTRICAS |
| A | ATERRO SANITÁRIO |
| == | ESTRADA |
| — — — | RUAS / VIAS |
| - - - - | CAMINHO |
| —+—+—+— | FERROVIA |
| ~ ~ ~ | RIOS E LAGOS |
| ~~~~~ | ÁREAS ALAGADAS |

COTAS (m)

- | | |
|----------------------|----------|
| Dark Brown | >100 |
| Brown | 90 - 100 |
| Light Brown | 80 - 90 |
| Yellowish Brown | 70 - 80 |
| Yellow | 60 - 70 |
| Light Yellow | 50 - 60 |
| Very Light Yellow | 40 - 50 |
| Lightest Yellow | 30 - 40 |
| Very Lightest Yellow | 20 - 30 |
| Off-white | 10 - 20 |
| White | 05 - 10 |

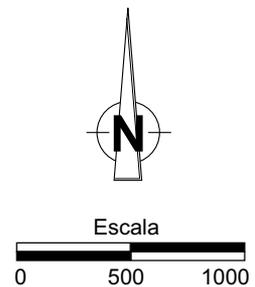


Figura 1.6: Detalhe do mapa anterior com a localização das SEVs e poços de produção. Escala em metros.

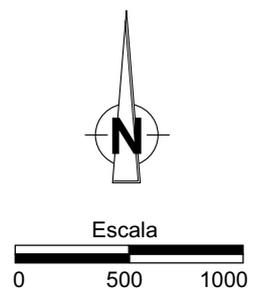
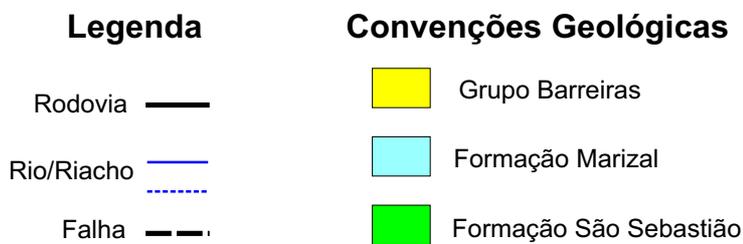
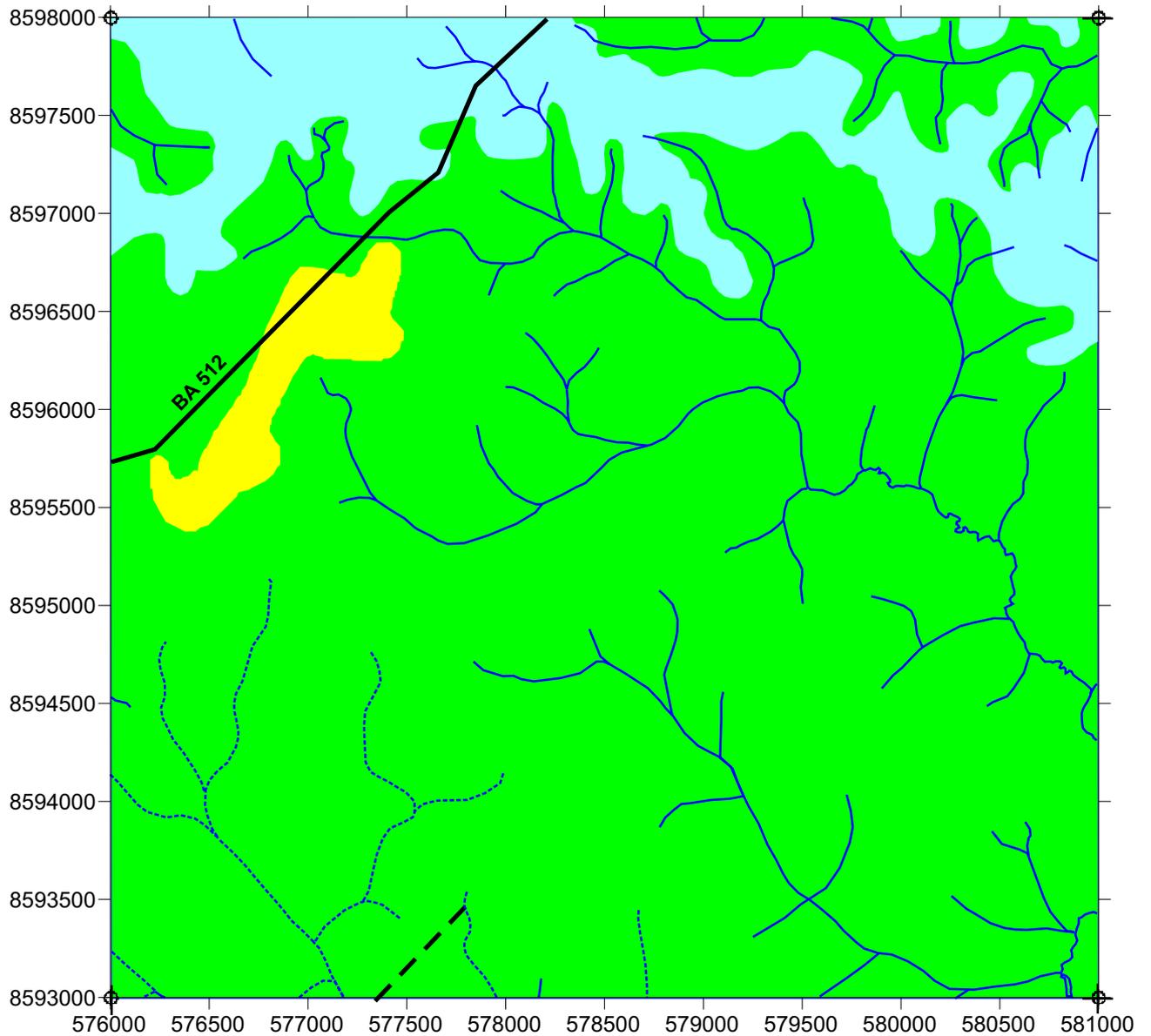


Figura 1.7: Detalhe do mapa geológico da Petrobrás mostrando afloramentos na área de estudo.

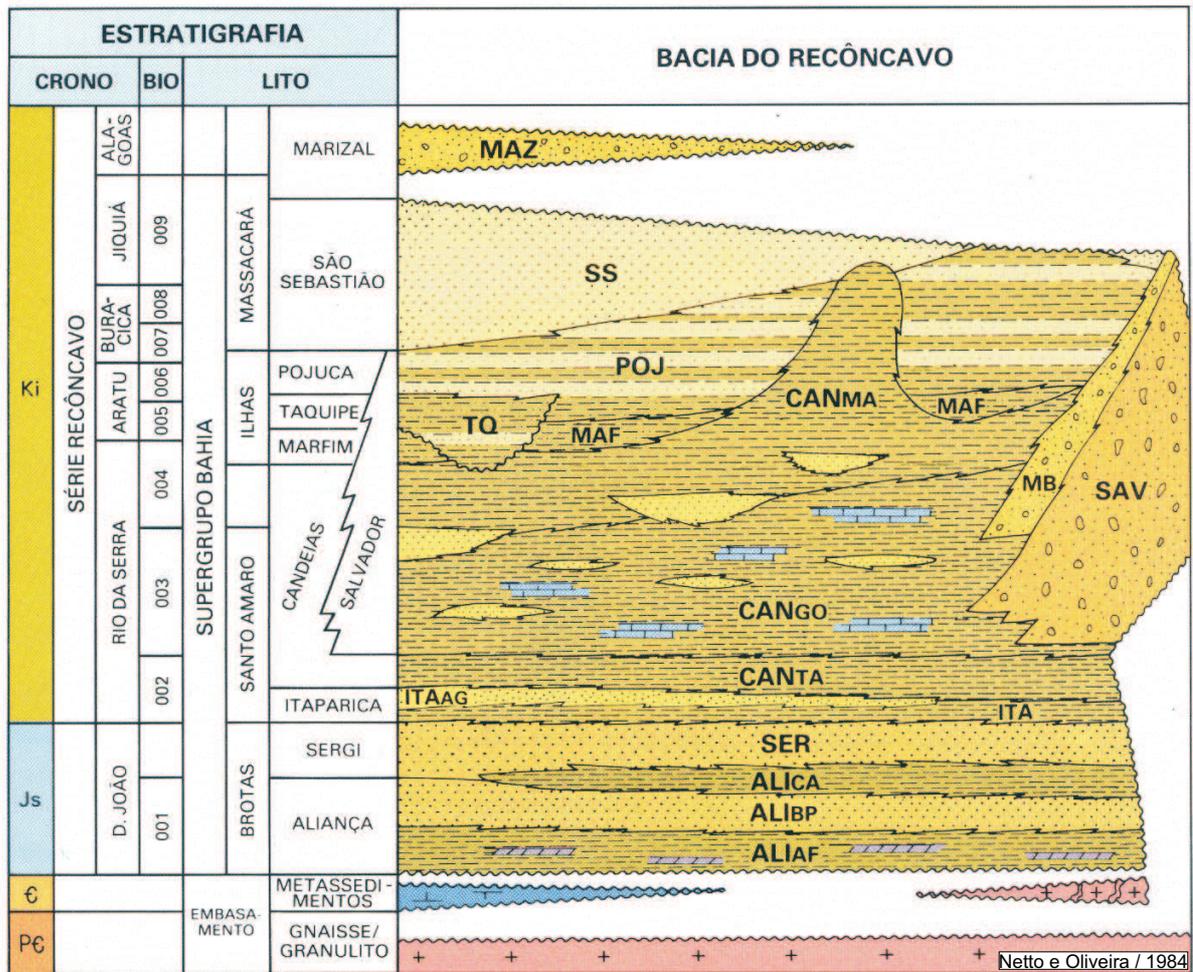


Figura 1.8: Coluna Estratigráfica da Bacia do Recôncavo (segundo Netto e Oliveira, 1984).

CAPÍTULO 2

Bases Teóricas dos Métodos Geoelétricos

2.1 Propriedades Elétricas das Rochas

As resistividades elétricas das camadas rochosas na crosta terrestre são controladas basicamente pela condução eletrolítica em meio aquoso, através dos poros destas rochas, fraturas, falhas ou zonas de cisalhamento. Esse princípio é válido para camadas mais superficiais da crosta, com profundidades de até 15 quilômetros. Neste processo eletrolítico, os agentes de transporte das cargas elétricas são íons oriundos da dissociação de sais. A salinidade da água de formação é então um fator que influencia a resistividade da rocha. Uma maior quantidade de íons dissolvidos representa uma maior capacidade de conduzir a corrente elétrica (condutividade). Existem ainda outros fatores importantes no que diz respeito às propriedades elétricas do meio, com destaque para a porosidade, argilosidade e saturação.

O efeito da porosidade na resistividade das rochas foi bastante estudado por Archie na primeira metade do século passado, resultando em uma fórmula bastante conhecida que relaciona as resistividades da rocha (ρ) com a da água de formação (ρ_w), a saturação em água (S_w) e a porosidade (ϕ) da seguinte forma:

$$\rho = a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_w \quad (2.1)$$

onde a , m e n são constantes. Podemos definir ainda o fator de formação (F) como sendo ρ/ρ_w . Como vemos na fórmula 2.1, porosidade e resistividade da rocha são inversamente proporcionais. O mesmo acontece com saturação e resistividade.

A presença de argilominerais diminui a resistividade da rocha. Os argilominerais funcionam como um caminho adicional superficial para a condução da corrente elétrica. Isso ocorre porque eles possuem cargas negativas distribuídas em sua superfície. Estas cargas atraem cátions, que formam uma camada fixa em volta do argilomineral, ligados fortemente por atração eletrostática. Outros íons encontram-se ainda distribuídos em volta da camada fixa, constituindo uma camada difusa. Nesta camada as forças de natureza eletrostática não são suficientes para imobilizar os íons, que podem se mover quando submetidos a um campo elétrico. Essa é a razão pela qual a argilosidade aumenta a condutividade das rochas. A figura 2.1 contém alguns intervalos característicos de valores de resistividade elétrica para tipos comuns de rochas da crosta terrestre.

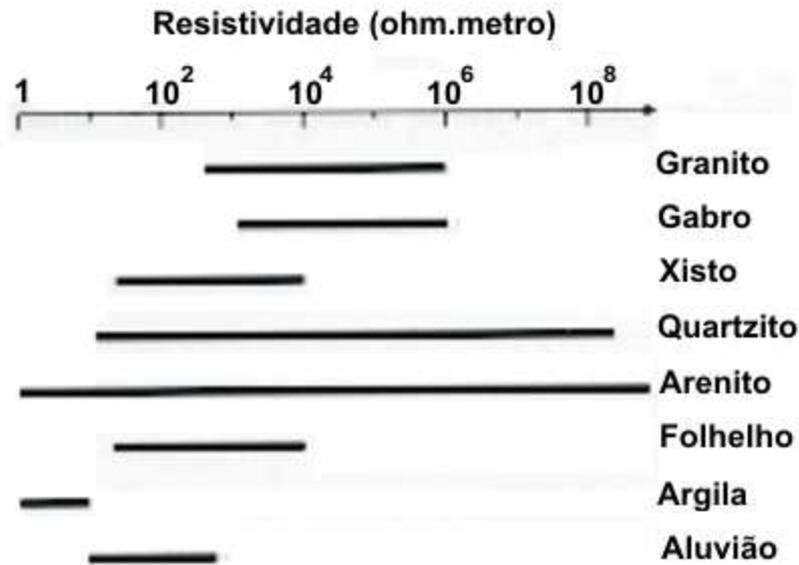


Figura 2.1: Valores típicos para resistividade de diferentes tipos de rochas (modificado de Kearey, Brooks & Hill (2002)).

2.2 Fundamentos do Método Elétrico

De acordo com Ward (1990), os métodos da eletroresistividade e de polarização induzida baseiam-se na medida da impedância elétrica entre conjuntos de eletrodos e a terra, visando o conhecimento das propriedades elétricas do meio. Esse conhecimento, por sua vez, dá subsídios para a criação de modelos geológicos da área estudada. Isso é possível através do conhecimento prévio das propriedades elétricas dos minerais e rochas e da comparação com modelos geológicos já conhecidos.

Para obter a impedância da terra, é utilizado um arranjo com no mínimo quatro eletrodos enterrados, dois para injetar corrente na terra (eletrodos de corrente) e dois para medir o potencial elétrico (eletrodos de potencial) acoplados a um equipamento capaz de medir a intensidade da corrente elétrica, a impedância do circuito e a diferença de potencial entre os eletrodos. Os equipamentos mais modernos têm a capacidade de fazer todas essas medidas de forma sincronizada e cíclica, controlando a corrente induzida na terra e fazendo correções estatísticas dos dados obtidos. As medidas podem ser feitas no domínio do tempo ou da frequência.

Nas medidas de impedância no domínio da frequência a corrente de entrada é uma onda senoidal (geralmente) de frequência f e período T . O sinal recebido tem componentes real (em fase) e imaginária (em quadratura). A amplitude e a fase do sinal recebido são calculadas a partir das amplitudes de pico dos componentes real (Re) e imaginária (Im).

$$A = (Re^2 + Im^2)^{1/2} \quad (2.2)$$

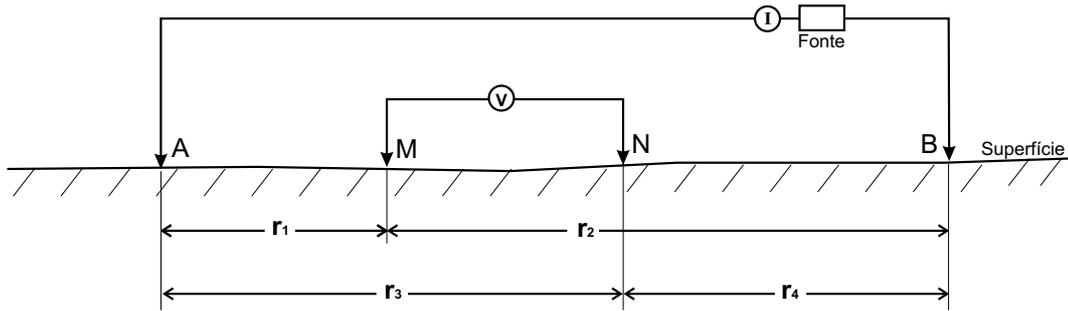


Figura 2.2: Arranjo genérico de 4 eletrodos em medidas elétricas de campo.

$$\phi = \arctg\left(\frac{Im}{Re}\right) \quad (2.3)$$

No domínio do tempo, uma corrente DC é ligada e desligada de forma periódica. O sinal recebido é a voltagem medida em vários períodos enquanto a corrente está ligada (para a função ρ_a) e enquanto está desligada (para a função m_a).

As medidas no domínio do tempo e da frequência estão diretamente relacionadas através da Transformada de Fourier. Isso proporciona ao geofísico maior liberdade para escolher a forma de aquisição e de tratamento dos dados (domínio do tempo ou da frequência).

Em campo, os eletrodos de potencial (M e N) medem a diferença de potencial entre dois pontos na superfície (figura 2.2). Esta diferença de potencial, por sua vez, está relacionada com a corrente elétrica propagada em subsuperfície (I), com a resistividade do meio (ρ) e as distâncias relativas entre os eletrodos de corrente e potencial (r_1, r_2, r_3, r_4) pela equação:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (2.4)$$

Em um levantamento, as variáveis I , r_1, r_2, r_3 e r_4 são conhecidas e controladas pelo operador. O ΔV é medido, permitindo assim o cálculo de ρ na forma

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (2.5)$$

onde

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} \quad (2.6)$$

Para um meio homogêneo e isotrópico a resistividade calculada pela fórmula acima será constante para qualquer valor de corrente, qualquer arranjo de eletrodos ou local na superfície do semi-espço. Havendo heterogeneidades, entretanto, a resistividade calculada varia com as posições relativas dos eletrodos. Pode variar também à medida que o arranjo é movido, devido a variações laterais da resistividade em subsuperfície. Em virtude disso, chamamos esta resistividade calculada da expressão 2.5 a partir de medidas de campo, de função resistividade aparente (ρ_a). Ela representa uma composição complexa das resistividades reais das

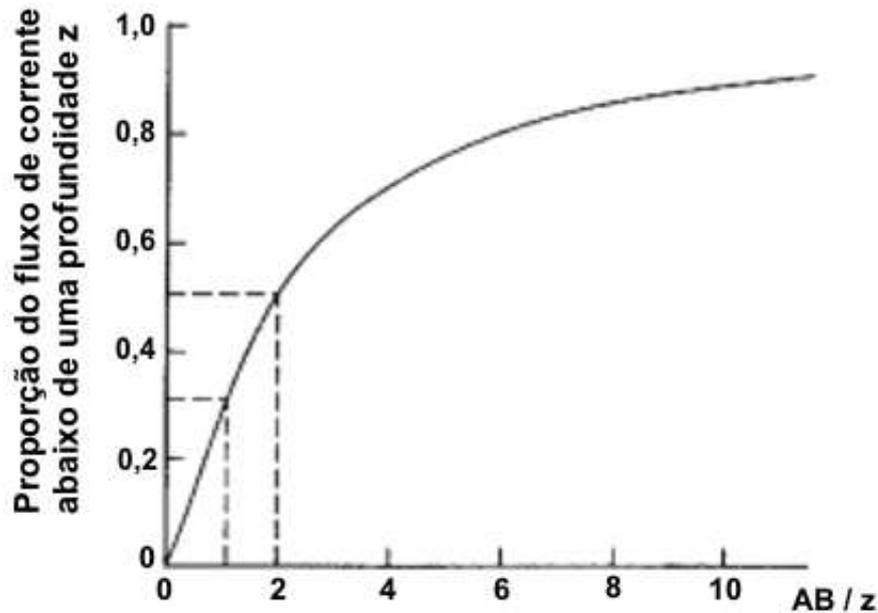


Figura 2.3: Curva mostrando a profundidade de penetração de corrente no solo com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente (segundo Telford, *et al.*, 1990).

diferentes camadas e da geometria estrutural dos meios envolvidos. Reescrevendo a equação 2.5 para condições reais de campo:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (2.7)$$

Em um meio homogêneo, a profundidade de penetração da corrente aumenta à medida que aumenta a separação dos eletrodos de corrente, A e B (figura 2.3). Então, devemos escolher a distância entre os eletrodos de corrente de modo que a energia penetre o meio na profundidade desejada. O limite de profundidade de penetração da energia está diretamente relacionado ao limite de detecção de camadas (ou estruturas) ou limite de resolução do método. Isso quer dizer que o método só nos proporciona informações da região em subsuperfície que foi devidamente energizada - levando-se também em conta os limites de detecção do aparelho utilizado. Na prática, esse é um fator que limita a profundidade de investigação do método, em virtude da dificuldade de se levar para o campo longas extensões de cabos, além da potência dos equipamentos existentes que nem sempre é suficiente para energizar regiões de interesse (em grandes profundidades).

É também importante salientar que as propriedades físicas e as geometrias dos meios influenciam na profundidade de investigação, afinal de contas, estamos lidando com correntes elétricas. A distribuição das linhas de fluxo, e conseqüentemente a forma das superfícies equipotenciais, depende das propriedades elétricas e da configuração geométrica dos meios investigados (figuras 2.6 e 2.7).

2.2.1 Procedimentos de Aquisição dos Dados

Existem dois tipos principais de procedimentos, a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico (CE). Existe ainda a possibilidade da combinação dos dois procedimentos anteriores.

As técnicas de sondagem geofísica, independente do método utilizado, são aquelas que buscam detectar e estudar as variações das propriedades físicas do meio na direção vertical. No caso do método elétrico, os eletrodos são expandidos em superfície (na horizontal), visando detectar variações de resistividade do meio com o aumento da profundidade (na direção vertical).

Técnicas de perfilagem são aquelas que visam detectar e estudar variações de propriedades físicas do meio na direção do levantamento. O caminhamento elétrico é um tipo de perfilagem elétrica, já que os eletrodos são deslocados na direção horizontal, com o objetivo de detectar variações da resistividade do meio também na direção horizontal (variações laterais).

Atualmente, já se fala muito em tomografia elétrica. Equipamentos modernos já permitem que se faça um procedimento misto, obtendo variações das propriedades elétricas do meio em duas, e até três dimensões. A combinação entre sondagem e perfilagem não é uma novidade. Porém, novos equipamentos possuem sistemas multi-eletrodos que permitem maior agilidade em campo. Em alguns casos, pode-se também instalar eletrodos em poços e utilizá-los em arranjos mistos (eletrodos em poço e em superfície). Na prática, o aperfeiçoamento destas tecnologias tem permitido uma maior utilização comercial dos métodos elétricos, principalmente na área ambiental e em geotecnia.

2.2.2 Tipos de Arranjos de Eletrodos

Há uma variedade de arranjos existentes, cada qual possuindo vantagens e desvantagens em relação aos outros. Estas vantagens e desvantagens estão relacionadas a: resolução ou capacidade de discriminação (na vertical e na horizontal), profundidade de exploração, velocidade do levantamento (ou praticidade na aquisição dos dados), espaço disponível para expansão dos eletrodos e limitações tecnológicas dos equipamentos. Com base nestas características, e nos objetivos do estudo a ser realizado é que definimos o arranjo a ser utilizado no levantamento.

Dentre a grande variedade de arranjos existentes, os mais conhecidos e testados são os seguintes: Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo.

No arranjo Schlumberger (fig. 2.4), utilizado no trabalho, os eletrodos de potencial (M e N) são fixados entre os de corrente (A e B), e a uma distância l do centro do arranjo. A

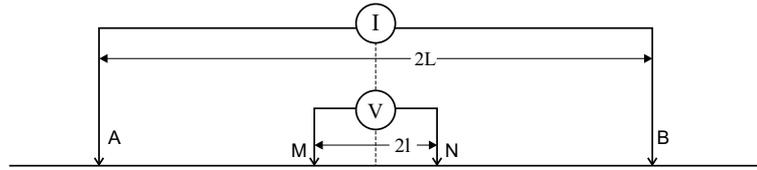


Figura 2.4: Arranjo Schlumberger de eletrodos.

$$L \gg l.$$

distância entre os eletrodos de corrente e o centro do arranjo é igual a L . O fator geométrico (K) para o arranjo Schlumberger é dado por:

$$K = \frac{L^2}{4l} \quad (2.8)$$

Substituindo na expressão para ρ_a :

$$\rho_a = \frac{\pi L^2 \Delta V}{2l I} \quad (2.9)$$

Em uma sondagem, os eletrodos A e B são expandidos, enquanto que M e N continuam fixos. Quando o valor da diferença de potencial entre M e N chega a um valor próximo do limite mínimo de detecção do aparelho é necessário aumentar o seu espaçamento. Dentre as vantagens deste arranjo estão a boa resolução vertical, a praticidade em campo e a grande quantidade de aplicativos para inversão disponíveis. Estas características tornam o arranjo Schlumberger ideal para SEVs.

2.2.3 Inversão dos Dados

Existem diferentes técnicas de inversão unidimensional, mas o objetivo de todas é o mesmo: obter um modelo de n camadas horizontais, cada qual com uma resistividade (ρ) e espessura (h) específicas (figura 2.8). Neste momento surge o problema da ambigüidade, bem conhecido dos geofísicos, uma vez que diferentes modelos podem gerar respostas equivalentes numericamente, dentro de um limite de erro pré-estabelecido.

No caso de uma sondagem elétrica vertical utilizando arranjo Schlumberger, os dados de resistividade aparente obtidos em campo são plotados em papel log-log juntamente com os valores de $AB/2$. Cada par $(AB/2, \rho_a)$ representa um ponto da curva de resistividade aparente, como mostrado na figura 2.5.

O modelo proposto gera uma curva teórica, que deve se ajustar bem aos dados de campo. Para se chegar a esse modelo existem métodos gráficos (método do ponto auxiliar) ou matemáticos, relacionados a diferentes algoritmos de inversão.

Existe uma vasta bibliografia acerca da teoria dos métodos elétricos. Para mais detalhes ver Ward (1990) e Keller & Frischknecht (1966).

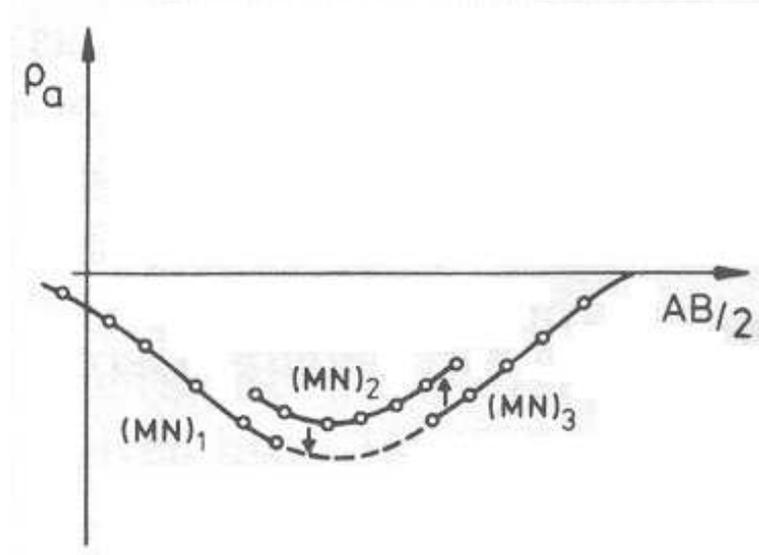


Figura 2.5: Curva exemplo da função resistividade aparente para o arranjo Schlumberger de eletrodos (extraído de Parasnis, 1996)

2.2.4 Aplicações

Os métodos elétricos são utilizados rotineiramente em exploração mineral, de água subterrânea e estudos ambientais, principalmente. Também são muito úteis para estudos geotécnicos e geotermiais.

O mapeamento de falhas, fraturas e zonas de cisalhamento ou alteração das rochas estão entre as principais aplicações destes métodos, sendo úteis para estudos nas diversas áreas citadas no parágrafo anterior. Além disso, podemos também destacar a detecção de nível freático e delimitação de interfaces entre fluidos (dentro de uma mesma camada) como outras das suas aplicações.

Neste trabalho, a sua aplicabilidade está relacionada a: determinação dos níveis freáticos na área estudada, considerando o impacto (rebaixamento) causado pelo bombeamento nos poços da área; a identificação do tipo de aquífero explorado, quanto ao confinamento, visando avaliar a sua vulnerabilidade; e adquirir dados que auxiliem na determinação de um modelo hidrogeológico coerente e detalhado da área em questão.

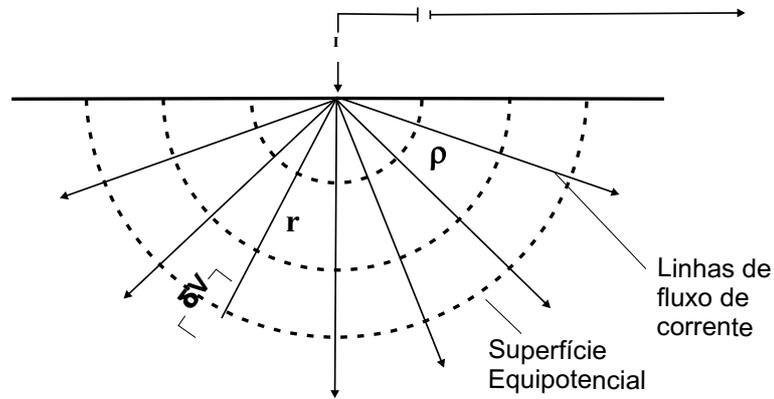


Figura 2.6: Distribuição das linhas de fluxo e configuração de superfícies equipotenciais para um meio isotrópico e homogêneo devido a uma fonte pontual em superfície (modificado de Kearey, Brooks & Hill (2002)).

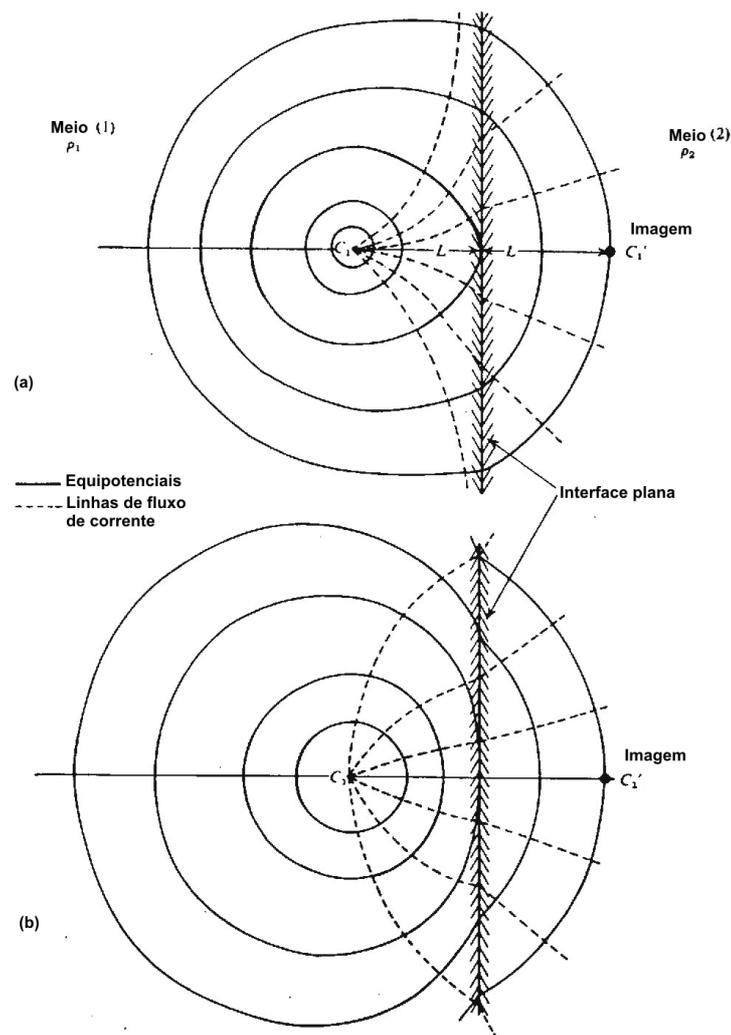


Figura 2.7: Distorção das linhas de fluxo através de uma interface vertical, quando: (a) $\rho_1 > \rho_2$, (b) $\rho_1 < \rho_2$. (Telford *et al.*, 1990).

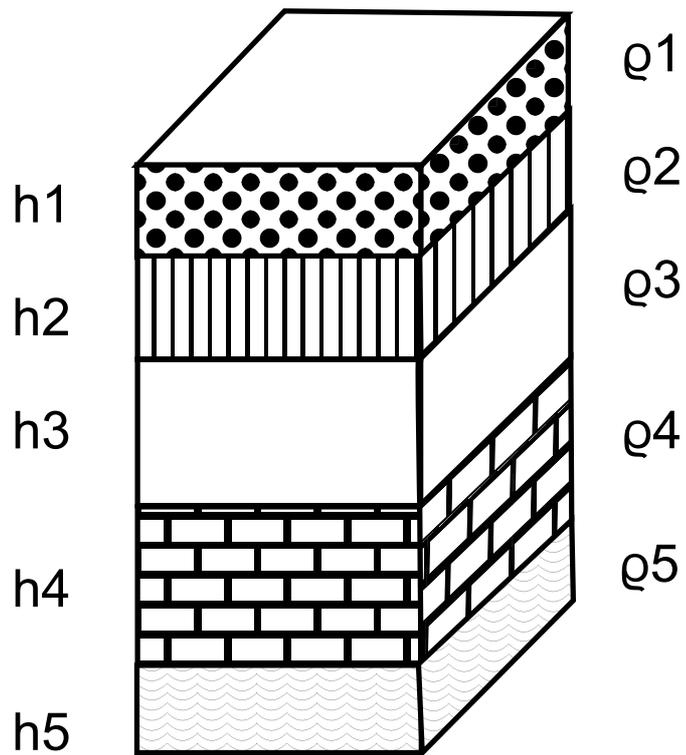


Figura 2.8: Modelo genérico - camadas horizontais homogêneas e isotrópicas (modificado de Reynolds, 1997).

CAPÍTULO 3

Aquisição e Interpretação dos dados

3.1 Aquisição dos dados

As medidas foram realizadas com aquisição simultânea das funções resistividade aparente (ρ_a) e cargabilidade aparente (m_a), esta última amostrada no domínio do tempo.

O equipamento utilizado foi um sistema Syscal R2, fabricado pela Iris Instruments, de propriedade do CPGG/UFBA. Foram utilizados eletrodos metálicos de cobre para fazer contato com a terra.

Foram realizadas 31 sondagens elétricas verticais (SEVs) com o arranjo Schlumberger até abertura máxima entre eletrodos de corrente (AB) variando de 200m a 2000m (AB/2 entre 100m e 1000m). Essa variação existe em decorrência do objetivo de cada sondagem, bem como das restrições impostas pelo ambiente. A orientação preferencial de expansão do arranjo de eletrodos foi definida após uma visita à área, com o objetivo de minimizar os efeitos do mergulho das camadas nos dados adquiridos. Como se sabe, a teoria dos métodos elétricos tem como base um modelo de camadas planas, paralelas e horizontalizadas, além de serem meios homogêneos e isotrópicos, o que dificilmente acontece de fato. Em uma área onde as camadas apresentam mergulho, mesmo que suave, a direção de expansão do arranjo pode representar maior ou menor afastamento entre os modelos real e teórico. Com exceção de nove SEVs (12, 13, 22, 25, 26, 27, 28, 29 e 30), todas foram realizadas com a expansão do arranjo aproximadamente N-S. Os motivos da utilização de diferentes direções para as nove SEVs acima serão explicados posteriormente. As coordenadas UTM dos centros das sondagens foram obtidas em campo com GPS. Os centros de todas as SEVs estão indicados no mapa da figura 1.6 juntamente com a localização dos poços analisados.

Algumas sondagens foram feitas próximas a poços para que através da correlação dos modelos invertidos com perfis litológicos dos poços - quando possível, também com o perfil geofísico - fossem ajustadas as resistividades reais das camadas. Dos onze poços de produção existentes na área, em quatro não foi possível a realização de sondagens próximas, para correlação, como pode ser observado na figura 1.6.

A etapa de aquisição de dados se estendeu do dia 27/05/2003 ao dia 18/06/2003, sendo

realizada ainda uma sondagem no dia 03/07/2003 (SEV31) com o intuito de obter um dado adicional para correlação com o poço PP122/01. A SEV02, que deveria ser utilizada para tanto, apresentou muitas dificuldades na inversão, devido ao formato da curva $(AB/2)x(\rho_a)$, além de estar relativamente longe do poço, o que dificultou a correlação.

Foram encontradas algumas dificuldades para a aquisição dos dados. O período de aquisição coincidiu com o início da estação chuvosa na região. A ocorrência das chuvas propicia a formação de brejos e o aumento de áreas alagadas, impedindo a realização de SEVs em alguns locais ou mesmo uma maior expansão do arranjo de eletrodos. Considerando que foi determinada uma direção preferencial para expansão do arranjo, as restrições são ainda maiores, uma vez que o curso dos rios e canais naturais de drenagem de águas pluviais não coincidem com a direção estabelecida (N-S). Outro fator dificultador foi o relevo local. A presença de alguns morros e a topografia bastante irregular de algumas áreas emersas também restringiu a realização das sondagens. Havia também na área a presença de diversas cercas de arame farpado delimitando pequenas propriedades rurais, problema esse que pôde ser contornado na maioria das situações, apenas resultando em um maior gasto de tempo para a realização das sondagens.

3.1.1 Possíveis Fontes de Erros

A área estudada apresenta algumas particularidades do ponto de vista da geologia que criam dificuldades tanto para a aquisição quanto para a inversão dos dados. Dentre elas, podemos citar com destaque a existência de diversas lentes de argila, camadas sem continuidade lateral. Além disso, as camadas são bastante heterogêneas, o que torna difícil o estabelecimento de um valor de referência de resistividade de uma determinada camada. No momento em que o espaçamento dos eletrodos de potencial (M-N) é aumentado, pode haver uma mudança brusca nas propriedades físicas da camada aflorante, e, por conseqüência, das resistências de contato. O par M-N pode sair ou entrar em uma camada lenticular, sem continuidade lateral, cujo contraste de impedância elétrica com a camada encaixante é muito alto. Isso desloca a curva de resistividade aparente a uma razão proporcional a esse contraste.

Muitas SEVs foram realizadas sobre estradas de terra. Nestas, percebe-se um pico de resistividade logo no início das curvas. A inversão destas SEVs torna-se bastante difícil, pois o efeito dessas finas camadas de solo compactado e seco destas estradas induz inclinações acima de 45° nas curvas, o que não é concebido pela teoria de camadas horizontalizadas. Nas inversões, a resistividade real destas camadas tende a infinito muitas vezes, enquanto que sua espessura tende para valores da ordem de 10cm.

Apesar das sondagens terem sido realizadas em uma área pouco habitada, há algumas prováveis fontes de ruídos. A tubulação que interliga os poços de produção é feita de material metálico (aparentemente ferro), e devido a suas dimensões e sua localização (próxima à

superfície) se constitui em uma provável fonte de ruído, principalmente nas estradas dos poços da Embasa. É possível também que haja alguma influência da tubulação nas sondagens próximas aos poços da Braskem, porém nada muito representativo.

Outro problema é a topografia. As medidas de resistividade são fortemente influenciadas pela topografia irregular de um terreno. Nestes casos, o fluxo de corrente se concentra em vales, enquanto que em morros ele encontra-se mais disperso. O resultado é a distorção das superfícies equipotenciais, produzindo falsas anomalias, podendo mascarar ou distorcer anomalias reais.

Em alguns casos o relevo acidentado tem efeito desprezível sobre o resultado final, pois a variação das cotas topográficas dos eletrodos A, B, M e N é muito pequena em relação à distância entre os eletrodos. Há outros casos, porém, onde o efeito da topografia não pode ser desprezado. As SEVs 06 e 07, por exemplo, foram realizadas em local inclinado, uma espécie de rampa, com uma inclinação aparentemente superior a 10°

3.2 Inversão e Interpretação dos dados

Para inversão dos dados de resistividade aparente foi utilizado um programa de domínio público denominado Resist, de distribuição gratuita. Os dados de cargabilidade aparente não foram tratados, principalmente por uma limitação de tempo, mas encontram-se disponíveis para inversão, caso seja útil futuramente. É importante salientar que os dados de cargabilidade aparente não apresentaram uma qualidade tão boa quanto os de resistividade, contendo muitos valores negativos ou anômalos, o que demandaria mais trabalho para a inversão e interpretação.

Para auxiliar na interpretação foram utilizados os perfis litológicos dos onze poços existentes na área. Destes, três possuem perfis geofísicos (PP140/01, PP122/03 e PP122/04). Também foram utilizados alguns dados de níveis dinâmicos de poços.

A falta de dados precisos de topografia da área dificultou um pouco a interpretação. As cotas topográficas tiveram que ser inferidas a partir de interpolação de curvas de nível de um mapa topográfico da Conder na escala 1:25.000.

A SEV01 foi realizada próxima ao poço PP122/05 da Embasa. O resultado da inversão foi comparado ao perfil litológico deste poço, e o resultado foi conclusivo. A curva $(AB/2) \times (\rho_a)$ para esta SEV possui feição característica, pois representa uma seqüência de 375 metros de arenitos, com pouca ou nenhuma matriz argilosa, comprovado pelo próprio perfil litológico. O nível dinâmico do aquífero neste poço em produção foi inferido em aproximadamente 63m, o que parece bastante coerente com base nas informações de testes de

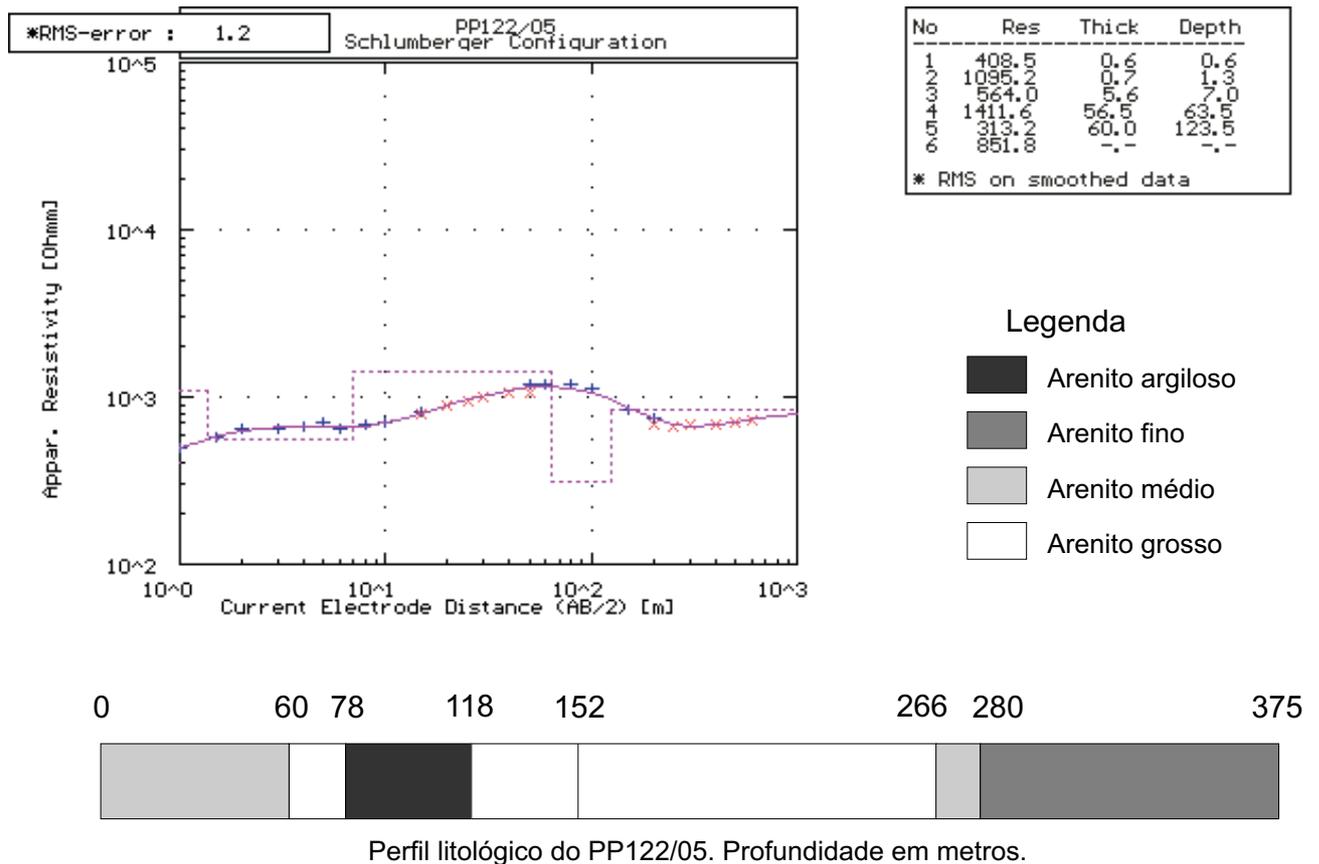


Figura 3.1: Curva de resistividade aparente para a SEV01 e modelo proposto por inversão automática.

bombeamento pré-existent. Note que nesta SEV as curvaturas são bastante suaves, indicando pequenas variações das propriedades físicas, algo incomum no restante deste trabalho. A SEV01 não indica a presença de um substrato condutivo no limite máximo de $AB/2$ utilizado, confirmado pelo perfil litológico do poço. Pode-se dizer que esta é uma curva típica de um local com ótimo potencial para extração de água, mas também bastante vulnerável a contaminação.

A vulnerabilidade de um aquífero é definida como a maior ou menor facilidade que algum fluido ou poluente qualquer tem para alcançar a água contida em seus poros. Além das propriedades físico-químicas da substância poluente, este grau de facilidade é controlado por características intrínsecas do meio, principalmente a permeabilidade, que, como sabemos, em rochas sedimentares está inversamente relacionada a sua argilosidade. Camadas de argila ou folhelho, a depender da sua espessura e extensão, confinam o fluxo hidráulico diminuindo a vulnerabilidade de um aquífero. Já as extensas seqüências arenosas como a da SEV01 possuem grande permeabilidade apresentando alta vulnerabilidade, pois não há nenhuma barreira ao fluxo de fluidos contaminados. O risco de contaminação se dá pela interação entre vulnerabilidade natural (ou intrínseca) e carga contaminante. Sendo assim, um aquífero vulnerável ocupado em superfície por atividades potencialmente contaminantes

seria considerado de alto risco, contudo, estando este mesmo aquífero em área completamente deserta, seria então considerado de baixo risco. Para avaliar corretamente os riscos e a vulnerabilidade é necessária a utilização de uma série de parâmetros relativos às características dos poluentes e da geologia local, porém, neste trabalho nos limitamos à utilização da permeabilidade e existência de fontes poluentes para uma avaliação qualitativa de vulnerabilidade e riscos.

As SEV02, 03 e 08 foram comparadas aos perfis litológicos dos poços PP122/01, PP122/03 e PP122/02, respectivamente. No caso da SEV03, também foi possível utilizar o perfil elétrico do poço para ajuste. Todas as curvas possuem formatos parecidos, apresentando grandes contrastes de resistividade em alguns pontos, e apontando a presença geral de um substrato bem mais condutivo. Estes contrastes são responsáveis por inclinações de quase 45° em todas as curvas. Os perfis geofísicos do poço PP122/03 permitiram correlacionar e identificar algumas das litofácies de acordo com o zoneamento proposto por Lima (1999). Percebe-se claramente a SAS na base do membro Rio Joanes, e os horizontes J1, J2 e J3 (figura II-1 em anexo), já as camadas confinantes JI e JM descritas no capítulo 1 deste trabalho podem não ter correlação com os folhelhos presentes no perfil do poço.

As SEVs realizadas na estrada dos poços da Embasa (02, 31, 14, 15, 16, 08, 17, 18, 24, 23 e 03) possuem comportamentos muito parecidos. No início, existe a influência do revestimento da estrada, resultando em altas resistividades para camadas bastante finas, de difícil ajuste. A próxima camada marcante é uma argila bastante condutiva, de espessura e composição variável ao longo da estrada, que aparece entre 0,5 e 8 metros de profundidade. Esta camada aflora em alguns pontos ao lado da estrada. Após esta argila, ocorre uma camada muito resistiva, provavelmente resultado do rebaixamento nos níveis hidráulicos dos poços. Este nível arenoso não-saturado é responsável pela subida bastante acentuada da curva de resistividade aparente. A curva estabiliza e cai rapidamente ao atingir o nível d'água. A tendência de queda não se altera, indicando um aumento da argilosidade com a profundidade, até chegar a influência dominante do substrato condutivo. Devido às características destas curvas, seria bastante difícil ajustar a parte final sem o auxílio dos perfis de poços.

A pseudo-seção de resistividade aparente da figura 3.2 mostra claramente a camada argilosa superficial apresentando maior condutividade nos centros das sondagens 08 e 24. As curvas de isovalores de 1600 e 2000 Ohm.m abaixo desta camada argilosa representam as seqüências arenosas afetadas pelo rebaixamento dos níveis hidráulicos dos poços e são mais representativas nos centros das SEVs 02 e 03. Nos centros das SEVs 31, 08, 17 e 24 o aquífero é mais argiloso. A pseudo-seção de resistividade aparente é fortemente influenciada pelas variações laterais das propriedades físicas do meio, além do rebaixamento causado pelo bombeamento. Nas seqüências mais argilosas o rebaixamento do nível hidráulico é maior pois a recarga do aquífero é mais lenta dadas as baixas permeabilidades.

As SEVs 09 e 10 foram realizadas em ruas paralelas à estrada dos poços da Embasa,

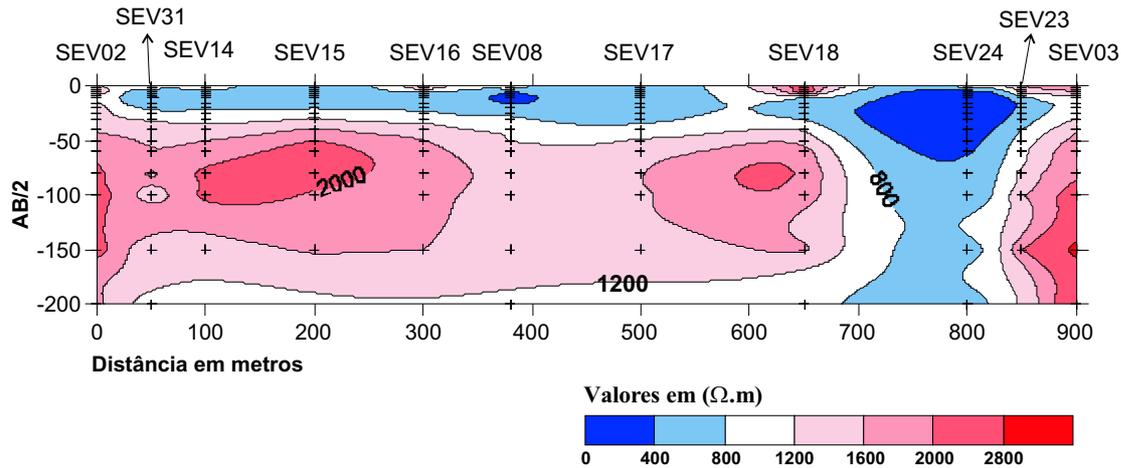


Figura 3.2: Pseudo-seção de resistividade aparente a partir das SEVs 02, 31, 14, 15, 16, 17, 18, 24, 23 e 03. Resistividades em $Ohm.m$.

na mesma latitude (fig. 1.6). Os resultados das inversões destas duas curvas indicam um aumento na profundidade do substrato condutivo de oeste (estrada dos poços) para leste. Além disso, a SEV10 está praticamente na mesma longitude da SEV01, porém mais a norte, indicando um aumento da profundidade deste substrato de norte para sul.

As SEVs 04, 05, 06, 07 foram realizadas na área dos poços da Braskem. As SEV06 e 07, que estão mais a oeste, ou mais próximas dos poços da Embasa, indicaram a presença de uma espessa camada de argila (superior a 20 metros), próxima à superfície. Talvez essa camada tenha correlação com a camada argilosa da estrada dos poços. Mas ela não aparece mais em nenhuma das sondagens realizadas na área dos outros poços da Braskem. Esta argila restringiu bastante a profundidade de penetração das SEVs 06 e 07. Não foi possível detectar o nível d'água e a resistividade da camada aquífera atingiu um valor alto, responsável pelo comportamento final das curvas (em anexo, SEV06 e SEV07). Nas SEVs 04 e 05 o nível de saturação está bem caracterizado. Ambas já apresentam menor incidência de camadas argilosas e folhelhos, em comparação com as SEVs 06,07 e as da estrada dos poços da Embasa.

A SEV11, mais a noroeste da área, também indicou a existência de seqüências superficiais mais argilosas (em torno de 6,4 metros de argila). O nível de saturação para este centro foi inferido em cerca de 40 metros, o que chama a atenção, em virtude da SEV11 estar a uma distância mínima de 550 metros do poço mais próximo (PP140/02). A curva de resistividade aparente para esta SEV pode ser comparada à da SEV02. Já as SEVs 12 e 13 foram realizadas em um mesmo centro, próximas ao poço PP140/01, tendo a expansão do arranjo de eletrodos sido realizada em direções perpendiculares - SO-NE para a SEV12 e NO-SE para a SEV13. Não houve condições físicas de expandir o arranjo na direção N-S, devido a uma estrada 100 metros a sul do poço. O resultado das duas é bastante parecido. Novamente

notamos a presença de espessas seqüências argilosas superficiais e um aclave acentuado caracterizando a zona não-saturada. A correlação com o perfil geofísico do poço PP140/01 foi satisfatória, mas a profundidade máxima de exploração destas SEVs foi reduzida em função da blindagem das camadas argilosas superficiais.

A SEV22 apresentou uma particularidade, o arranjo Schlumberger foi expandido na direção leste-oeste, em virtude da presença de brejos que impossibilitaram qualquer outra direção de expansão. Em contraponto às sondagens da parte NO da área de estudo, esta SEV, localizada mais a S/SE, indicou a presença de seqüências arenosas pouco argilosas até profundidades da ordem de 200 metros. A curva da SEV22 apresenta comportamento irregular, principalmente na sua parte final, tornando bastante difícil a interpretação para profundidades maiores que 200 metros.

De acordo com os resultados das SEVs 12, 13 e 22 pode-se confirmar a importância da direção de expansão do arranjo de eletrodos para o resultado final. Para os primeiros 100 metros ($AB/2 = 100$) a escolha desta direção não afeta significativamente o resultado final, mas a partir daí torna-se cada vez mais importante, como podemos comprovar na SEV22. Esse fenômeno é resultado da suave inclinação da Formação São Sebastião em subsuperfície (não mais que 10° na área de estudo). Para pequenas aberturas do arranjo de eletrodos temos um modelo de camadas aproximadamente plano paralelas, mas tal aproximação se torna difícil à medida que aumenta a separação dos eletrodos, a não ser que o arranjo esteja sendo expandido paralelamente à direção do acamadamento.

Na área atrás do aterro da LIMPEC as sondagens apresentaram bons resultados. Também não foi possível expandir o arranjo na direção N-S devido a cercas e estrada de terra, mas isso não afetou significativamente o resultado já que as SEVs tiveram $(AB/2)_{max} = 100$. Não foi possível identificar o nível de saturação em todas. As pseudo-seções de resistividade aparente e cargabilidade aparente confeccionadas dão boas indicações da geologia em sub-superfície. A espessura da Formação Marizal na área do aterro é muito pequena, não chegando a 10 metros. As SEVs apresentaram camadas resistivas nas suas bases, a partir de profundidades variadas. Estas camadas fazem parte da Formação São Sebastião, e estão saturadas com água doce. Esta alta resistividade provavelmente representa arenitos menos porosos, bem compactados. É bastante difícil estabelecer o contato entre as Formações Marizal e São Sebastião com base nos dados de eletrorresistividade, mas os dados invertidos apontam para um aumento da espessura da Formação Marizal de oeste para leste. A Formação São Sebastião mergulha levemente para sudeste, concordando com seu mergulho regional. De acordo com o mapa de afloramentos, as SEVs 30, 25 e 26 estão diretamente sobre o Grupo Massacará, enquanto que as SEVs 27, 28 e 29 estão em afloramentos Marizal. Esta é a provável causa da descontinuidade lateral superficial observada na pseudo-seção de cargabilidade aparente (fig. 3.6), entre as SEVs 26 e 27. Os valores de resistividade aparente e os resultados das inversões não apontam contaminação por chorume, necessariamente. Os

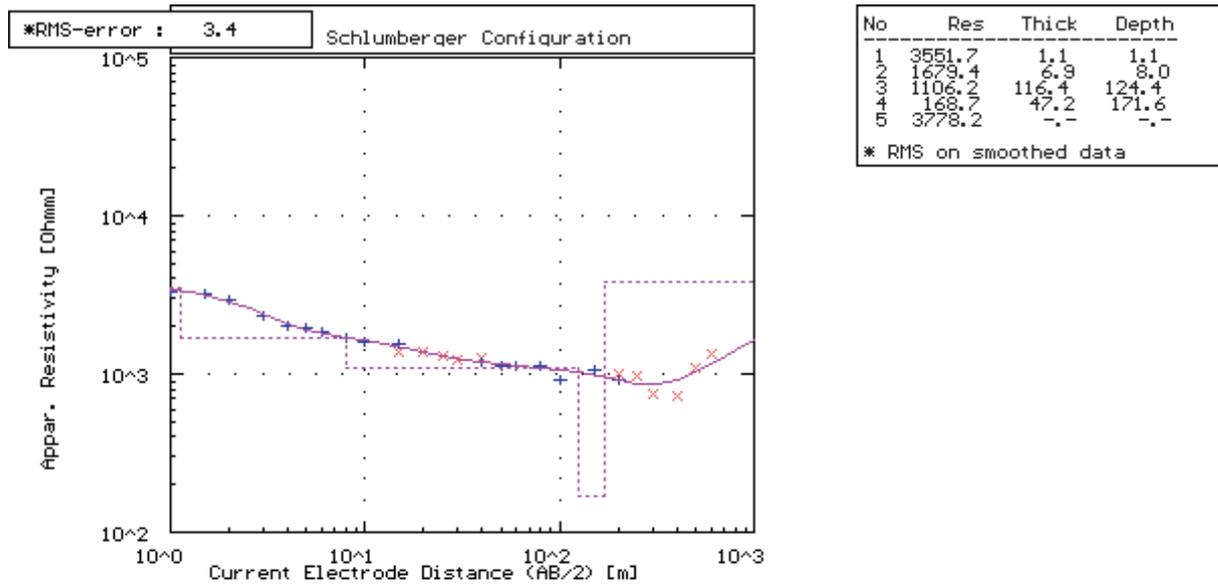


Figura 3.3: Curva da sondagem SEV22.

sais presentes no chorume são responsáveis por um grande aumento da condutividade em um aquífero contaminado. No caso das sondagens realizadas atrás do aterro, os menores valores de resistividade real em camadas superficiais (até 10 metros) correspondem a valores típicos de argilas arenosas ou arenitos argilosos que ocorrem naturalmente na área de estudo.

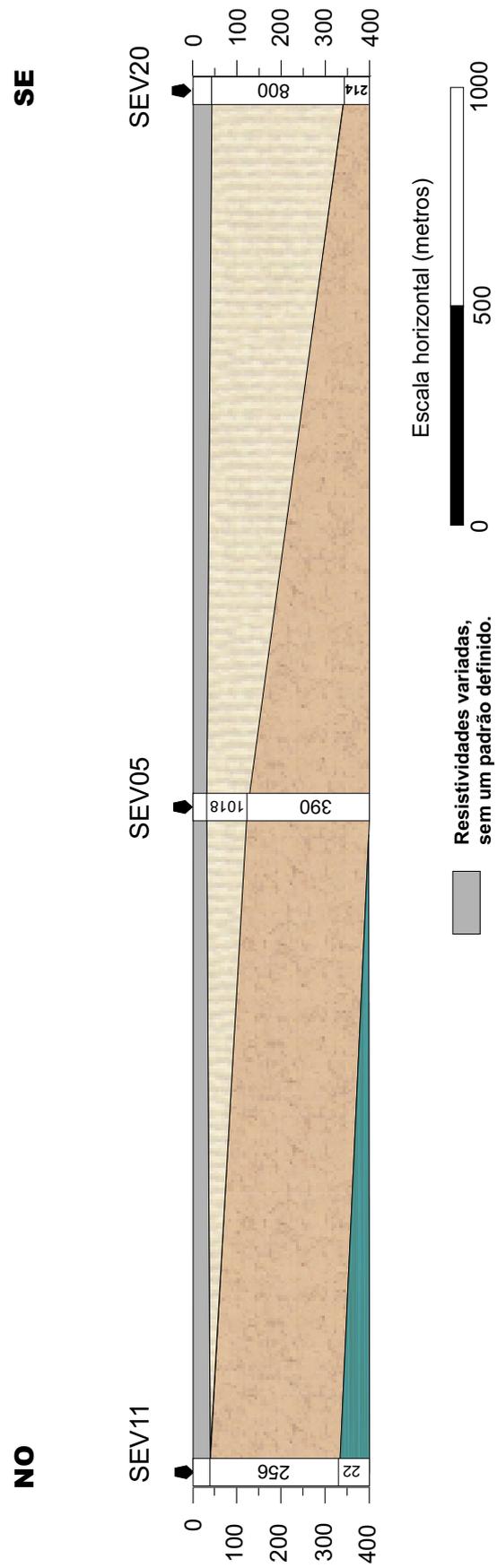


Figura 3.4: Seção geolétrica esquemática de acordo com as SEVs 11, 05 e 20.

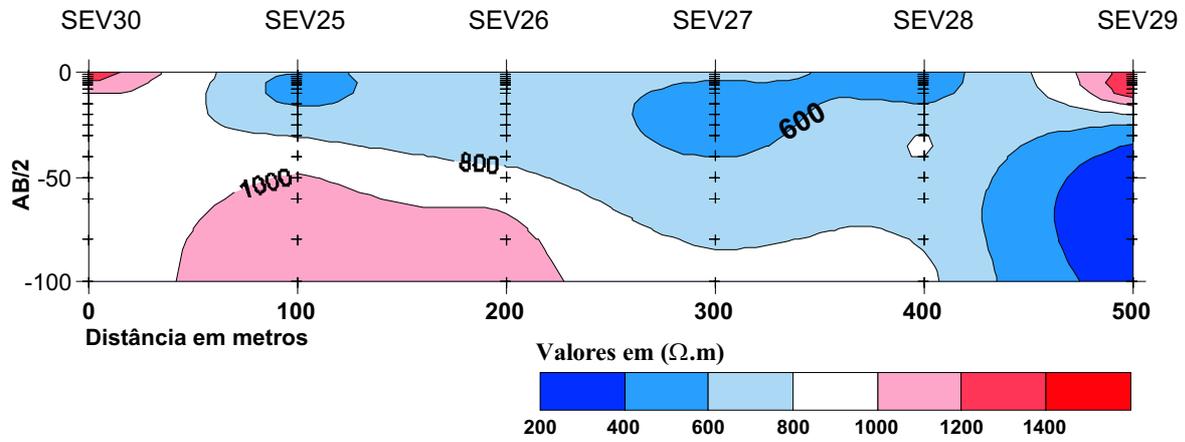


Figura 3.5: Pseudo-seção de resistividade aparente nas seis SEVs realizadas atrás do novo aterro sanitário da LIMPEC.

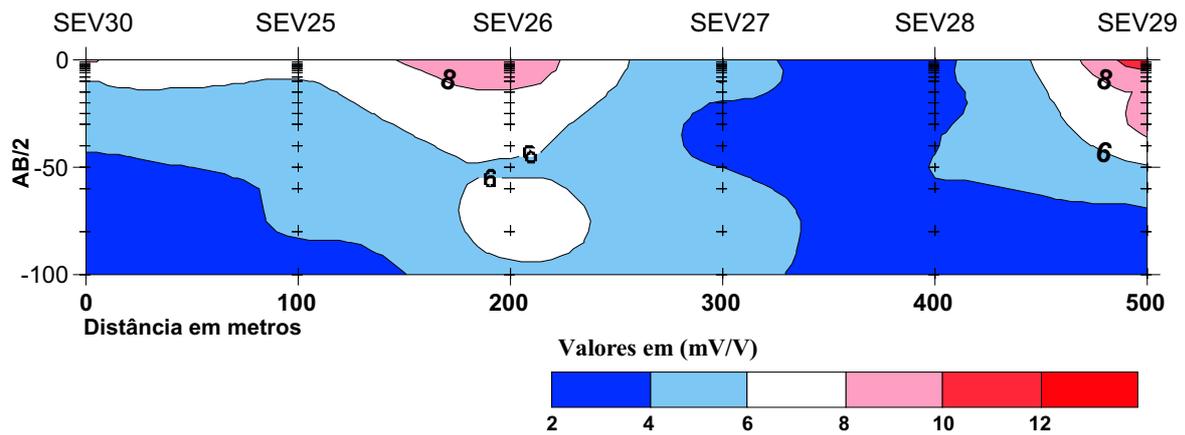


Figura 3.6: Pseudo-seção de cargabilidade aparente.

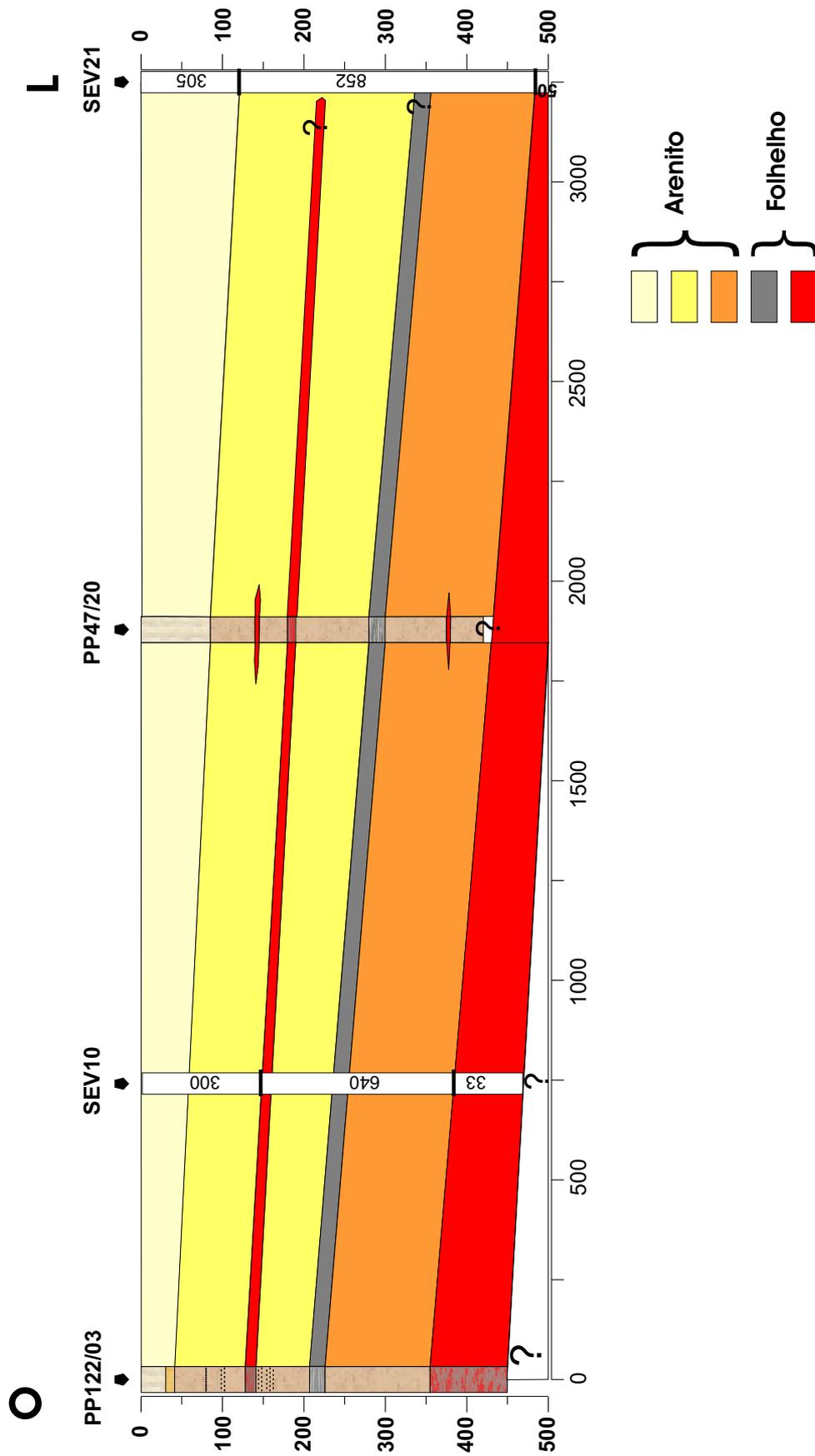


Figura 3.7: Seção esquemática de acordo com as SEVs 03, 10, 21 e os perfis dos pozos 122/03 e 47/20.

CAPÍTULO 4

Conclusões e Recomendações

A utilização da geofísica elétrica possibilitou uma melhor compreensão do sistema aquífero no local estudado. Porém, devido à geologia da área, o método demonstrou ter uma profundidade de penetração e uma precisão bastante heterogêneas. Na SEV01, por exemplo, a correlação com o perfil litológico do poço PP122/05 e a profundidade de exploração atingida (acima de 350 metros) foram muito boas. Já na SEV07, a profundidade de exploração ficou comprometida pela existência de uma espessa camada de argila (em torno de 24 metros de espessura) superficial. Em geral, em locais onde a coluna estratigráfica apresenta mais de 70% de arenitos, podemos atingir mais de 300m de profundidade, para uma abertura de pelo menos 1200m entre os eletrodos de corrente. Já em pontos onde encontramos espessas camadas de argila ou folhelho superficiais (até 50m), a profundidade de exploração e a resolução ficam comprometidas. Porém, como estas camadas condutivas superficiais geralmente não apresentam continuidade lateral, sempre é possível se buscar um ponto próximo onde a sondagem possa ser feita com melhores resultados.

Nem sempre é possível detectar o nível de saturação ou nível hidráulico em poços sob bombeamento ou próximo a estes, e, algumas vezes, a existência de níveis suspensos atrapalha a interpretação. Contudo, na maioria das vezes, o método se mostrou efetivo na avaliação qualitativa do rebaixamento do nível hidráulico dos poços. Isso quer dizer que, com base nos resultados, é possível fazer o monitoramento do nível estático ou dinâmico na área através da eletrorresistividade. Para isso, são necessários levantamentos periódicos sempre no mesmo ponto de interesse. Sem dados de poços (perfis geofísicos) fica bastante difícil estabelecer valores de referência para as camadas, o que impossibilita a determinação do nível com exatidão. Entretanto, o nível freático está fortemente correlacionado com algumas feições nas curvas $(AB/2) \times (\rho_a)$. Uma vez identificada esta feição característica para determinada curva, pode-se detectar variações no nível d'água a partir do deslocamento lateral da mesma, para curvas feitas em diferentes períodos. Uma variação significativa pode ser facilmente detectada, mas nem sempre quantificada, por isso trata-se de uma avaliação qualitativa.

De acordo com os resultados, verifica-se que há algumas regiões especialmente críticas com relação ao rebaixamento. As SEVs 02, 06 e 07 indicam que a região entre os poços

122/01, 122/02 e 47/22 é a mais afetada, o que é confirmado por informações de nível dinâmico do poço 47/22 (em torno de 89 metros). A área próxima aos poços 140/01 e 140/02 também merece atenção, de acordo com as SEVs 11, 12 e 13 - o nível dinâmico para o poço 140/01 foi inferido em aproximadamente 80 metros. A perda de produtividade dos poços pode se tornar alta o suficiente para levar à desativação de algum deles, principalmente se novos poços forem perfurados próximos aos já existentes. Para monitorar o rebaixamento deve-se tomar medidas tal como a instalação de piezômetros em locais estratégicos, como a área entre os poços PP122/01, 122/02 e 47/22, e o local da SEV11 (figura IV.1 em anexo). O acompanhamento do rebaixamento é importante para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, sendo para tanto bastante úteis as informações de nível dinâmico dos poços.

Segundo dados da CETREL S/A, atualmente, a zona de captura dos poços não alcança as áreas dos aterros, mas a tendência é que isso aconteça a longo prazo, a ser mantido o atual regime de exploração do aquífero. Isso deve ser um motivo de preocupação pois na parte leste da região estudada o aquífero livre é bastante espesso, podendo chegar a mais de 150 metros, e a proporção de sedimentos arenosos pode chegar a 90% para os primeiros 400 metros (PP47/19). Mas somente através do modelamento matemático do aquífero local poderemos ter uma idéia mais precisa dos riscos a longo prazo, uma vez que há uma série de variáveis envolvidas.

Não foi possível realizar nenhuma SEV próxima ao aterro desativado da LIMPEC, por causa da densa vegetação na área. As SEVs realizadas atrás do novo aterro sanitário forneceram dados interessantes, porém as sondagens elétricas verticais isoladamente não têm a capacidade de confirmar a existência (ou inexistência) de contaminação. Recomendamos a elaboração de um mapa potenciométrico da área para uma melhor compreensão do comportamento do fluxo subterrâneo e locação de poços de monitoramento.

Quanto à vulnerabilidade natural do aquífero no local, pode-se afirmar que ela aumenta de NO para SE. Não há nenhuma camada impermeável (ou pouco permeável) espessa e contínua em toda a área nos primeiros 200m de profundidade. Há locais, nas partes sul e sudeste, onde não há folhelhos ou argilas nos 100 metros iniciais. Os melhores pontos para exploração de água subterrânea são justamente os mais vulneráveis. Este é um aspecto muito importante e deve ser levado em consideração quando da definição de uma política de uso e ocupação do solo local, por parte de órgãos governamentais.

A área a sudeste do Espaço Alfa possui um excelente potencial para exploração. As SEVs 19, 20 e 21 indicam espessas camadas resistivas, o que representa ausência de argilas e folhelhos com espessura representativa. Isso ocorre porquê nesta região a espessura do Membro Rio Joanes é superior a 500 metros, como pode ser visto na figura 3.7. Recomendamos perfurar um poço estratigráfico de 400 a 500 metros próximo às SEVs 19 e 20 (figura IV.1 em anexo) para verificar a espessura total do membro Rio Joanes e avaliar a validade do modelo proposto neste trabalho (ver figura 3.7). Como neste tipo de poço, devido ao seu

menor diâmetro em relação aos poços de produção, os perfis geofísicos fornecem dados de resistividade mais próximos dos dados reais, recomendamos também a perfilagem deste poço para calibração das inversões.

Com relação ao espesso folhelho que subjaz o membro Rio Joanes, algumas considerações podem ser feitas. O topo desta camada aparece em menor profundidade a oeste, na região dos poços 122/01, 02, 03 e 04. A leste, na região dos poços da Braskem esta camada está bem mais profunda. Estas observações são resultado da análise conjunta das SEVs e dos perfis litológicos dos poços. Contudo, devido à ambigüidade própria dos métodos geofísicos e à profundidade desta camada, não foi possível obter detalhes a respeito do comportamento desta camada apenas com base nos dados das SEVs e dos poços da área. Também é importante ressaltar que as informações existentes não estão espacialmente distribuídas de forma homogênea na área (ver figura 1.6). Para confirmar esta avaliação, recomendamos outro furo com 450 a 500 metros entre os poços 47/19, 20, 21 e 22, para perfilagem, e monitoramento do rebaixamento.

Sabe-se que na região de Camaçari-Dias D'Ávila existe um sistema de falhas orientado segundo NNE-SSO, conjugado a outro de direção NO-SE. A existência destas estruturas na área do Espaço Alfa não puderam ser confirmadas. No entanto, a ocorrência de blocos seccionados com diferentes rejeitos poderia ser a causa do comportamento irregular da Sequência Argilosa Superior.

É possível que se possa obter melhores resultados com os métodos elétricos durante a estação seca. Nesse período, devido ao rebaixamento natural do nível freático, a área dos brejos e regiões alagadas é bastante reduzida. Seria então possível realizar sondagens em locais onde não houve condições durante este trabalho, além de possibilitar a utilização de espaçamentos maiores dos eletrodos de corrente, aumentando a profundidade de exploração.

Os dados de polarização induzida adquiridos durante o trabalho estão disponíveis para a inversão. Devido à baixa qualidade de alguns destes dados, seria interessante tentar selecionar os mais confiáveis. O resultado deverá proporcionar um refinamento da interpretação dos dados de eletrorresistividade.

É muito importante que todas as informações e estudos realizados na área sejam devidamente utilizados para ajudar na elaboração de um modelo hidrogeológico local consistente. Para isso é preciso contar com a participação de todas as empresas que exploram o aquífero. Perfis geofísicos dos poços são informações valiosas e indispensáveis na confecção de tal modelo. O custo de uma campanha de perfilagem é baixo comparativamente ao que se gasta com o projeto e instalação dos poços. A Secretaria de Recursos Hídricos deveria condicionar a outorga de novos poços à realização de perfilagem dos mesmos.

A realização de sondagens elétricas verticais como ferramenta auxiliar na locação de poços teve a sua utilidade confirmada por este trabalho. Existem limitações, é verdade.

Nem sempre há espaço suficiente para expansão do arranjo de eletrodos, e nem sempre é possível alcançar uma profundidade de exploração da ordem de 300 a 400 metros. A vantagem está principalmente no baixo custo deste procedimento. É um investimento baixo, em comparação aos benefícios que se pode obter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar.

Aos meus pais, familiares e amigos, por tudo que representam para mim.

Obrigado à UFBA por todo conhecimento adquirido durante a minha graduação.

A CETREL S/A pela bolsa de estágio e todo apoio para realização deste trabalho.

Ao CPGG/UFBA, seus professores e funcionários, em especial ao meu orientador, prof. Olivar Lima, ao prof. Hédison Sato, prof. Telésforo Martinez, Ana do Ó, Lene, Luís Medeiros e Joaquim Lago.

Agradeço aos meus colegas de curso pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis, em especial a Anderson, Fernando, André, Fabrício, Igor, Anderson Abreu e Emerson. Aos colegas da pós-graduação: Ricardo, Everaldo, Vicente, Christian, Luana, Rommel, Renata, Jacira e Osmar. Aos graduados (e bem empregados!): Jander, Gustavo, Atahebson, Luiz Augusto, Alberto, Josair e Pitombo.

Aos colegas da CETREL S/A - SMA, por todo apoio durante o meu estágio, em especial a Saulo e Gédison (pelas dicas no trabalho). E também a equipe de campo da MG Serviços.

E agradeço finalmente a todos aqueles que torcem por mim, e que por ventura eu tenha esquecido de citar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cavalcanti, S. S. (1999), Hidrologia Subterrânea na Área do Aterro Sanitário de Salvador usando Métodos Geofísicos Elétricos, Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador, Brasil.
- Kearey, P.; Brooks, M. & Hill, I. (2002), An Introduction to Geophysical Exploration, Blackwell Publishing.
- Keller, G. V. & Frischknecht, F. C. (1966), Electrical Methods in Geophysical Prospecting, New York, Pergamon Press.
- Leite, D. C. (1964), Possibilidade de Água Subterrânea na Bacia do Recôncavo Baiano, Rel. Int. Petrobrás, Salvador.
- Lima, O. A. L. & Miranda, T. A. D. (1988), Condições Hidrogeológicas dos Aquíferos Artesianos na Região do Complexo Petroquímico de Camaçari - Bahia, Rev. Bras. Geoc., 18: 43-49.
- Lima, O. A. L. & Sharma, M. M. (1990), A Grain Conductivity Approach to Shaly Sandstones, Geophysics, 55: 1347-1356.
- Lima, O. A. L. (1993), Geophysical Evaluation of Sandstone Aquifers in the Recôncavo-Tucano Basin, Bahia - Brasil, Geophysics, 58; 1689-1702.
- Lima, O. A. L. (1999), Caracterização Hidráulica e Padrões de Poluição no Aquífero Recôncavo na Região de Camaçari-Dias D'Ávila, tese submetida para concurso público de professor titular, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Moraes, J. W. O. (1997), Avaliação Geofísica do Sistema Aquífero na Área do Parque das Lagoas e Dunas do Abaeté, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Parasnis, D. S. (1997), Principles of Applied Geophysics, London, Chapman & Hall.
- Penteado, H. L. B. (1999), Modelação Composicional 2D da Gênese, Expulsão e Migração do Petróleo no Compartimento Sul da Bacia do Recôncavo, Brasil, Tese de Doutorado, Universidade Pierre e Marie Curie - Paris VI, França.

- Pitombo, J. S. (1998), Avaliação Geofísica dos Aquíferos Costeiros da Costa Atlântica de Salvador - Bahia, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Reynolds, J. M. (1997), An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Chichester - UK, John Wiley & Sons Ltd.
- Santos Filho, L. A. R. (2000), Avaliação dos Aquíferos Costeiros da Área Rio Joanes - Jauá, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Silva, M. S. (2002), Avaliação Hidrológica e dos Riscos de Contaminação dos Aquíferos na Região de Simões Filho - Bahia, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. & Keys, D. A. (1990), Applied Geophysics, Cambridge University Press, London.
- Viana, C. F.; Gama Jr., E. G.; Simões, I. A.; Moura, J. A.; Fonseca, J. R. e Alves, R. J. (1971) Revisão Estratigráfica da Bacia Recôncavo-Tucano, Boletim Técnico da PETROBRÁS, 14(3):157-192.
- Ward, S. H. (1990), Resistivity and induced polarization methods, In SEG, Investigations in geophysics - Geotechnical and Environmental Geophysics: Academic Press - San Diego.

ANEXO I

Sondagens Elétricas Verticais

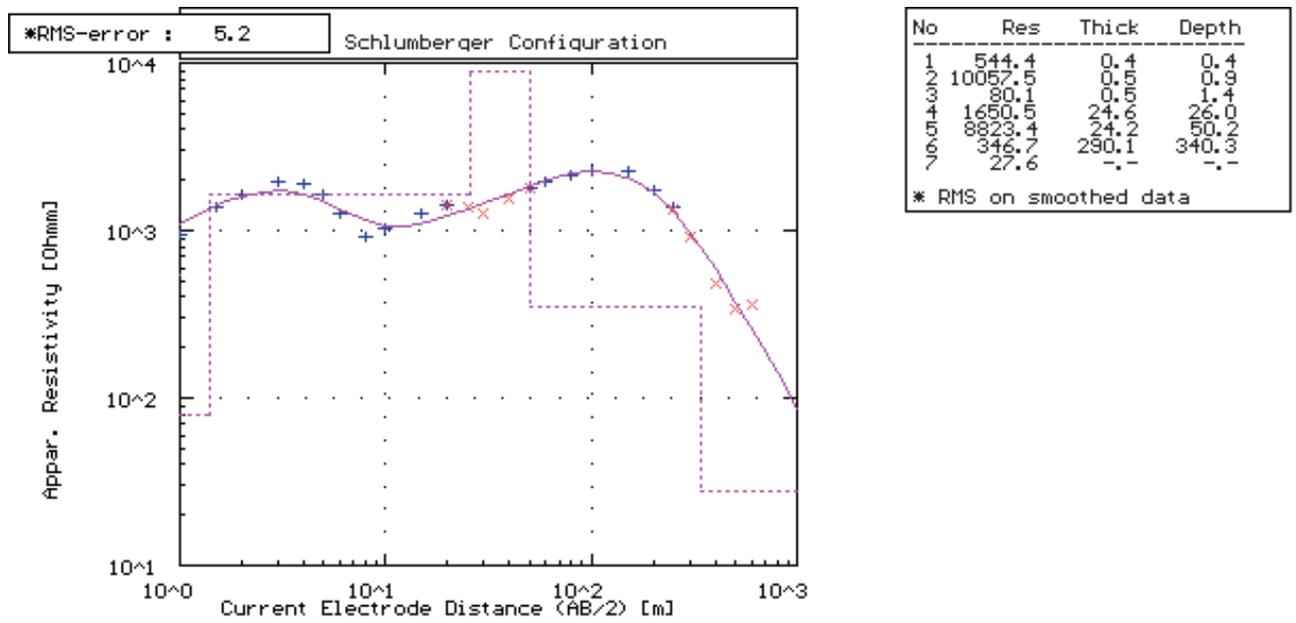
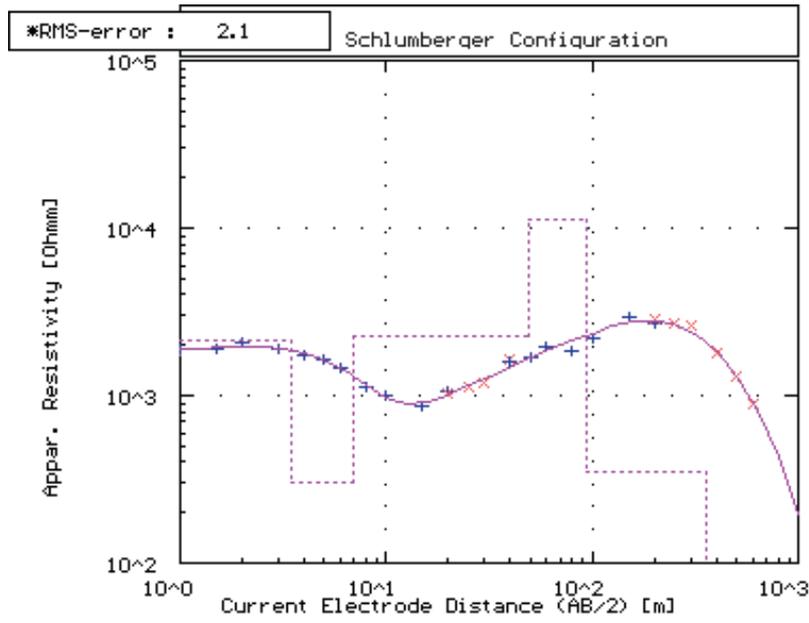


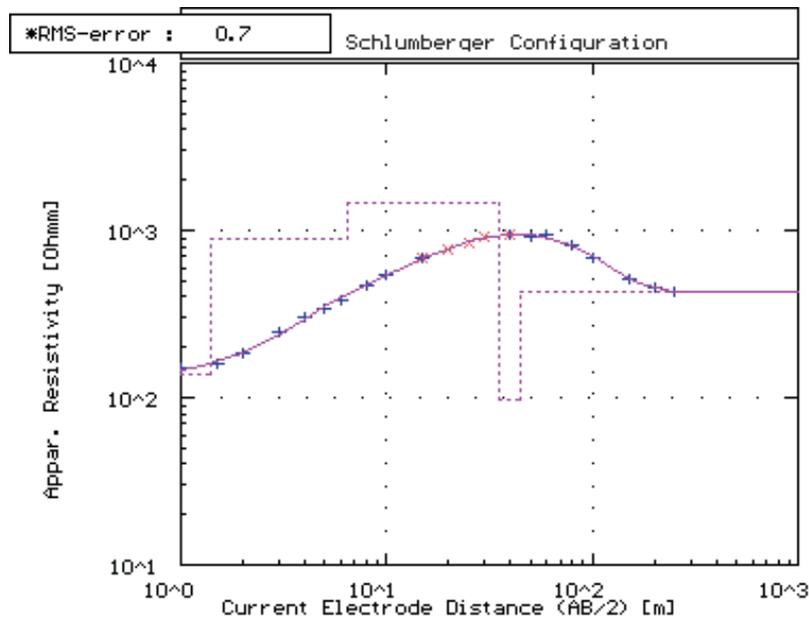
Figura I.1: SEV02.



No	Res	Thick	Depth
1	1758.9	0.5	0.5
2	2152.9	3.0	3.5
3	300.4	3.5	7.0
4	2241.6	42.4	49.4
5	11188.7	44.5	93.9
6	351.1	266.5	360.4
7	25.0	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

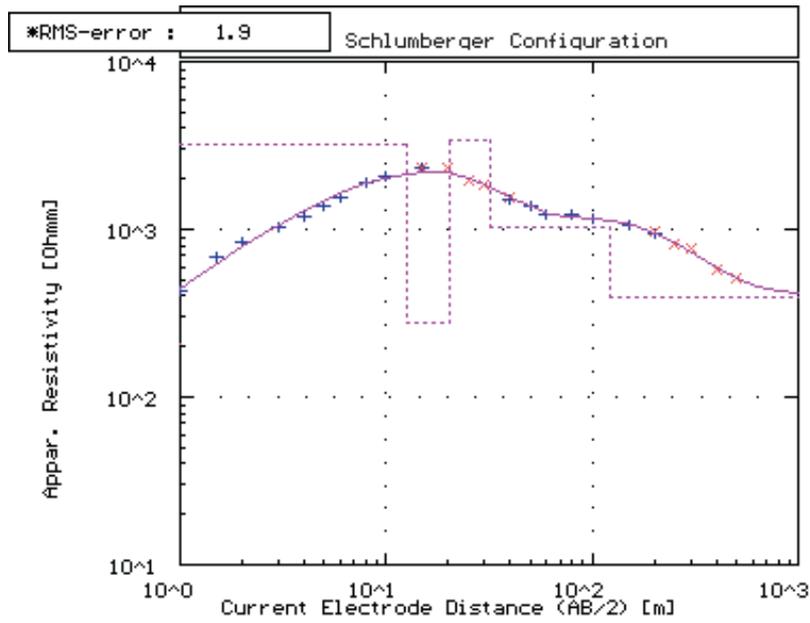
Figura I.2: SEV03



No	Res	Thick	Depth
1	138.1	1.4	1.4
2	895.9	5.0	6.4
3	1441.3	28.5	34.9
4	97.5	9.5	44.4
5	428.4	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

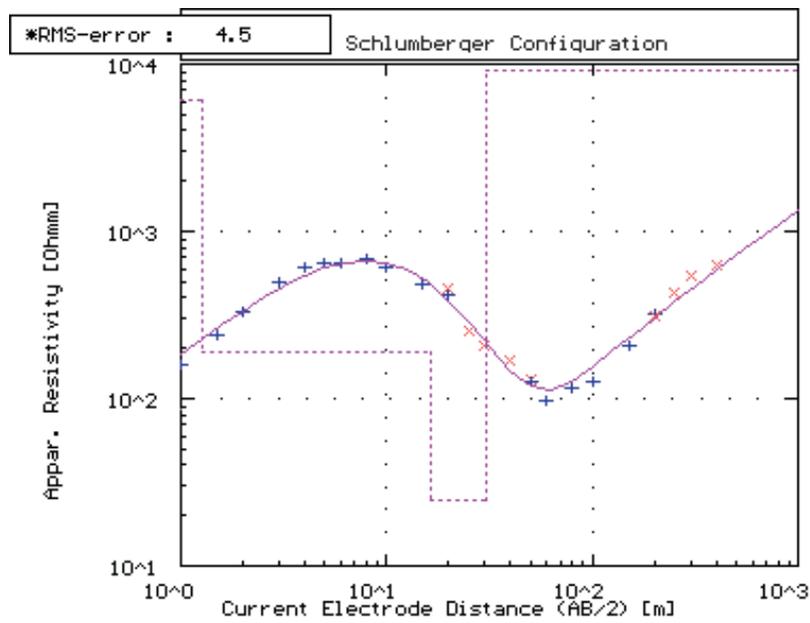
Figura I.3: SEV04



No	Res	Thick	Depth
1	209.2	0.4	0.4
2	3181.6	12.3	12.7
3	274.8	7.3	20.1
4	3442.2	11.9	32.0
5	1018.5	90.3	122.3
6	390.2	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

Figura I.4: SEV05



No	Res	Thick	Depth
1	86.1	0.5	0.5
2	6120.3	0.8	1.3
3	188.0	15.3	16.5
4	24.8	13.7	30.2
5	9048.8	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

Figura I.5: SEV06

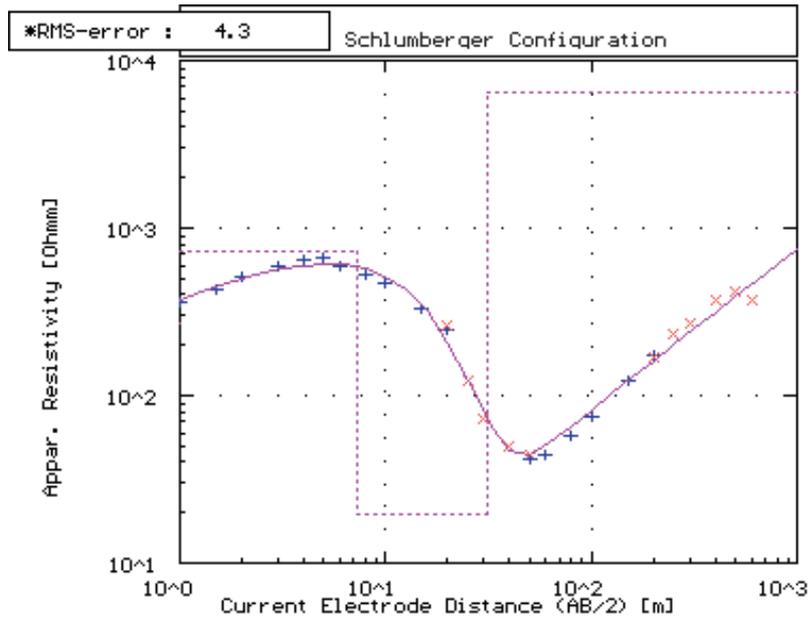


Figura I.6: SEV07

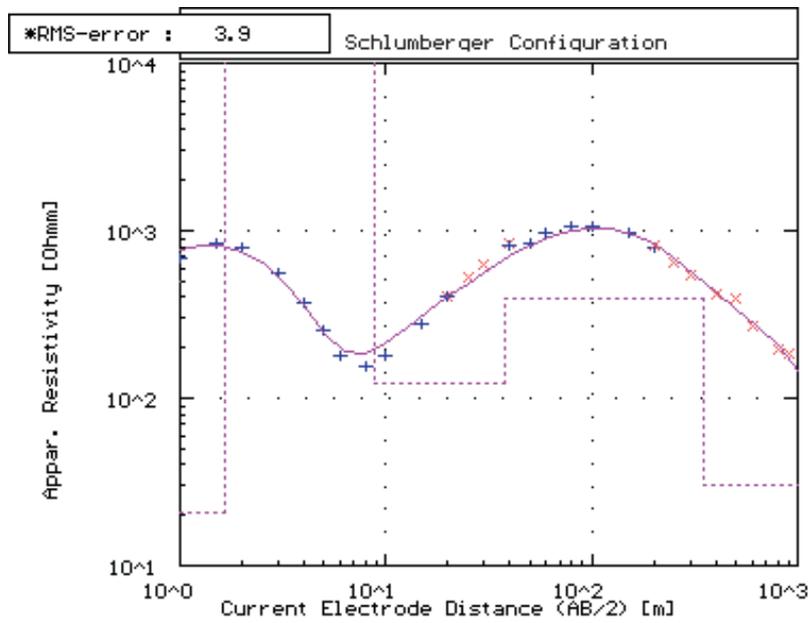
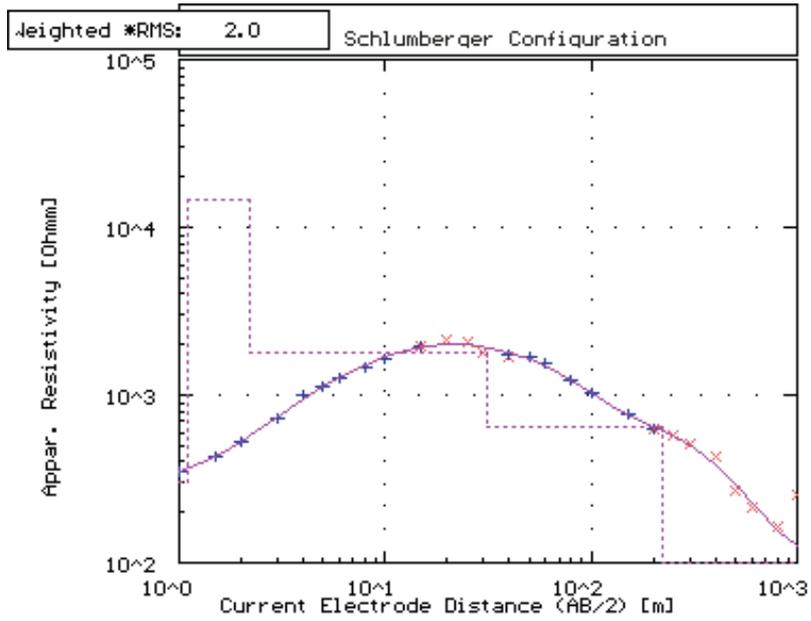


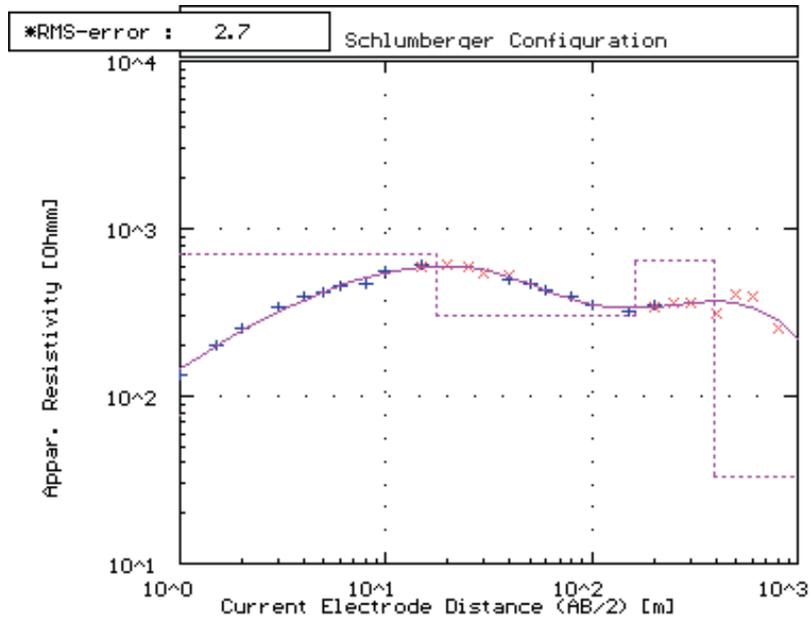
Figura I.7: SEV08



No	Res	Thick	Depth
1	303.4	1.1	1.1
2	14661.7	1.1	2.2
3	1774.4	28.7	30.9
4	643.8	189.8	220.7
5	99.7	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

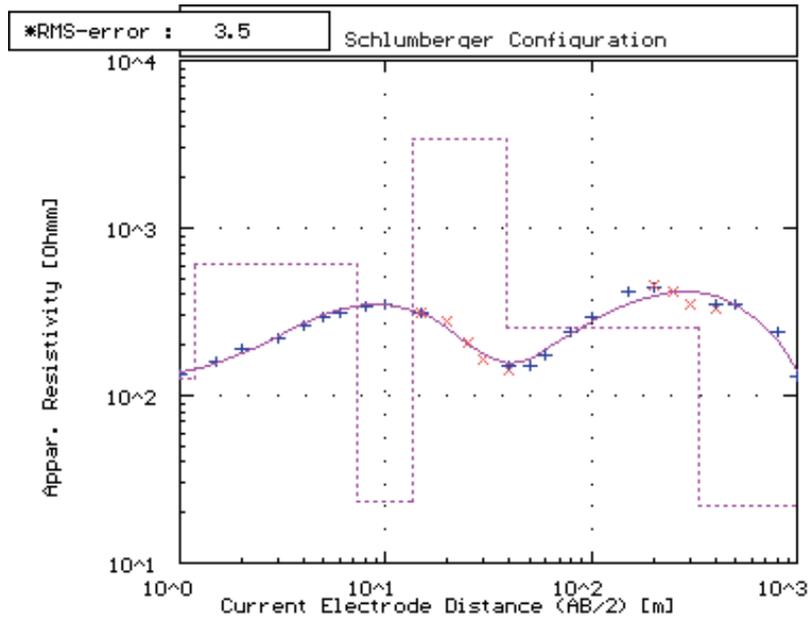
Figura I.8: SEV09



No	Res	Thick	Depth
1	77.1	0.4	0.4
2	702.1	17.3	17.8
3	303.3	143.0	160.8
4	642.1	233.9	394.7
5	32.9	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

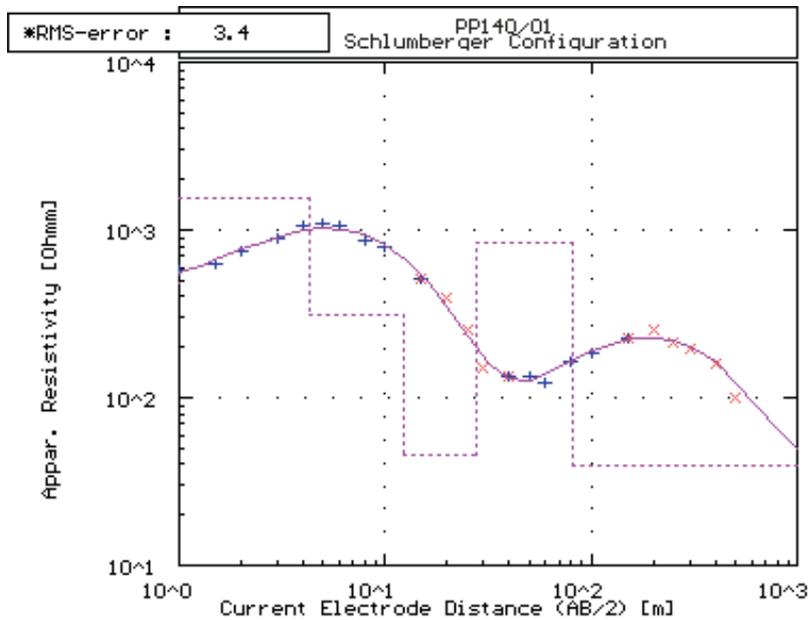
Figura I.9: SEV10



No	Res	Thick	Depth
1	127.6	1.2	1.2
2	608.2	6.0	7.2
3	23.6	6.4	13.6
4	3372.8	25.1	38.7
5	255.9	290.8	329.5
6	22.1	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

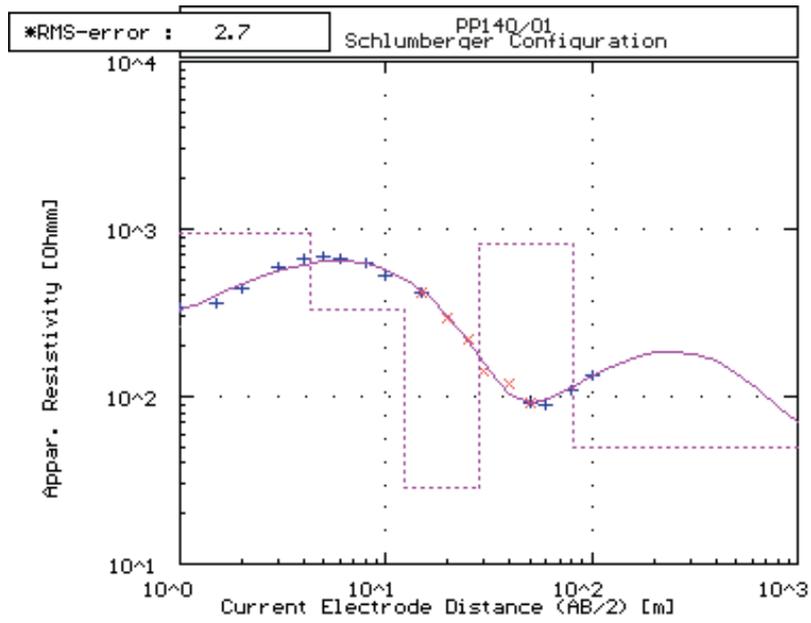
Figura I.10: SEV11



No	Res	Thick	Depth
1	481.3	0.8	0.8
2	1556.5	3.5	4.3
3	308.3	8.0	12.3
4	44.9	15.1	27.5
5	827.6	54.6	82.1
6	39.6	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

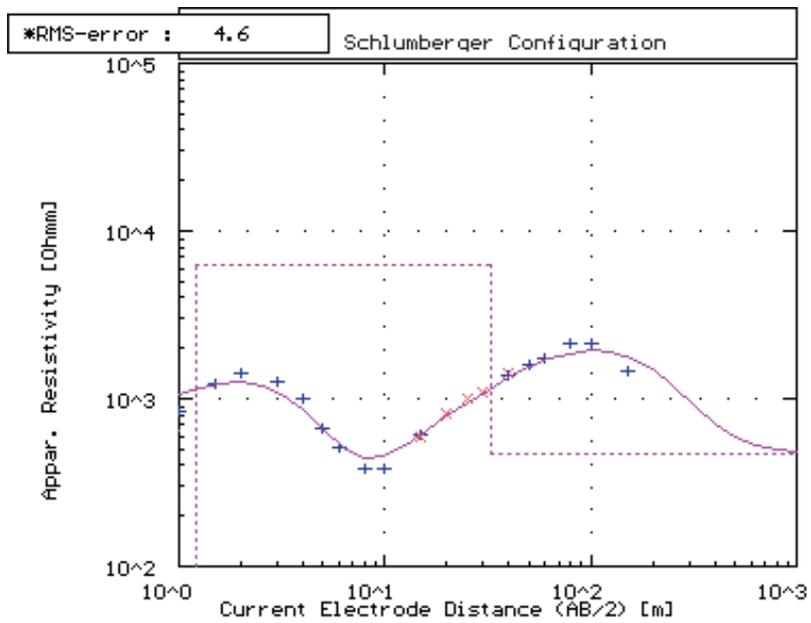
Figura I.11: SEV12



No	Res	Thick	Depth
1	259.3	0.7	0.7
2	946.0	3.6	4.3
3	326.0	8.2	12.4
4	28.6	15.6	28.0
5	823.9	52.8	80.8
6	49.9	-	-

* RMS on smoothed data

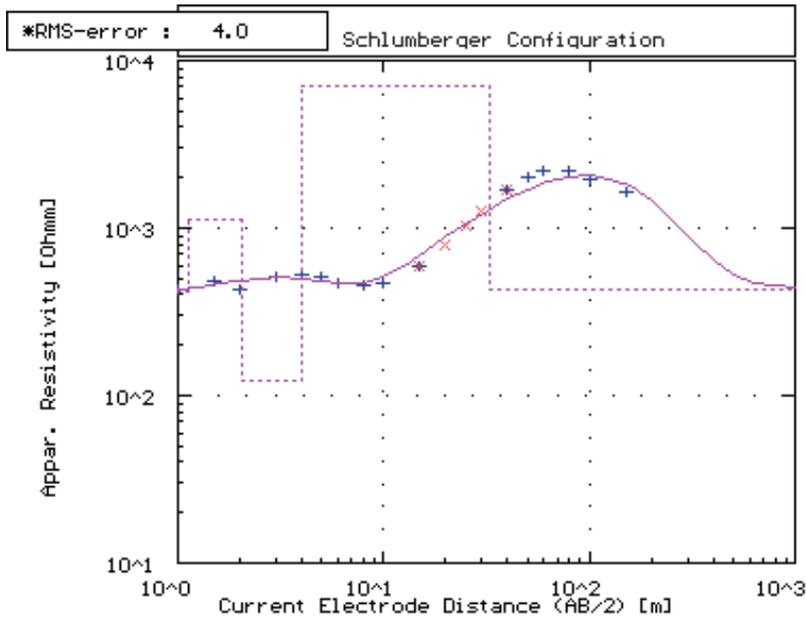
Figura I.12: SEV13



No	Res	Thick	Depth
1	645.0	0.5	0.5
2	10043.8	0.3	0.7
3	23.7	0.5	1.2
4	6220.5	31.2	32.4
5	473.6	-	-

* RMS on smoothed data

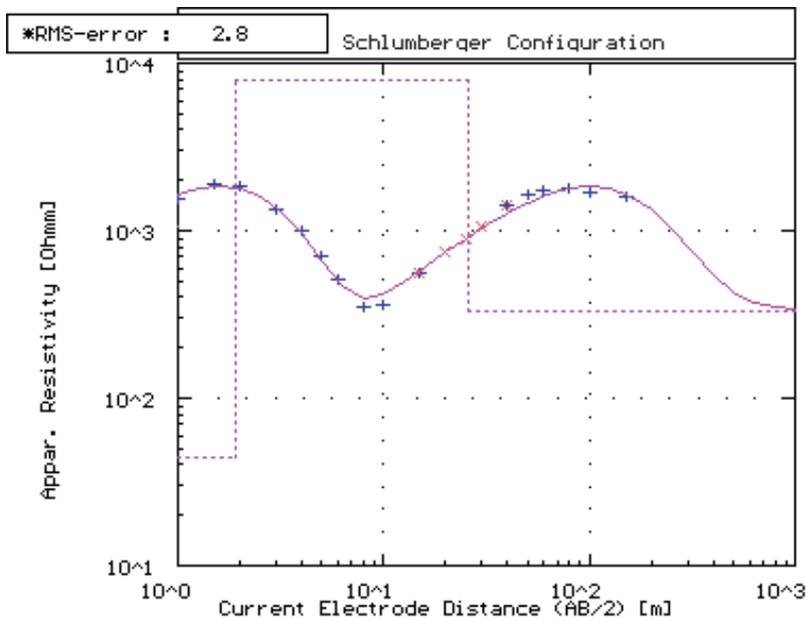
Figura I.13: SEV14



No	Res	Thick	Depth
1	415.2	1.1	1.1
2	1129.8	0.9	2.1
3	121.6	2.0	4.0
4	7003.7	28.5	32.5
5	427.2	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

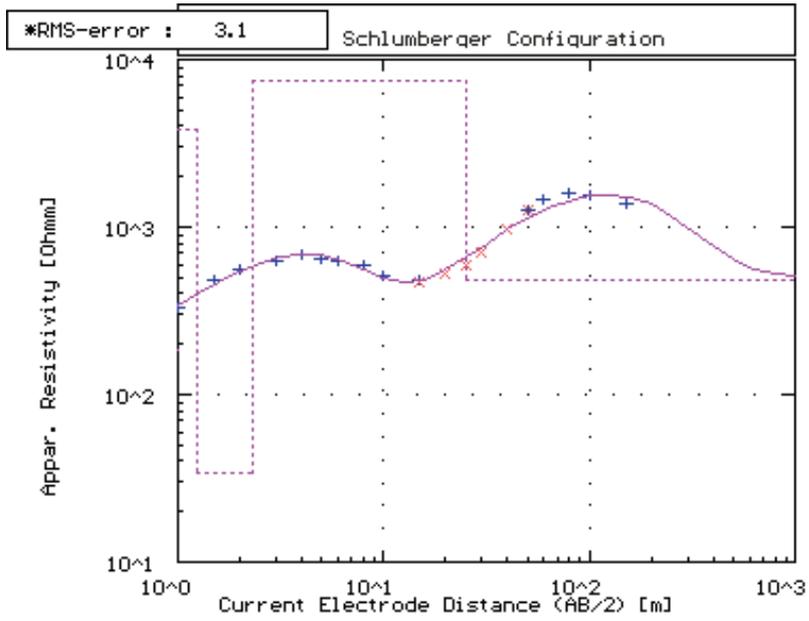
Figura I.14: SEV15



No	Res	Thick	Depth
1	1056.8	0.4	0.4
2	6594.5	0.5	0.9
3	43.7	1.0	1.9
4	7844.6	23.9	25.8
5	329.1	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

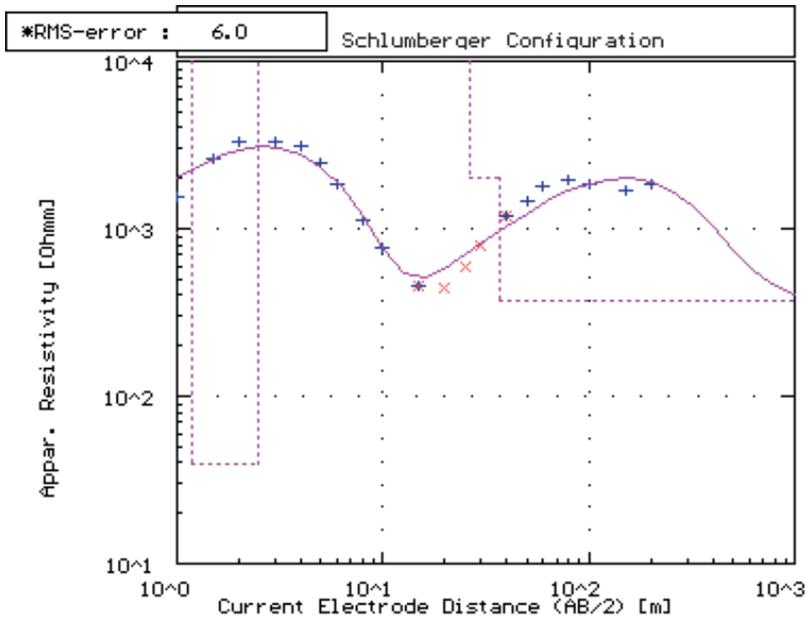
Figura I.15: SEV16



No	Res	Thick	Depth
1	187.0	0.5	0.5
2	3777.6	0.7	1.2
3	33.7	1.0	2.3
4	7503.3	22.9	25.2
5	487.9	-	-

* RMS on smoothed data

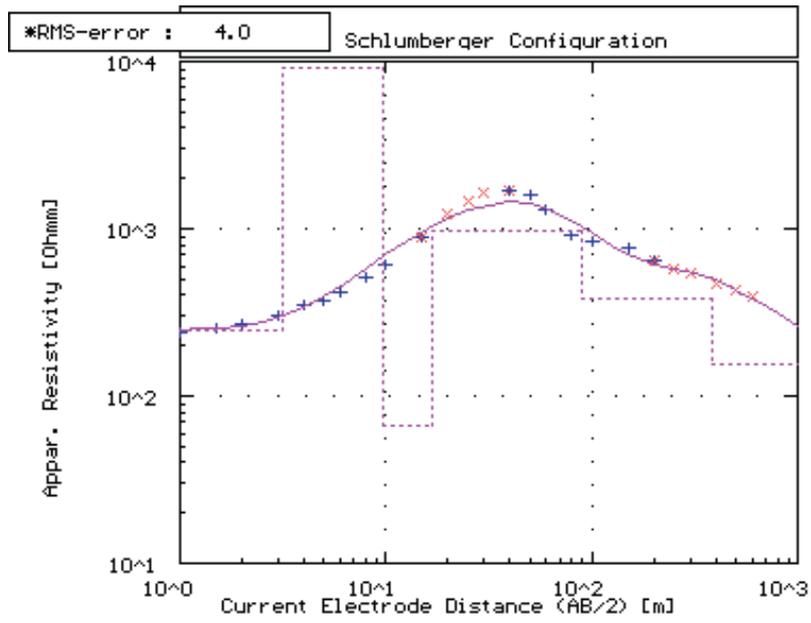
Figura I.16: SEV17



No	Res	Thick	Depth
1	930.3	0.4	0.4
2	11540.8	0.8	1.2
3	39.8	1.3	2.5
4	11732.0	24.2	26.7
5	1992.3	9.8	36.8
6	373.3	-	-

* RMS on smoothed data

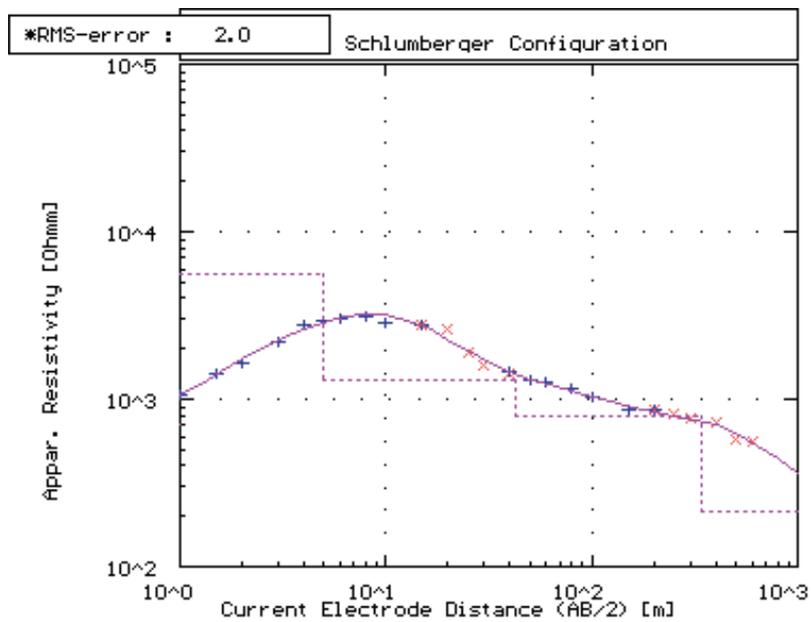
Figura I.17: SEV18



No	Res	Thick	Depth
1	247.7	3.1	3.1
2	9294.2	5.4	9.6
3	67.0	7.2	16.7
4	972.6	71.6	88.3
5	383.6	295.2	383.5
6	155.9	-	-

* RMS on smoothed data

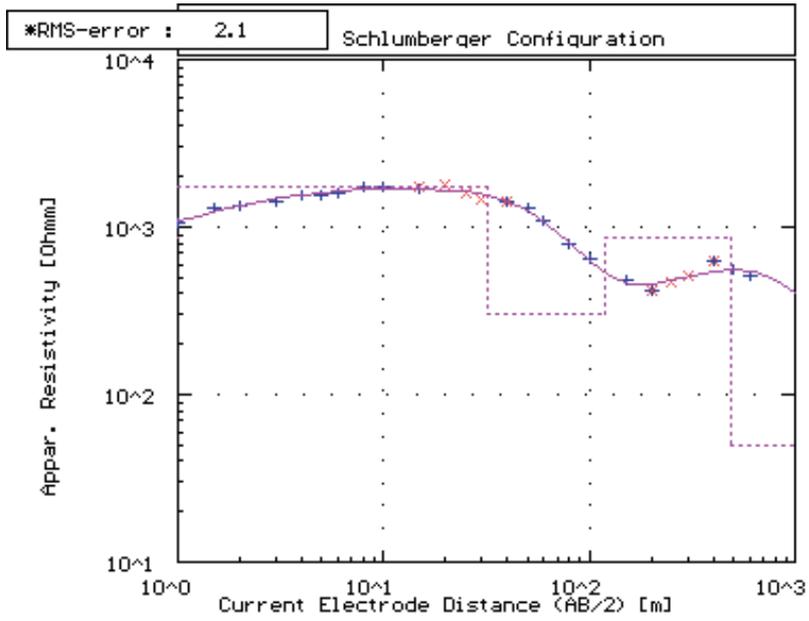
Figura I.18: SEV19



No	Res	Thick	Depth
1	699.4	0.6	0.6
2	5514.9	4.3	4.9
3	1287.3	37.2	42.1
4	800.4	301.2	343.3
5	214.1	-	-

* RMS on smoothed data

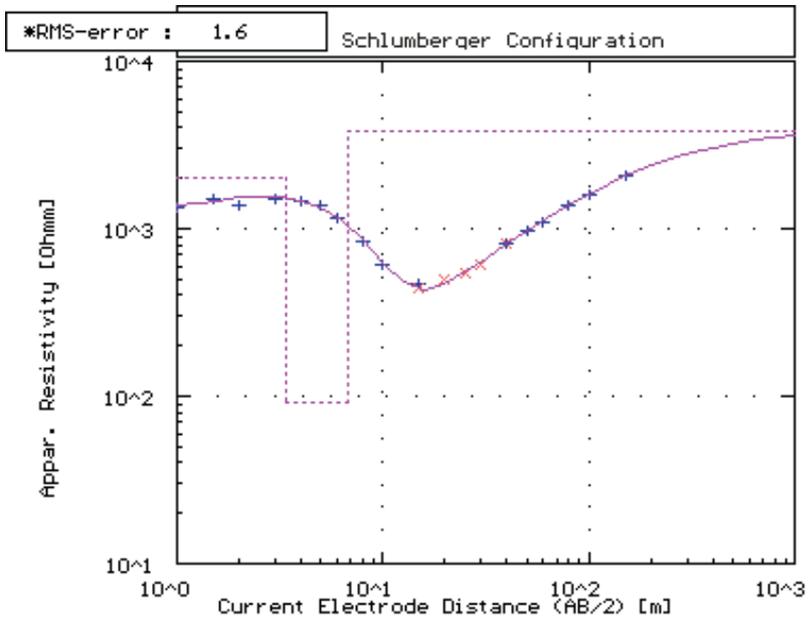
Figura I.19: SEV20



No	Res	Thick	Depth
1	864.7	0.5	0.5
2	1727.0	31.8	32.3
3	305.3	87.3	119.5
4	852.2	364.5	484.0
5	50.1	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

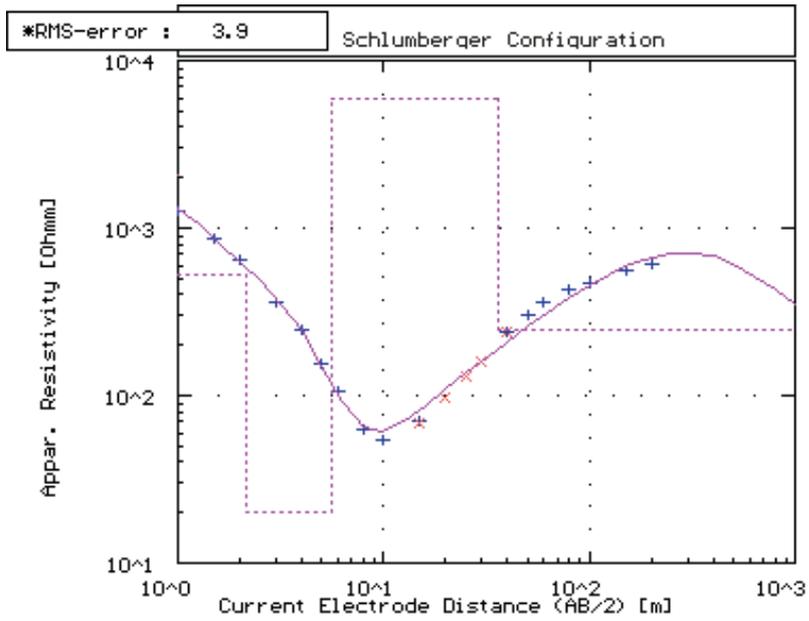
Figura I.20: SEV21



No	Res	Thick	Depth
1	1274.7	0.8	0.8
2	2021.3	2.6	3.4
3	91.3	3.5	6.8
4	3823.5	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

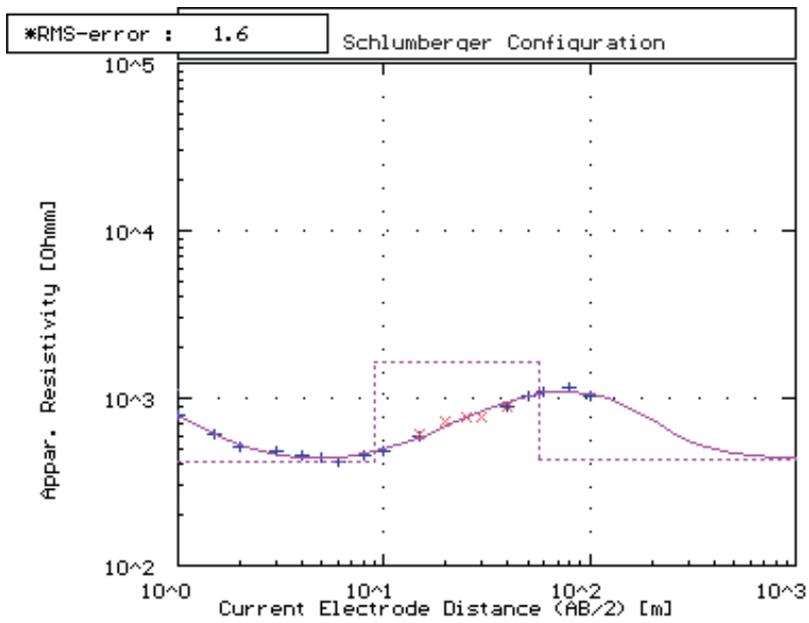
Figura I.21: SEV23



No	Res	Thick	Depth
1	2063.1	0.5	0.5
2	530.0	1.6	2.1
3	20.0	3.5	5.6
4	5845.6	30.7	36.4
5	245.5	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

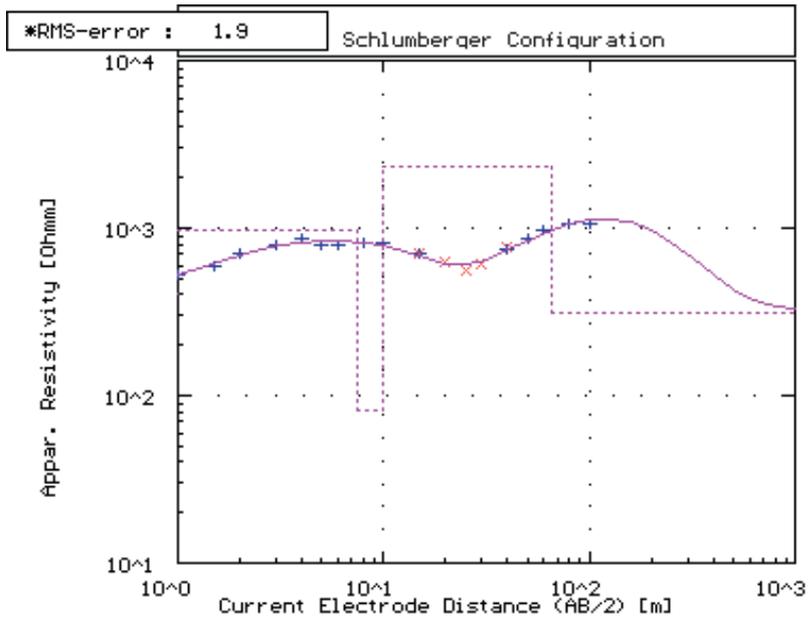
Figura I.22: SEV24



No	Res	Thick	Depth
1	1110.5	0.5	0.5
2	419.8	8.5	9.0
3	1621.4	48.0	57.0
4	430.2	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

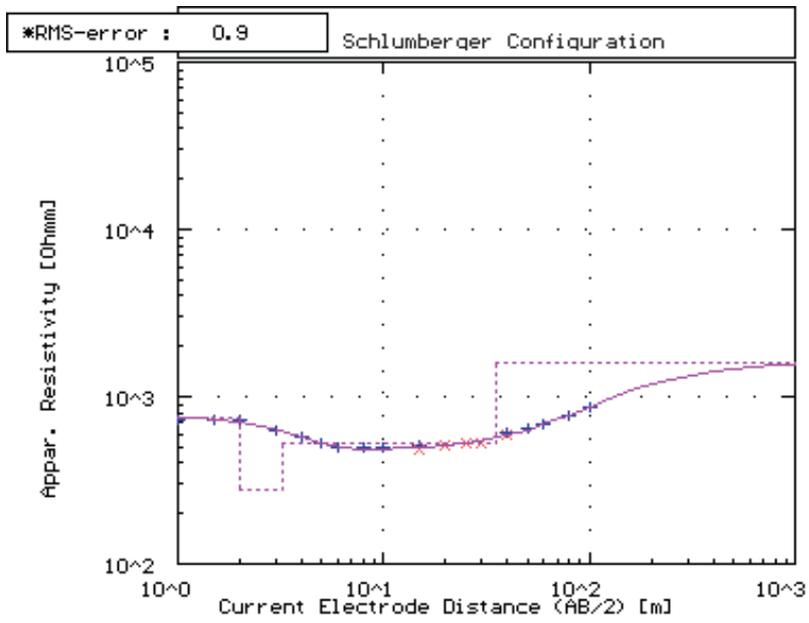
Figura I.23: SEV25



No	Res	Thick	Depth
1	402.8	0.5	0.5
2	963.3	7.0	7.0
3	80.7	2.5	9.5
4	2325.2	55.3	65.2
5	315.2	-	-

* RMS on smoothed data

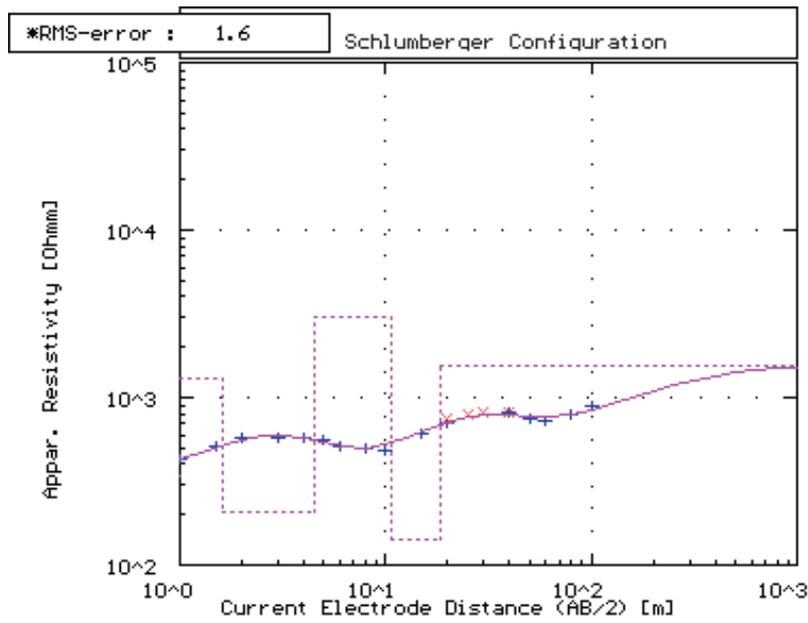
Figura I.24: SEV26



No	Res	Thick	Depth
1	755.1	2.0	2.0
2	277.9	1.3	3.3
3	523.8	32.0	35.2
4	1602.5	-	-

* RMS on smoothed data

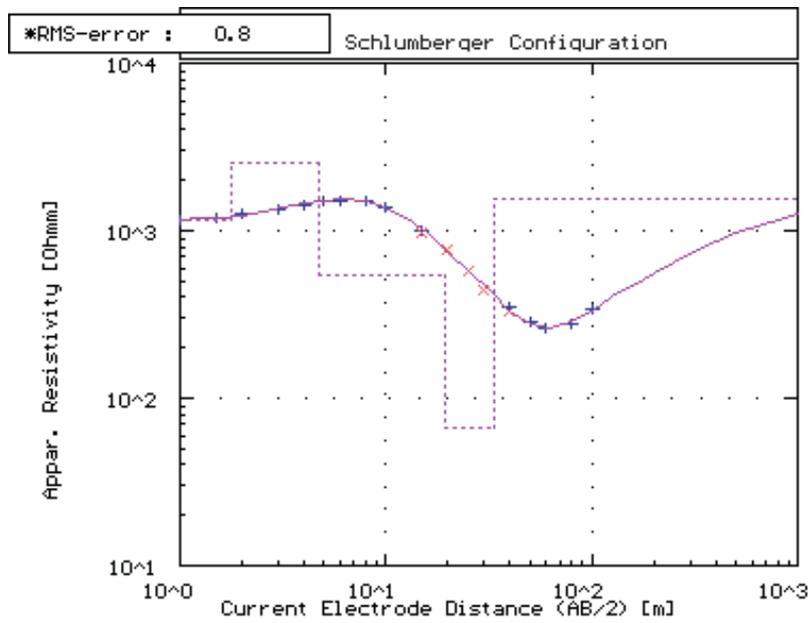
Figura I.25: SEV27



No	Res	Thick	Depth
1	338.3	0.6	0.6
2	1312.1	1.0	1.6
3	204.6	2.9	4.5
4	3049.2	6.1	10.6
5	140.4	8.0	18.6
6	1565.1	-.	-.

* RMS on smoothed data

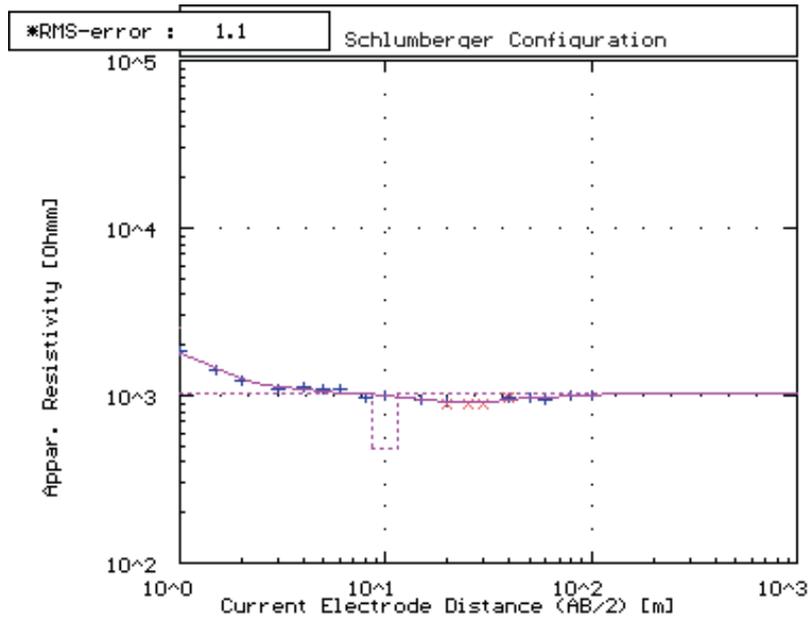
Figura I.26: SEV28



No	Res	Thick	Depth
1	1145.6	1.8	1.8
2	2559.6	3.0	4.8
3	549.0	14.0	19.1
4	65.0	14.0	33.4
5	156.7	-.	-.

* RMS on smoothed data

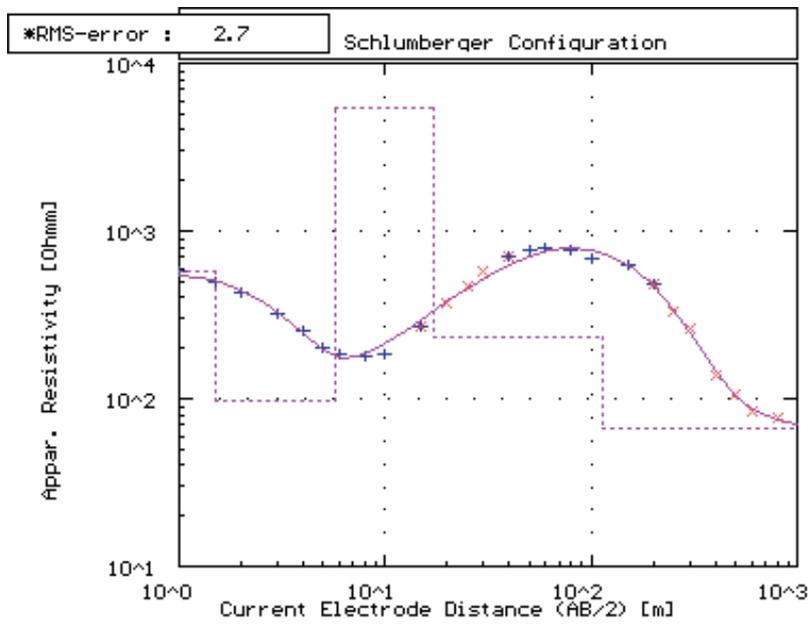
Figura I.27: SEV29



No	Res	Thick	Depth
1	2516.2	0.5	0.5
2	1039.6	8.0	8.5
3	489.3	3.0	11.6
4	1040.8	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

Figura I.28: SEV30



No	Res	Thick	Depth
1	570.2	1.5	1.5
2	97.6	4.3	5.8
3	5426.9	11.4	17.2
4	231.1	95.0	112.2
5	66.9	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

Figura I.29: SEV31

ANEXO II

Perfis de alguns poços

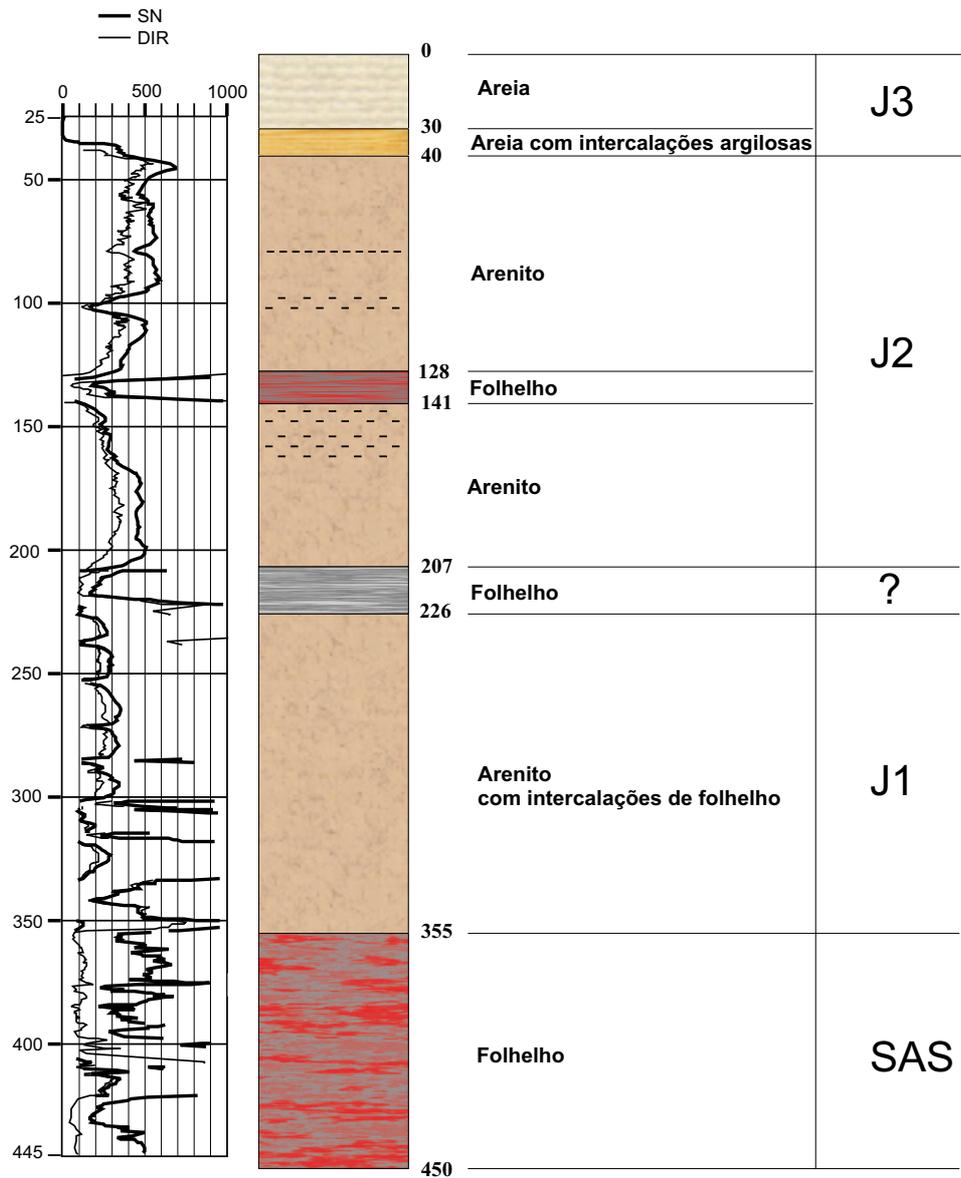
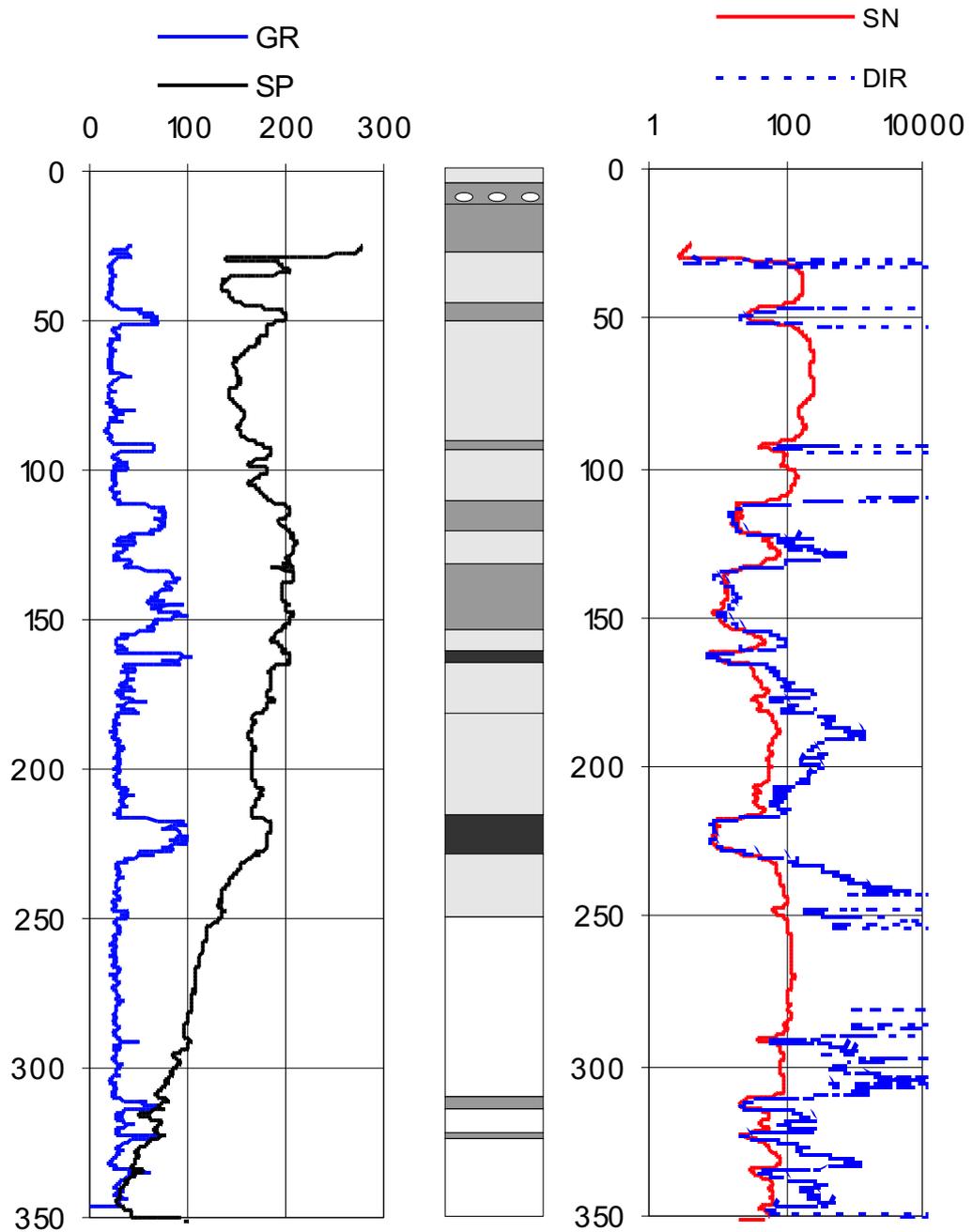


Figura II.1: Perfil do poço 122/03, de acordo com perfil elétrico e amostras de calha. Ao lado está a identificação de litofácies (ver figura 1.2) de acordo com o zoneamento proposto por Lima (1999).



Legenda

- Cascalho
- Areia
- Argila
- Silte argiloso

Figura II.2: Perfil geofísico do poço 140/01, utilizado para correlação com as SEVs 12 e 13

ANEXO III

Tabelas

SEVs	x	y
1	577396	8594084
2	576706	8595170
3	576724	8594225
4	578540	8595566
5	578543	8595262
6	577698	8594942
7	577704	8594746
8	576715	8594818
9	577049	8594492
10	577394	8594454
11	577184	8595854
12	576841	8596608
13	576841	8596608
14	576734	8595096
15	576745	8594994
16	576747	8594892

SEVs	x	y
17	576753	8594688
18	576760	8594536
19	580147	8594194
20	579878	8594272
21	579870	8594866
22	578109	8594238
23	576765	8594312
24	576764	8594372
25	580196	8597258
26	580295	8597230
27	580393	8597208
28	580492	8597182
29	580588	8597160
30	580094	8597274
31	576746	8595156

Poço	x	y
47/19	579245	8595300
47/20	578520	8594610
47/21	578390	8595570
47/22	577700	8595040
122/01	576867	8595118
122/02	576776	8594769
122/03	576683	8594233
122/04	576734	8593655
122/05	577382	8594087
140/01	576867	8596648
140/02	577268	8596398

Figura III.1: Tabela mostrando a localização das sondagens e poços de produção.

ANEXO IV

Mapa com indicação de piezômetros e poço estratigráfico sugeridos.

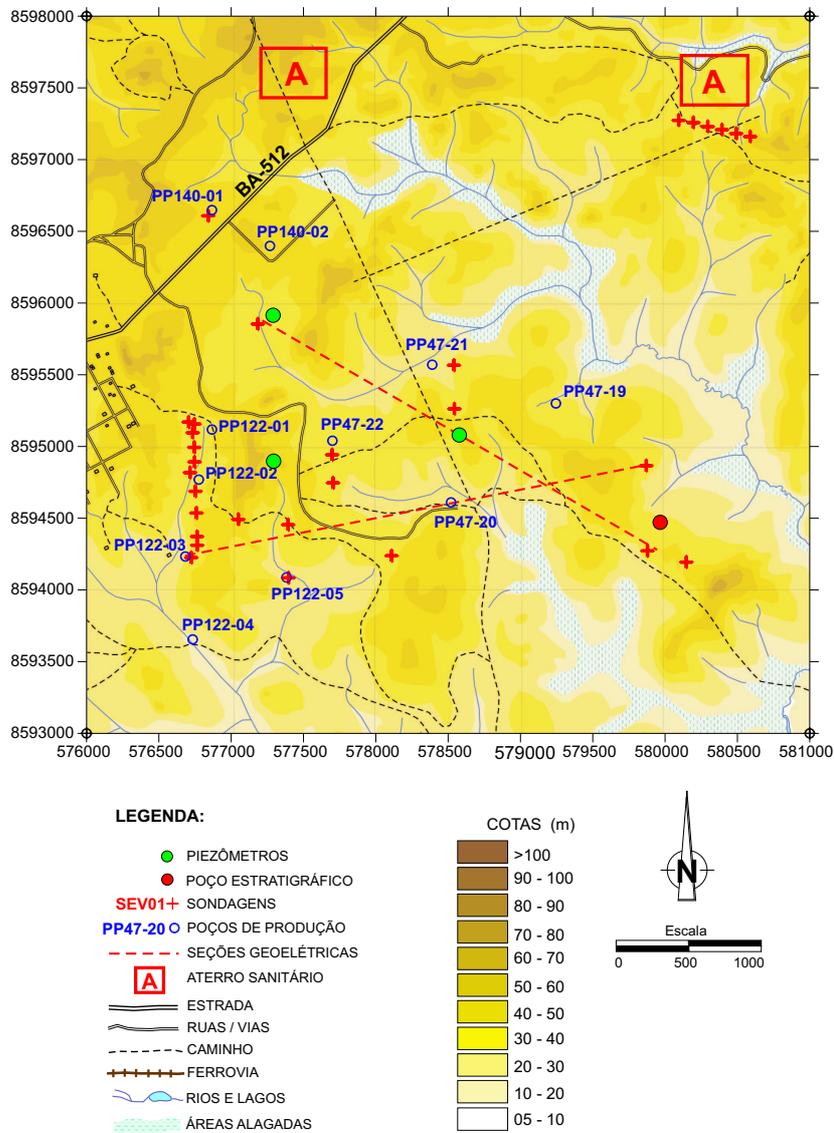


Figura IV.1: Localização dos piezômetros e do poço estratigráfico sugeridos no capítulo 4 deste trabalho.