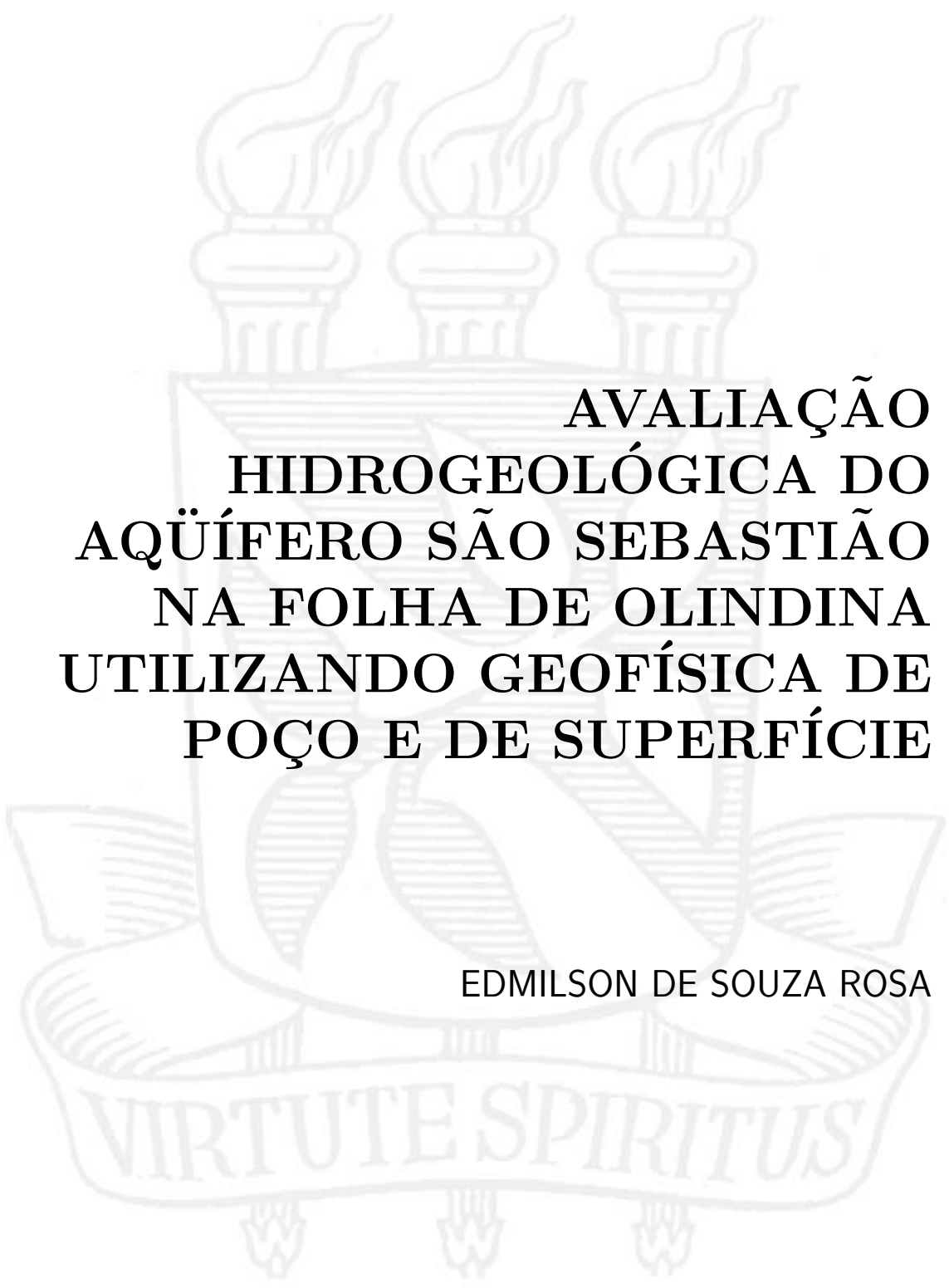


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



**AVALIAÇÃO
HIDROGEOLÓGICA DO
AQÜÍFERO SÃO SEBASTIÃO
NA FOLHA DE OLINDINA
UTILIZANDO GEOFÍSICA DE
POÇO E DE SUPERFÍCIE**

EDMILSON DE SOUZA ROSA

SALVADOR – BAHIA
MARÇO – 2004

**Avaliação hidrogeológica do aquífero São Sebastião na folha de
Olindina utilizando geofísica de poço e de superfície**

por

EDMILSON DE SOUZA ROSA

Geólogo (Universidade Federal de Pernambuco – 1986)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

EM

GEOFÍSICA

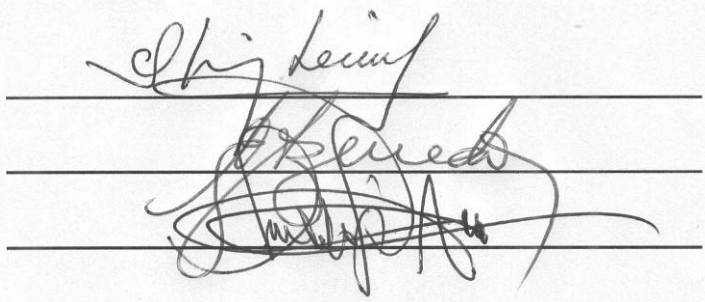
à

Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa

da

Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora



Dr. Olivar A. L. de Lima - Orientador

Dr. Antonio Expedito Gomes Azevedo

MC. Geraldo Girao Nery

Aprovada em 03 de março de 2004

A presente pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA (CPGG/UFBA), com recursos do convênio UFBA/MME/CPRM/CERB.

S729 Souza Rosa, Edmilson de,

Avaliação hidrogeológica do aquífero São Sebastião na folha de Olindina utilizando geofísica de poço e de superfície / Edmilson de Souza Rosa. — Salvador, 2004.

viii, 112 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2004.

1. Geofísica aplicada. 2. Geofísica (Métodos elétricos) 3. Avaliação hidrogeológica - São Sebastião, Aquífero I. Título. II. Tese

CDU: 550.370:556.3(043)

“...para não arrefecerdes, imaginai
que sabeis muito, para não
presumirdes, pensai que por mais
que souberdes, mui tereis a
aprender.”
Rui Barbosa.

Resumo

Este trabalho é o resultado de um estudo geofísico usando sondagens de eletrorresistividade, de perfilagens múltiplas e dados hidrogeológicos de poços tubulares, numa área de aproximadamente 3.200 km². Seus objetivos abrangem a avaliação do potencial hidrogeológico na borda leste da sub-bacia Tucano Sul-Central, em termos das espessuras das camadas aquíferas do membro superior da Formação São Sebastião, suas porosidades e permeabilidades assim como a qualidade de suas águas. Foram realizadas e interpretadas usando modelos uni-dimensionais, vinte e três sondagens elétricas verticais e interpretadas cinco perfilagens geofísicas múltiplas de poços.

O uso da técnica de sondagem elétrica vertical combinada à interpretação de características litológicas e de parâmetros hidráulicos T e K (derivados empiricamente a partir dos perfis geofísicos dos poços ou de dados de ensaios de bombeamento em poços tubulares profundos com perfis litológicos catalogados na CPRM e CERB), possibilitou um melhor conhecimento das feições hidrogeológicas da área de ocorrência do aquífero São Sebastião na folha de Olindina (escala 1:100.000). Os resultados geofísicos estão apresentados na forma de seções estruturais, mapas e gráficos de perfilagem, os quais exibem a geometria, a variação litológica e de permeabilidade do aquífero, além de confirmar que o padrão do fluxo hidráulico subterrâneo, em geral, acompanha o da drenagem superficial. A interpretação conjunta dos dados das sondagens e a parametrização com dados de poços possibilitaram uma boa calibragem e eliminação das ambigüidades nos modelos geoeletricos finais.

Os resultados sugerem também que a técnica da sondagem geoeletrica incorpora um critério seguro para locação de poços, especialmente nas extensas regiões de cobertura da Formação Marizal, com possibilidades de se fazer previsões não só da vazão, mas também da qualidade da água subterrânea.

Abstract

This work is the result of a geophysical study using electrical resistivity soundings, multiple well logging and hydrogeological well data, in a area of approximately 3,200 km². Its goals includes the estimation of the hydrogeologic potential of the eastern border of the Tucano Sul-Central sub-basin, in terms of aquifer's thickness (upper portion of the São Sebastião Formation), its porosity, permeability, and water quality. Twenty three vertical electrical soundings were performed and inverted based on 1-D models together with the interpretation of five multiple geophysical logs of wells in the area.

The use of vertical electrical soundings combined with lithologic interpretation and hydraulic parameters estimation of T and K in deep wells, from geophysical logs and pumping test data catalogued in CPRM and CERB companies, made possible to develop a better knowledgement of the main hydrogeologic aspects of the São Sebastião aquifer in Olindina plate (1:100,000 scale). The geophysical results are presented as strutural cross-section, maps and log data graphics, showing the geometry, lithologic features and permeability variation within the aquifer, and also confirm the similarity between the underground and superficial flow patterns. The jointing interpretation of the electrical sounding data with the parametrization with water well data, allows a good calibration and reduction of ambiguities on the final geoelectric models.

The results also suggest that electrical sounding technique is a useful criterion for well location, especially on the extense area covered by Marizal Formation, with chance of predicting not only the well discharge but also the quality of the stored groundwater.

Índice

Resumo	i
Abstract	ii
Índice	iii
Índice de Tabelas	v
Índice de Figuras	vi
Introdução	1
1 Área de estudo	4
1.1 Características fisiográficas	4
1.2 Características geológicas	5
1.2.1 Litoestratigrafia	6
1.2.2 Feições Estruturais	10
1.3 Características Hidrológicas	10
2 Fundamentos dos métodos geofísicos	19
2.1 Propriedades físicas das rochas	19
2.2 SONDAGEM ELÉTRICA DE SUPERFÍCIE	26
2.2.1 Potencial em meio homogêneo	28
2.2.2 Sondagem elétrica	29
2.2.3 Ambigüidades	30
2.3 Perfilagem de poços	32
2.3.1 Perfis de Potencial Espontâneo (PE)	33
2.3.2 Perfis de Raios Gama (GR)	34
2.3.3 Perfis elétricos de indução	35
2.3.4 Perfil sônico	35

3	Caracterização geofísica da área	38
3.1	Perfilagens de Poços	38
3.1.1	Metodologia	38
3.1.2	Avaliação geral da condutividade hidráulica	49
3.2	Caracterização geolétrica	50
3.2.1	Área da sub-bacia Tucano Sul	50
3.2.2	Área da sub-bacia Tucano Central	52
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
	Agradecimentos	90
	Referências Bibliográficas	91
I	SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS	95
II	Dados de localização das SEV's e dos poços perfilados	110

Índice de Tabelas

1.1	Parâmetros hidrodinâmicos: T ($m^2/s \times 10^{-4}$); K ($m/s \times 10^{-6}$); K_1 = condutividade hidráulica, considerando a espessura do aquífero; e K_2 = condutividade hidráulica, considerando a espessura total de filtros. A confiabilidade das estimativas, decresce, na ordem dos poços Entr. de Aporá, B2, e PF (testados com bomba submersível), MC e BS (testados com compressor). Não foram considerados, no cálculo da média, os parâmetros do método de Walton para o poço B2 e os parâmetros do método de Jacob/Cooper para o poço BS (por serem valores anômalos e pouco confiáveis).	13
3.1	Parâmetros hidráulicos de pacotes arenosos selecionados nos dois sistemas aquíferos identificados.	40
3.2	Parâmetros hidráulicos de alguns intervalos arenosos selecionados. Note que entre os intervalos 1 e 2 há uma lente de argila e entre as camadas 2 e 3 há um siltito argiloso que as separa.	41
3.3	Parâmetros hidráulicos computados para o poço PF	43
3.4	Poço Buriu II, Crisópolis - Tabela-resumo de parâmetros hidráulicos, onde a média de K nas camadas explotadas é de 2,79 enquanto a média geométrica de K na tabela 1.1 é de $2,99 \times 10^{-6} m/s$	44
3.5	Avaliação hidráulica comparativa dos poços. $Q/\Delta s$ é a vazão específica. *Avaliação superestimada.	49
II.1	Tabela de localização de poços e SEV's. O símbolo * na coluna de observações (OBS) indica que há um poço com perfilagem e uma SEV com os mesmos dados de localização.	111

Índice de Figuras

1.1	Localização da área de estudos	15
1.2	Legenda da Carta estratigráfica da Bacia do Tucano Sul (modificado de Guimarães, 2002).	16
1.3	Mapa Geológico com poços e SEV's orientadas utilizados nos perfis (parcial modificado de Guimarães, 2002)	17
1.4	Carta estratigráfica da Bacia do Tucano Sul (modificado de Muricy, 2001).	18
2.1	Disposição dos eletrodos no arranjo Schlumberger.	37
3.1	Poço Buriu II, Crisópolis - Tabela-resumo de parâmetros hidráulicos.	45
3.2	Poço Buriu II, Crisópolis - Valores comparativos de resistividades da SEV versus perfilagem.	46
3.3	Poço São Miguel 2, Município de Nova Soure. Correlação poço - SEV.	48
3.4	Poço Murici-Caldeirão, município de Itapicuru - perfis de GR, elétrico (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 55,42 m.	55
3.5	Poço Murici-Caldeirão, município de Itapicuru - perfis de: V_{sh} , STD, argilossidade da matriz (p); e porosidade.	56
3.6	Poço Murici-Caldeirão, município de Itapicuru - perfis de: Coeficiente de cimentação (m), fator de formação de resistividade da eq. 2.3 (F) e condutividade hidráulica (K em m/s).	57
3.7	Poço Baixa do Salgado, município de Ribeira do Amparo - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 59,91 m.	58
3.8	Poço Baixa do Salgado, município de Ribeira do Amparo - perfis de STD, V_{sh} , argilossidade da matriz (p); e de porosidade.	59
3.9	Poço Baixa do Salgado, município de Ribeira do Amparo - perfis de m , F ; e condutividade hidráulica.	60
3.10	Poço Baixa do Salgado locado numa altitude de 245m - Valores comparativos de resistividade interpretados na SEV versus médias da perfilagem, em Ohm.m.	61
3.11	Poço Pau Ferro, município de, município de Olindina - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 87,46 m.	62

3.12	Poço Pau Ferro, Município de Olindina - perfis de: V_{sh} , STD, argilosidade da matriz (p) e porosidade.	63
3.13	Poço Pau Ferro, Município de Olindina - perfis de m , F ; e de condutividade hidráulica.	64
3.14	Poço Pau Ferro - Olindina locado numa altitude de 235m - Valores comparativos de resistividade interpretados na SEV versus médias da perfilagem, em Ohm.m.	65
3.15	Poço Buriu II, município de Crisópolis - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 46,58 m.	66
3.16	Poço Buriu II, Município de Crisópolis - perfis de: V_{sh} , argilosidade da matriz (p), STD; e porosidade.	67
3.17	Poço BuriuII, município de Crisópolis - perfis de m , F e de condutividade hidráulica.	68
3.18	Poço São Miguel 2, município de Nova Soure - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 87,17 m.	69
3.19	Poço São Miguel 2, Município de Nova Soure - perfis de: V_{sh} , argilosidade da matriz (p), STD; e porosidade.	70
3.20	Poço São Miguel 2, município de Nova Soure - perfis de m , F e de condutividade hidráulica.	71
3.21	Poço Ql1-1 da PETROBRAS - perfis elétricos (PE, SN e LN).	72
3.22	Poço 1-IN-1, da PETROBRAS - perfis elétricos (PE, SN e LN).	73
3.23	Perfil AA' (Norte - Sul).	75
3.24	Perfil BB' (Oeste - Leste).	76
3.25	Perfil CC' (Oeste - Leste).	77
3.26	Mapa de isorresistividade aparente para $AB/2 = 100m$	79
3.27	Mapa de isorresistividade aparente para $AB/2 = 200m$	80
3.28	Mapa de isorresistividade aparente para $AB/2 = 500m$	81
3.29	Mapa de piezometria.	83
3.30	Mapa de profundidade do nível piezométrico.	84
3.31	Mapa de isosalinidade total, em mg/l.	86
I.1	SEV SV1IN, a 100 m do poço 1IN, da PETROBRAS. Esta SEV está sob influência de variações laterais.	95
I.2	SEV SV2SM2, a 1000 m do poço São Miguel2, da CERB.	96
I.3	SEV SV3BS, a 100 m do poço Baixa do Salgado, da CERB.	96
I.4	SEV SV4MC, a 1000 m do poço Murici/Caldeirão da CERB.	97
I.5	SEV SV5PF, junto ao poço Pau Ferro, Olindina, da CERB.	97

I.6	SEV SV6Q1, a 50 m do poço 1-Q1st-2 da PETROBRAS.	98
I.7	SEV SV7BII, na Localidade de Buriu, a 600 m do poço Buriu II, da CERB.	99
I.8	SEV SV8FA, na Localidade de Fazenda Alto, município de Ribeira do Amparo.	100
I.9	SEV SV9IC, na Localidade de Ingá.	100
I.10	SEV SV10RT, na Localidade de Riacho Tamboril.	101
I.11	SEV SV11FR, na Fazenda Romeiro - entre o poço 1-Q1st-2 da PETROBRAS e o de Murici-Caldeirão da CERB.	102
I.12	SEV SV12CB, na localidade de Capoeira de Baixo.	103
I.13	SEV SV13FS, nas cercanias da cidade de Olindina.	103
I.14	SEV SV14L, na localidade de Licoriroba (4 km a sul de Olindina).	104
I.15	SEV SV15CB, no povoado de Cana Brava.	104
I.16	SEV SV16BV, na localidade de Boa Vista, município de Inhambupe.	105
I.17	SEV SV17LF, na localidade de Lagoa Falso (Colônia de assentamento do INCRA).	105
I.18	SEV SV18PU, nas cercanias do povoado de Umbuzeiro.	106
I.19	SEV SV19S1, nas cercanias da cidade de Crisópolis.	107
I.20	SEV SV20AC - ao longo da estrada para Rio Real, na localidade de Alto da Capoeira.	108
I.21	SEV SV21RR - na estrada para Rio Real.	108
I.22	SEV SV22_17PG - na folha de Cipó.	109
I.23	SEV SV23_19PG - próxima à margem direita do rio Itapicuru.	109

Introdução

Após a desmobilização do programa de reconhecimento hidrogeológico da SUDENE, no início da década de 70, criou-se um 'vácuo' na geração de conhecimento para promover o desenvolvimento de políticas relacionadas ao aumento das disponibilidades hídricas no Nordeste brasileiro. O trabalho da SUDENE durou apenas uma década mas foi capaz de elaborar o *Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste*, o qual fornece, ainda hoje, dados utilizados nas mais diversas aplicações, apesar de sua paralização. Dentro deste contexto, a CPRM - Serviço Geológico do Brasil é uma instituição capaz de dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos pela SUDENE. Com este intuito, foi criado o Programa de Água Subterrânea para o Semi-Árido Brasileiro.

Há no Nordeste algo em torno de 150.000 poços tubulares, contando-se os paralizados e os poços em exploração. Como eles foram, em grande parte, construídos sem a presença de um técnico habilitado, ou não existem dados ou os mesmos estão incompletos e dispersos. Desta forma, fica difícil a implantação de um banco de dados consistente, fato que justifica, de partida, um cadastramento das fontes de abastecimento disponíveis. Assim, o programa da CPRM divide-se em quatro frentes de trabalho, quais sejam: **(i) Cadastramento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea** - poços tubulares, poços amazonas significativos, barragens subterrâneas e fontes naturais; **(ii) Rochas Cristalinas** - desenvolvimento de novas tecnologias para prospecção de água subterrânea em rochas cristalinas. Na região Nordeste, a qual engloba quase todo o polígono das secas, o subsolo é, em sua maior extensão superficial (cerca de 70%), formado por rochas cristalinas. A baixa pluviosidade, a pequena espessura do solo e a escassa cobertura vegetal são fatores limitantes para uma boa disponibilidade hídrica superficial. Estes fatores levam a uma procura intensa pela água subterrânea, mesmo reconhecendo-se o baixo potencial hídrico dessas rochas; **(iii) Caracterização Global de Aluviões** - mapeamento de todos os depósitos aluvionares e coberturas recentes, no âmbito das rochas cristalinas e avaliação preliminar das áreas promissoras. A concentração demográfica ao longo dos vales justifica a prospecção desses depósitos; e **(iv) Bacias Sedimentares** - realizar estudos hidrogeológicos nas bacias sedimentares costeiras e interiores da região Nordeste. As maiores disponibilidades existentes de água subterrânea

estão localizadas nas bacias sedimentares e são sub-utilizadas.

No caso particular da bacia de Tucano, estudos e trabalhos hidrogeológicos até então realizados, têm demonstrado a existência de excelentes horizontes aquíferos principalmente localizados nas seqüências mais superiores do preenchimento sedimentar, referido como Supergrupo Bahia (Grupos Ilhas e Massacará, de Viana et al. (1971)). Todavia, a grande extensão de áreas cobertas pelos depósitos da Formação Marizal e a estruturação da bacia em blocos falhados, alternando altos e baixos estruturais, traz sérios problemas para uma exploração mais generalizada dessas reservas, especialmente se os trabalhos exploratórios não forem adequadamente planejados.

Tem sido mostrado que as zonas de falhas podem funcionar tanto como barreiras semi-permeáveis (ou impermeáveis), como na forma de canais lineares de alta permeabilidade (Lima, 1993). Por outro lado, elas podem justapor rochas com elevados contrastes de propriedades hidráulicas. Com isso, processos de mistura e dispersão hidrodinâmica podem gerar águas de diferentes graus de salinidade, sendo relativamente freqüente, na bacia, a existência de poços com águas inadequadas para consumo humano e animal (Oliveira, 1986). O emprego de métodos geofísicos elétricos pode ser útil para reconhecer a presença dessas regiões anômalas e evitar perfurações infrutíferas. O presente trabalho constitui um exemplo prático de uma aplicação satisfatória da geofísica elétrica.

O ambicioso programa de águas subterrâneas da CPRM para o Nordeste visa reverter o quadro de estagnação do conhecimento hidrogeológico desta região e transcende às suas fronteiras. Em razão da multidisciplinaridade do tema e dos diversos interesses envolvidos para sucesso do programa, a CPRM vem propondo parcerias com outras instituições, tais como: SRH/MMA, FNS, INCRA, SUDENE, DNOCS, CODEVASF, Secretarias Estaduais de Recursos Hídricos, Agricultura e Saúde, Companhias Estaduais de Saneamento, Órgãos Ambientais, Universidades e Centros de Pesquisa. O presente trabalho resulta de um desses processos de cooperação técnico-científica que foi estabelecido com o centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia, em 1999.

Na realização deste trabalho foi adotada a seguinte metodologia: (i) Acesso intensivo aos bancos de dados da CPRM, PETROBRAS, CERB, CPGG/UFBA e de outras empresas particulares; (ii) Interpretação qualitativa e quantitativa dos dados de 5 perfilagens de poços contendo perfis de raios-gama, potencial espontâneo, de resistividade elétrica (SN - "Short Normal" e DIR - "Deep Induction Resistivity") e sônico; (iii) Execução e interpretação de 3 caminhamentos com sondagens elétricas verticais utilizando medições de resistividade aparente com arranjo Schlumberger de eletrodos, bem como coleta de amostras de água para análises físico-químicas; e (iv) Integração dos resultados e elaboração de mapas e secções

geoeletricos transversais.

Esses resultados estão apresentados em quatro capítulos. No primeiro, são apresentadas as características fisiográficas e geológicas da área de estudo, apontando seus principais problemas hidrogeológicos. No capítulo 2 contempla-se uma revisão das bases físicas e dos desenvolvimentos teóricos das metodologias utilizadas no trabalho. No capítulo 3 discute-se e integra-se os resultados obtidos com as sondagens elétricas e as perfilagens de poços, enquanto no capítulo 4 são destacadas as principais conclusões extraídas dessas análises.

1

Área de estudo

Neste capítulo, discorro resumidamente sobre a localização, a fisiografia, a geologia e a hidrologia da área, baseado em autores que fizeram propostas de atualizações conforme disponível na literatura (Caixeta et al. (1994), Muricy (2001), Guimarães (2002), dentre outros).

A área de estudo localiza-se na folha Olindina (mapa plani-altimétrico da PETROBRAS em escala 1:100.000), sendo delimitada pelos paralelos 11°30' e 12°00' e pelos meridianos 38°00' e 38°30' (figura 1.1 à página 15). Os poços e pontos onde foram realizadas medições geolétricas de superfície situam-se nos municípios de Olindina, Itapicuru, Crisópolis, Nova Soure, Ribeira do Amparo e Inhambupe - todos municípios baianos com sede dentro da sub-bacia Tucano Sul/Central, como descrita por Caixeta et al. (1994).

1.1 Características fisiográficas

Pela classificação de *Köppen* ocorre, na maior parte da área, o clima do tipo seco e quente de caatinga, sem estação seca definida e temperatura média superior a 18° C (*BSh*). Na parte sul e numa faixa estreita a leste da área, ocorre o tipo tropical chuvoso de floresta, com 1 a 3 meses secos (*Am*).

A geomorfologia da área é composta das unidades denominadas “*Tabuleiros*” e *rampas coluviais*, com densidades de drenagem média e de transição (risco médio de erosão/deposição), esculpidos nos arenitos da Formação Marizal e por *terraços fluviais* e *várzeas* neles encravados, com profundidades de incisão muito fortes e instáveis quanto ao risco de erosão/deposição.

Ocorrem na área os seguintes tipos de *solos* (RADAMBRASIL, 1983): (i) *Na parte a sul do Rio Itapicuru*: Latossolo vermelho - amarelo álico (saturação com alumínio maior que 50%) (LVa); Podzólico vermelho - amarelo eutrófico (saturação de base maior que 50%) (PE60); nas partes baixas, Planossolo sólido eutrófico (PSe31); e, em menores áreas, Areias quartzosas álicas (AQa4). (ii) *Parte norte do Rio Itapicuru*: Ocorre, em sua maior parte, o solo AQa4, descrito acima; em menores áreas, o PSe; e, restrito à parte noroeste: ocorre o solo Podzólico vermelho-amarelo distrófico (saturação de base menor que 50%) (PVd).

Segundo RADAMBRASIL (1983), ocorrem na área as seguintes unidades de cobertura vegetal: (i) Nos rios, *culturas cíclicas* (Acc); (ii) Mais freqüente na parte norte do que na parte sul, *vegetação arbórea, aberta, sem floresta-de-galeria* (Sas); (iii) Mais freqüente na parte sul, *pastagens* (Ap); (iv) Mais freqüente na parte norte da área, *vegetação de estepe, arbórea aberta, com palmeiras* (Eap); e, (v) Na parte noroeste da área, *transição de savana para estepe* (SE).

1.2 Características geológicas

A área estudada abrange a parte sul da sub-bacia Tucano Central, e a parte nordeste da sub-bacia Tucano Sul, as quais integram o rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (RTJ). Essa megaestrutura, interpretada como uma bacia do tipo “rifte-sag” (Magnavita, 1992), acomoda mais de 9.000 m de sedimentos no seu principal depocentro, e possui uma área aproximada de 46,5 mil km², estendendo-se por cerca de 450 km na direção N-S, do Recôncavo até o rio São Francisco, onde se inflete para nordeste.

Um modelo de evolução tectonossedimentar baseado na utilização da estratigrafia de seqüências foi proposto por Guimarães (2002) para as bacias lacustrinas Tucano Sul/Central e Recôncavo Norte, as quais incluem rochas sedimentares acumuladas entre o Neojurássico e o Eocretáceo, durante os estágios iniciais do rifteamento que deu origem ao oceano Atlântico Sul. Quatro tectonosseqüências constituídas de seis tratos de sistemas, depositados por processos de fluxos gravitacionais e eólicos e por mecanismos de tração e suspensão, foram reconhecidas na área. A acumulação dessas tectonosseqüências ocorreram durante três principais fases:

- A fase *Pré-Rifte*, produto do estiramento crustal, corresponde à Tectonosseqüência TPRR¹, sendo formada por um trato de sistema de lago alto (ts-I);

¹Esta sigla significa Tectonosseqüência **PRé-Rifte**. Similarmente, TSR e TPOR, que serão citadas a seguir, significam Tectonosseqüência **SinRifte** e Tectonosseqüência **PÓs-Rifte**, respectivamente. As iniciais maiúsculas são propositadamente colocadas mesmo sem justificativas gramaticais.

- A fase *Sin-Rifte*, que representa o período de subsidência mecânica da bacia, corresponde às Tectonossequências TSR_1 e TSR_2 , constituídas por tratos de sistemas de margem de plataforma lacustre (ts-II), transgressivo (ts-III) e de lago alto (ts-IV) (para a Tectonossequência TSR_1) e de lago baixo (ts-V) (para a Tectonossequência TSR_2);
- A fase *Pós-Rifte*, gerada por processos de subsidência flexural, causados possivelmente pelo resfriamento litosférico. Corresponde à Tectonossequência TPOR, composta por uma trato de sistemas de lago baixo (ts-VI).

As feições estruturais do embasamento cristalino, orientadas NE-SW, N-S e NW-SE, controlam a geometria do rifte RTJ, constituído na área por dois semigrábens assimétricos paralelos, que apresentam uma borda flexural e uma borda falhada e estão separados pela Rampa de Revezamento de Aporá. Um semigráben, corresponde às sub-bacias do Tucano Sul e Central (onde está inserida a área de estudos), limitadas pela falha de Itapicuru, e o outro constitui a Bacia do Recôncavo.

Os sedimentos dessa grande “fossa” tectônica, encravada no Cráton do São Francisco (Almeida, 1977), provieram, na grande maioria, de suas bordas flexurais, localizadas a oeste e, de forma subordinada, das bordas falhadas, situadas a leste. Mudanças na polaridade dos sedimentos aconteceram ao longo da evolução do rifte: (i) Durante a fase *Pré-Rifte* a área-fonte de sedimentos situava-se a norte e oeste da estrutura; (ii) Em um primeiro estágio da fase *Sin-Rifte* (Andar Rio da Serra) os sedimentos provieram de oeste-sudoeste; (iii) Um segundo estágio tectônico importante da fase *Sin-Rifte* aconteceu durante o Eo-Jiquiá, quando a área-fonte posicionou-se a norte-noroeste da Bacia do Tucano Sul/Central; (iv) A terceira e última fase tectônica *Pós-Rifte* foi marcada pela possibilidade de existência de várias áreas-fontes, porém as medidas de paleocorrentes apontam para uma área-fonte importante, localizada a norte da Bacia Tucano Sul/Central.

A Bacia do Tucano compreende três sub-bacias: Norte, Central e Sul. As afinidades estruturais e estratigráficas permitem a análise em conjunto dos segmentos sul e central (estes dois segmentos englobam a área de estudos). As bacias do Recôncavo e Tucano Sul/Central limitam-se com o embasamento a leste por falhamentos de grande rejeito, e a oeste por falhas menores ou mesmo flexuras. O limite norte da sub-bacia Tucano Central com a sub-bacia Tucano Norte é no sistema de falhas Vaza-Barris. O limite entre as bacias do Recôncavo e Tucano se dá no Alto ou Rampa de Revezamento de Aporá (Guimarães, 2002).

1.2.1 Litoestratigrafia

Preenchem as sub-bacias Tucano Sul e Central as seguintes unidades litológicas formalmente descritas e designadas por geólogos da PETROBRAS e representadas esquematicamente na coluna da figura 1.4:

Formação Afligidos - Definida por Aguiar e Mato (1990), engloba dois membros: Pedrão e Cazumba. O primeiro constitui-se de arenitos finos e muito finos, cinza-claros e beges. O segundo caracteriza-se por folhelhos vermelhos de partição blocosa, com níveis sílticos esbranquiçados. Seus contatos são discordantes: o inferior com o embasamento e o superior com a Formação Aliança. A idade indicada por fósseis é permiana para os folhelhos do membro Cazumba (Aguiar e Mato, 1990). Ambiente: Plataforma rasa (Guimarães, 2002).

GRUPO BROTAS - Correspondente ao trato de sistema ts-I (lago alto) da fase de tectonossequências TPRR. Inclui as formações Aliança e Sergi.

Formação Aliança - Depositada em ambiente fluvio-lacustre de clima árido, inclui dois membros: (i) Boipeba - Arcóseos finos a médios vermelhos e marrons, com estratificação cruzada, depositados discordantemente sobre a Formação Afligidos; e (ii) Capianga - Folhelhos vermelho-tijolo sotopostos, concordantemente, à Formação Sergi.

Formação Sergi - Arenitos finos a conglomeráticos, com estratificações cruzadas e acanaladas, com intercalações de folhelhos e conglomerados (Viana et al., 1971). Depositada em sistemas fluviais entrelaçados em planície, com retrabalhamento em sistema deposicional eólico. Idade presumida: Neo-Jurássica.

GRUPO SANTO AMARO - Este grupo subdivide-se nas formações Itaparica, Água Grande, Candeias e Maracangalha (esta última somente foi reconhecida na bacia do Recôncavo, por isso não será aqui descrita), todas elas correspondentes a tectonossequência TSR₁. A idade é Berriasiana a Barremiana (Cretáceo Inferior a Médio), conforme ostracodes e polimorfos:

Formação Itaparica - Correspondente ao trato de sistemas de margem de plataforma lacustre (ts-II). Inclui folhelhos marrons e cinza-oliva lacustres, sobrepostos, concordantemente, à Formação Sergi, e sotoposto, em discordância, à Formação Água Grande (Silva, 1978). Idade: Eo-Berriasiana.

Formação Água Grande - Também correspondente ao trato de sistema de margem de plataforma lacustre (ts-II). Compõe-se de arenitos finos a grossos, cinza-claros a esverdeados, ricos em estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande portes. Os contatos inferior e superior são discordantes. O ambiente de deposição é interpretado por vários autores como

sistemas fluviais. A ampla distribuição de arenitos com retrabalhamento eólico, na parte superior, evidencia uma pausa na sedimentação e serve de critério secundário na definição da discordância com a Formação Candeias. Esta quebra na sedimentação está associada à mudança de clima árido para úmido (Regali, 1966). Esta unidade foi reconhecida apenas nas bacias do Recôncavo e Tucano Sul. A seção-tipo mostra uma espessura de 26 metros (1082 - 1108) do poço 7-AG-219-BA perfurado em Pojuca.

Formação Candeias - Seção predominantemente argilosa entre os arenitos Água Grande e os clásticos do Grupo Ilhas (Viana et al., 1971). Corresponde ao trato de sistema transgressivo (ts-III). Inclui os seguintes membros: (i) Tauá - folhelhos escuros, fósseis e com partição acicular; e (ii) Gomo - folhelhos cinza-esverdeados, laminados com delgadas camadas de calcários e arenitos finos, cinza-claros. Idade: Eo-Rio da Serra com base em ostracodes não-marinhas. Ambiente: Lacustre com subsidência rápida e forte aporte sedimentar. Nas bacias de Tucano e Jatobá, os folhelhos Candeias são substituídos por uma seção predominantemente arenosa, que mais apropriadamente estaria incluída no Grupo Ilhas.

GRUPO ILHAS - Seção areno-argilosa entre os folhelhos Candeias e os arenitos do Grupo Massacará (Viana et al., 1971). Corresponde ao trato de sistema de lago alto (ts-IV) da Tectonossequência TSR_1 . Inclui as formações Marfim e Pojuca. Idade Valanginiano a Aptiano Ambiente: Deltaico.

Formação Marfim - Na definição original abrangia duas unidades: (i) Camadas Coriaçu, agora integrantes da formação Maracangalha, que só ocorre na Bacia do Recôncavo; e (ii) Membro Catu - arenitos limpos, muito finos a médios, bem selecionados, cinza-claros, com camadas de folhelhos cinza-esverdeados intercaladas (Viana et al., 1971);

Formação Pojuca - Intercalações de arenitos cinzas, muito finos a médios, folhelhos cinza-esverdeados, siltitos cinza-claros e calcários castanhos, que se sobrepõem à Formação Marfim.

Formação Taquipe - Compõem-se de folhelhos cinzas, com estratificações paralelas e lentes de arenitos muito finos maciços (Netto et al., 1984). Ocupa uma feição erosiva na forma de "canyon", alongada na direção norte-sul. Constatada na porção centro-oeste do Recôncavo, estende-se para norte até a sub-bacia do Tucano Sul (Bueno, 1987; Picarelli e Caixeta, 1991). Assim, esta formação sobrepõe-se em discordância erosiva à Formação Pojuca, e é recoberta concordantemente pela Formação São Sebastião.

Formação São Sebastião - Aqui considerado o sistema de aquíferos mais importante. Esta unidade, e as mais recentes que serão a seguir descritas são significativas para o presente estudo pois estão, no mínimo, parcialmente investigadas pelos métodos geofísicos

ora empregados. As unidades anteriormente descritas não ocorrem na área de estudos ou encontram-se a profundidades superiores a 500 metros.

GRUPO MASSACARÁ - Definido por Viana et al. (1971), compõe-se de arenitos grossos, amarelo-avermelhados, com intercalações de argilas sílticas, depositados por sistemas fluviais atuantes do Berriasiano ao Eoaptiano. *É representado unicamente pela Formação São Sebastião* e inclui os membros: (i) Paciência (arenitos finos a grossos e folhelhos pretos), correspondente ao trato de sistema de lago alto ts-IV; (ii) Passagem dos Teixeiras (arenitos finos a médios e folhelhos cinzas), também correspondente ao trato de sistema ts-IV e tectonossequência TSR₁; e (iii) Rio Joanes (arenitos finos e argilas avermelhadas), correspondente ao trato de sistema de lago baixo ts-V e tectonossequência TSR₂, definidos em afloramentos. A exemplo dos outros dois membros da Formação São Sebastião, este membro foi definido na Bacia do Recôncavo por Pontes e Ribeiro (1964).

Guimarães (2002) e Muricy (2001) adotaram (e também aqui o será), a seguinte descrição do **GRUPO MASSACARÁ**:

- **Formação São Sebastião Inferior (K_{ss(i)})** que só aflora a leste da sub-bacia do Tucano Sul, numa faixa estreita orientada N-S, corresponde aos membros Paciência e Passagem do Teixeiras na Bacia do Recôncavo, e é similar, inclusive na assinatura em perfilagem elétrica, à unidade Umburana, é composta por arenitos finos a médios, siltitos e eventuais conglomerados; e
- **Formação São Sebastião Superior (K_{ss(s)})** a qual aflora ao longo do rio Itapicuru e na parte nordeste da área. Corresponde ao membro Rio Joanes da Bacia do Recôncavo e é constituída de arenitos médios a grossos até conglomeráticos, arenitos finos e pelitos depositados através de sistemas fluviais, meandantes e entrelaçados, retrabalhados pelo vento.

Formação Salvador - Caracterizada pelos conglomerados e arenitos da borda leste das bacias do Recôncavo e Tucano Sul/Central, e borda noroeste das bacias de Jatobá e Tucano Norte. Os conglomerados são resultados de leques aluviais sintectônicos e marcam a atuação das falhas de borda que caracterizam a fase rifte destas bacias.

Formação Marizal - Esta unidade é aflorante em grande extensão da área de estudos. Corresponde à tectonossequência TPOR e é relacionada ao trato de sistemas de lago baixo (ts-VI). Caracteriza-se por arenitos finos a grossos, cinza a amarelos, com estratificações cruzadas, de idade Neo-Aptiana. Segundo Guimarães (2002), a espessura desta formação chega a 470 metros (poço FPO-1), localizado a noroeste da cidade de Sátiro Dias. Na área de estudos, como mostram os perfis construídos, a espessura da formação é inferior a 170

metros. Com a queda generalizada do nível de base do lago, sistemas fluviais de alto e médio gradientes e leques aluviais subaéreos dominaram o *ambiente*.

Formação Barreiras - Congrega areias grossas, com estratificações cruzadas, de idade Pliocênica (Bigarella, 1975). São relatados depósitos a sul de Inhambupe, com espessura máxima de 60 metros (igual profundidade é determinada nas proximidades do poço IN-1 da PETROBRAS compondo extensos tabuleiros dispostos em patamares ligeiramente inclinados em direção à costa.

Coberturas Residuais e Detríticas - *As coberturas residuais* foram cartografadas apenas na parte noroeste da área (figura 1.2), sobre a Formação Marizal. Trata-se de areias grossas, médias e finas e de argilas esbranquiçadas, amareladas e avermelhadas, derivadas de processos intempéricos atuantes sobre a Formação Marizal, durante o Quaternário, sem envolvimento de transporte. *As coberturas detríticas* ocorrem ao longo do rio Itapicuru e de seus principais afluentes (figura 1.2). Acumulam-se nos leitos e margens como areias, siltes, argilas e cascalhos com estruturas primárias preservadas.

1.2.2 Feições Estruturais

Os sistemas de falhas e fraturas observados na área de estudos permitem uma descrição distinta das duas sub-bacias que estão representadas na área, as quais são separadas por uma falha de rejeito dextral, com direção 305° Az ($N55^\circ W$) e mergulho para sudeste, denominada *Falha de Itapicuru* (Muricy, 2001; Guimarães, 2002).

- **Sub-bacia Tucano Sul** - As falhas e fraturas ocorrem com igual frequência nas direções 50° Az e 325° Az e, com menor frequência e restritas ao setor aflorante da Formação São Sebastião, observam-se falhas com direção 20° Az; e
- **Sub-bacia Tucano Central** - Por possuir maior extensão de área aflorante da Formação São Sebastião (a qual apresenta a maior frequência de falhas de toda a área de estudos) do que a sub-bacia Tucano Sul, não se observam falhas inferidas cobertas pela Formação Marizal, ao contrário do que ocorre naquela sub-bacia. Observam-se descontinuidades com direções 25° Az e 45° Az no setor sudeste da sub-bacia e 60° Az a noroeste, nesta ordem de frequência.

Com relação ao comportamento hidráulico das falhas, há evidências de que muitas são permeáveis, uma vez que poços locados junto a elas têm capacidades de produção nitidamente superiores à de poços locados em áreas sem evidência de falhas ou fraturas nas proximidades.

1.3 Características Hidrológicas

Nesta subseção são analisadas as características hidrológicas da bacia do rio Itapicuru, uma vez que ele atravessa a área de estudos numa direção, a grosso modo, de oeste para leste e drena cerca de 90% da área. O potencial hídrico desta bacia tem sido classificado como **4eC** com o seguinte significado: (a) *Para águas de superfície*: **4** = classe superconcentrada (menos de 3 meses de excedente hídrico); **e** = muito fraca (escoamento superficial (r) < $10.000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{ano}$); e (b) *Para águas de subsolo*: **C** = potencial hídrico médio (de 2 a $7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{ano}$). Onde excedente hídrico = $P - (r + EP)$, r = escoamento superficial = $P - (I + ER)$, P = Precipitação, EP = Evapotranspiração Potencial, I = Infiltração, e ER = Evapotranspiração Real, todos os termos na mesma unidade ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{ano}$).

O potencial hídrico explorável de superfície chega a $5,1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$, para uma área de 36.208 km^2 , o que representa 5% das disponibilidades hídricas totais da bacia. As precipitações na área são muito irregulares, com médias anuais que variam de 600 mm a noroeste, até 1.150 mm a sudeste para os períodos de 1934 a 1960 e 1983 a 1990 (RADAMBRASIL, 1983).

A avaliação do comportamento hídrico do rio Itapicuru, feita com base na comparação das descargas médias mensais, permitiu concluir que não existe o esperado aumento da área de drenagem de montante para juzante. De Jacobina até a ponte no município de Euclides da Cunha, o incremento de vazão pode ser considerado normal, nas condições do clima semi-árido com curta estação chuvosa. Entretanto, da ponte de Euclides da Cunha para Cipó, daí para Itapicuru e em seguida para Altamira, quase na foz deste rio, observam-se as maiores discrepâncias, principalmente entre Cipó e Itapicuru.

Esta anomalia foi detectada mas não explicada em CERB e DNOCS (1977), quando se afirma: "...existe uma dificuldade muito grande em se determinar o volume escoado superficialmente para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru, em virtude do comportamento estranho que vêm apresentando os dados de descarga, tal como postos a juzante, mostrando descargas maiores que postos a montante, que em outros períodos invertem este comportamento, para em seguida assumirem a maneira inicial, não permitindo, desta forma, que se chegue a uma conclusão lógica, pelo menos no momento...".

Entretanto, pode-se dizer que as elevadas taxas de evaporação, aliada à perdas ou ganhos de água para aquíferos adjacentes têm influência fundamental nesta anomalia, que ocorre principalmente durante os meses de águas altas. Porém, não deve ser descartada a hipótese de possível inconsistência de dados derivada da operação dos fluviômetros, tão comum nas áreas mais afastadas, no interior. A hipótese mais provável, todavia, é a da interação com

os aquíferos adjacentes fortalecida em meses de águas altas.

O *potencial hidrogeológico explorável* na bacia do Itapicuru foi estimado em $9,7 \times 10^9$ m³/ano, o que representa 95% do potencial total. A presente descrição será subdividida levando-se em conta três unidades hidrogeológicas em ordem de importância, em termos de volume de água armazenada: Aluviões, Grupo Barreiras e sistema Marizal-São Sebastião.

- *Aluviões* - O potencial hídrico é classificado como bom, tendo como fatores limitantes a extensão, a pequena espessura dos depósitos e os riscos de contaminação. O excedente hídrico foi estimado em $(7 \text{ a } 13) \times 10^5$ m³/km²/ano, a transmissividade (T) em $3,2 \times 10^{-2}$ m²/s e a permeabilidade (K) em 4×10^{-3} m/s (RADAMBRASIL, 1983).
- *Grupo Barreiras* - O potencial hídrico é médio, limitado pela litologia, relevo, condições de realimentação e baixa permoporosidade. Existem dados de dois poços que produzem vazões entre 2 e 3 m³/h. A transmissividade foi estimada em 5×10^{-3} m²/s, e a permeabilidade em 2×10^{-5} m/s. A recarga ocorre principalmente pela infiltração direta das chuvas e a descarga ocorre para os níveis de base regionais (aquíferos subjacentes) e pela evapotranspiração.

Autores como Guimarães (2002) e Carvalho e Costa (1996), classificam esta unidade, juntamente com a Formação Marizal e as coberturas detríticas e residuais, como parte integrante do “Sistema Intergranular Livre”, o qual é considerado de alta importância hidrogeológica, como zona de recarga e “excelente reservatório de água subterrânea”. Esta última classificação foi motivada pela boa transmissividade das aluviões e da Formação Marizal e/ou pelo fato da mais econômica e freqüente exploração daquela unidade.

- *Sistema Marizal-São Sebastião* - Engloba uma área de 6.525 km² das sub-bacias Tucano Sul e Central. Esta unidade sedimentar tem uma direção N-S, sendo litologicamente constituída por sedimentos clásticos com espessura que alcança mais de 4.000 m. Em afloramentos predomina o caráter arenoso, enquanto em profundidade ocorrem variações faciológicas constituindo, assim, aquíferos livres e confinados (como veremos adiante, o comportamento livre está restrito a parte noroeste da área). A alimentação hídrica do sistema se faz pelas precipitações diretas (observa-se alto percentual de infiltração na área), e por transferência vertical a partir do sistema livre das coberturas.

As características dimensionais e parâmetros hidrodinâmicos médios, determinados a partir de ensaios de bombeamento, são:

$$\begin{array}{lll}
A = 6.525 \text{ km}^2 & C = 150 \text{ m} & V_p = 2,9 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{ano} \\
P = 790 \text{ mm/ano} & S/U = 3 \times 10^{-2} & T_i = 4,5\% \\
T = 3,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} & K = 2,4 \times 10^{-5} \text{ m/s} & I = 35,5 \text{ mm/ano} \\
i = 2 \times 10^{-2} & V_p = 515,5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano} & ER = 790 \text{ mm/ano} \\
L = 100 \text{ km} & V_e = 2,3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano} & Re = 9700 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \\
H = 0 \text{ mm/ano} & ES = 35,5 \text{ mm/ano} &
\end{array}$$

Onde: A = área da bacia; C = espessura da camada saturada; V_p = reserva permanente = $A \times C \times S/U$; P = precipitação = $I + ES + ER$; S/U = coeficiente de restituição ou de armazenamento; T_i = taxa de infiltração = V_e/V_p ; T = transmissividade; K = permeabilidade; I = infiltração = $H - ES$; i = gradiente hidráulico; V_p = volume de precipitação = $P \times A$; ER = evapotranspiração real = $P - (I + ES)$; L = frente de escoamento; V_e = vazão de escoamento natural = $T \times i \times L$; Re = reserva explorável = V_p para rochas cristalinas e $1/3 V_p$ para rochas sedimentares; H = excedente hidráulico = $I + ES$, quando $H = 0$, $P = ER$ e $I = ER$; ES = escoamento superficial = $P - (I + ER)$.

Estimativas mais atuais de T e K , realizadas pelo autor a partir de dados de ensaios de bombeamento constantes em relatórios de poços da CERB, indicam valores próximos aos acima mencionados, conforme mostrado na tabela 1.1.

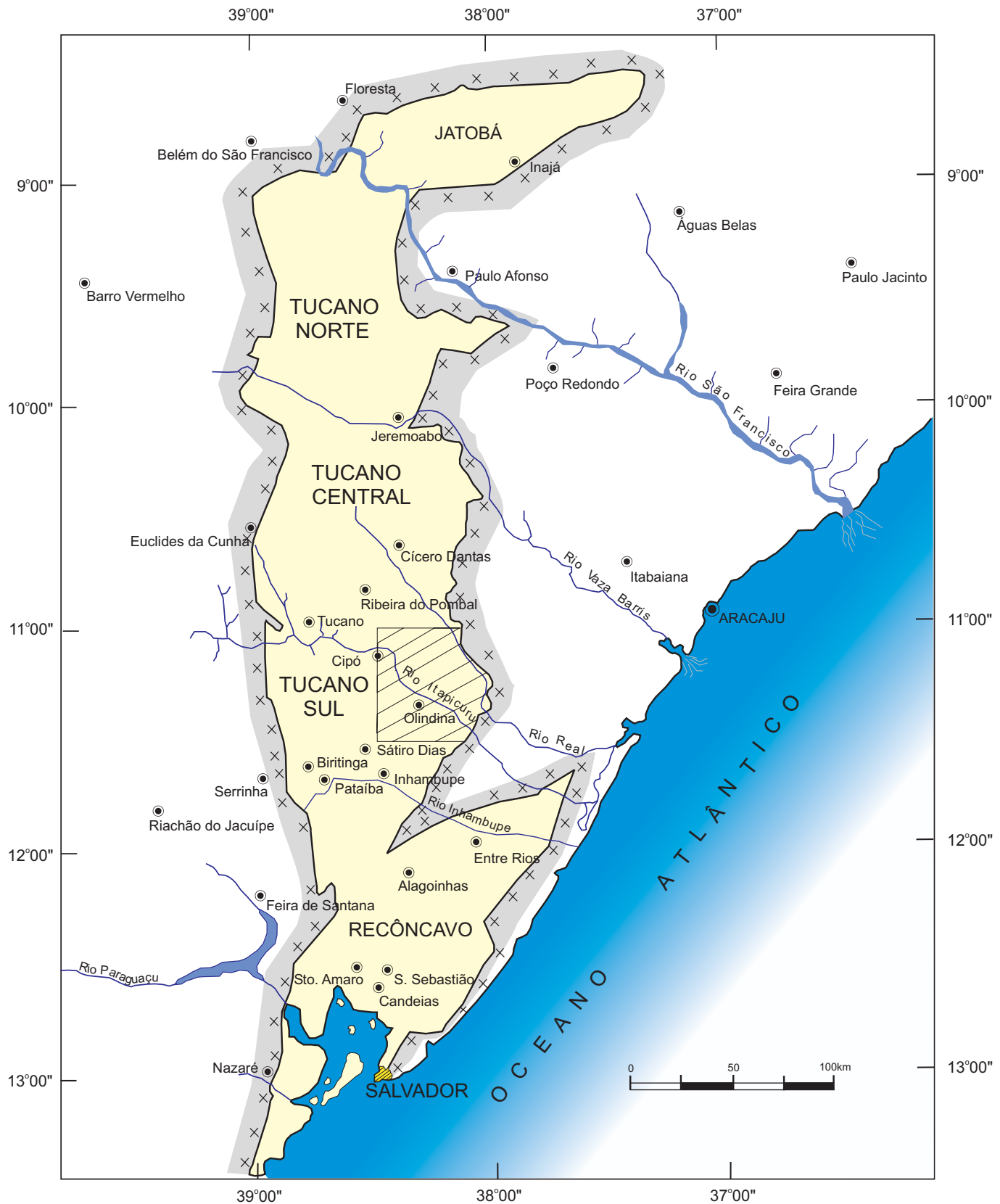
Poço	Theis	Jacob/Cooper	Walton	Hantush1	Média
B2	$T = 2,8$ $K_1 = 2,77$ $K_2 = 7,78$	$T = 4,9$ $K_1 = 4,89$ $K_2 = 13,0$	$T = 24,9$ $K_1 = 24,9$ $K_2 = 69,2$	$T = 2,003$ $K_1 = 1,98$ $K_2 = 5,56$	$T = 3,23$ $K_1 = 3,2$ $K_2 = 8,78$
MC	$T = 8,176$ $K_1 = 11,05$ $K_2 = 22,71$	$T = 6,511$ $K_1 = 8,8$ $K_2 = 18,08$	$T = 4,579$ $K_1 = 6,19$ $K_2 = 12,72$	$T = 4,318$ $K_1 = 5,83$ $K_2 = 12,0$	$T = 5,896$ $K_1 = 7,968$ $K_2 = 16,38$
PF		$T = 58,98$ $K_1 = 49,15$ $K_2 = 64,9$	$T = 13,4$ $K_1 = 11,16$ $K_2 = 14,56$		$T = 36,19$ $K_1 = 30,15$ $K_2 = 39,73$
BS		$T = 24,68$ $K_2 = 40,0$	$T = 4,28$ $K_2 = 6,93$		$T = 4,28$ $K_2 = 6,93$
Entr.de Aporá			$T = 14,2$ $K_1 = 6,26$		$T = 14,2$ $K_1 = 6,26$

Tabela 1.1: Parâmetros hidrodinâmicos: T ($\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-4}$); K ($\text{m}/\text{s} \times 10^{-6}$); K_1 = condutividade hidráulica, considerando a espessura do aquífero; e K_2 = condutividade hidráulica, considerando a espessura total de filtros. A confiabilidade das estimativas, decresce, na ordem dos poços Entr. de Aporá, B2, e PF (testados com bomba submersível), MC e BS (testados com compressor). Não foram considerados, no cálculo da média, os parâmetros do método de Walton para o poço B2 e os parâmetros do método de Jacob/Cooper para o poço BS (por serem valores anômalos e pouco confiáveis).

Há uma quase ausência de escoamento superficial, de modo que o volume infiltrado escoasse centrífugamente das zonas mais elevadas para os níveis de base regionais. É comum a presença de ressurgências nas depressões que facilitam a evapotranspiração que é o exutório mais eficaz.

Quanto ao aquífero São Sebastião, a circulação hídrica nas camadas mais profundas é controlada pelas feições tectônicas da unidade. O sistema possui potencial hidrogeológico médio, embora dados estatísticos revelem a unidade como boa, tendo como fatores limitantes as variações laterais de permeabilidade, os elementos fisiográficos e um nível piezométrico regional baixo. Poços com cotas superiores a 300 m têm níveis estáticos e dinâmicos tão baixos, que dificultam a captação da água. Dados estatísticos de poços na área (35 poços) revelam vazões específicas médias de $2,8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, com variações de 0,8 (a norte da faixa de exposição) até $18 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Neves et al., 1968).

Há autores que incluem a Formação São Sebastião e o Grupo Ilhas numa única unidade classificada como “Sistema Aquífero Parcialmente Confinado” de alto potencial hidrogeológico como reservatório. Esta unidade forma o conjunto faciológico mais espesso e o sistema aquífero mais importante da bacia (Guimarães, 2002; Carvalho e Costa, 1996).



Desenho modificado: de Ricardo Hagge 2000

Figura 1.1: Localização da área de estudos



Figura 1.2: Legenda da Carta estratigráfica da Bacia do Tucano Sul (modificado de Guimarães, 2002).

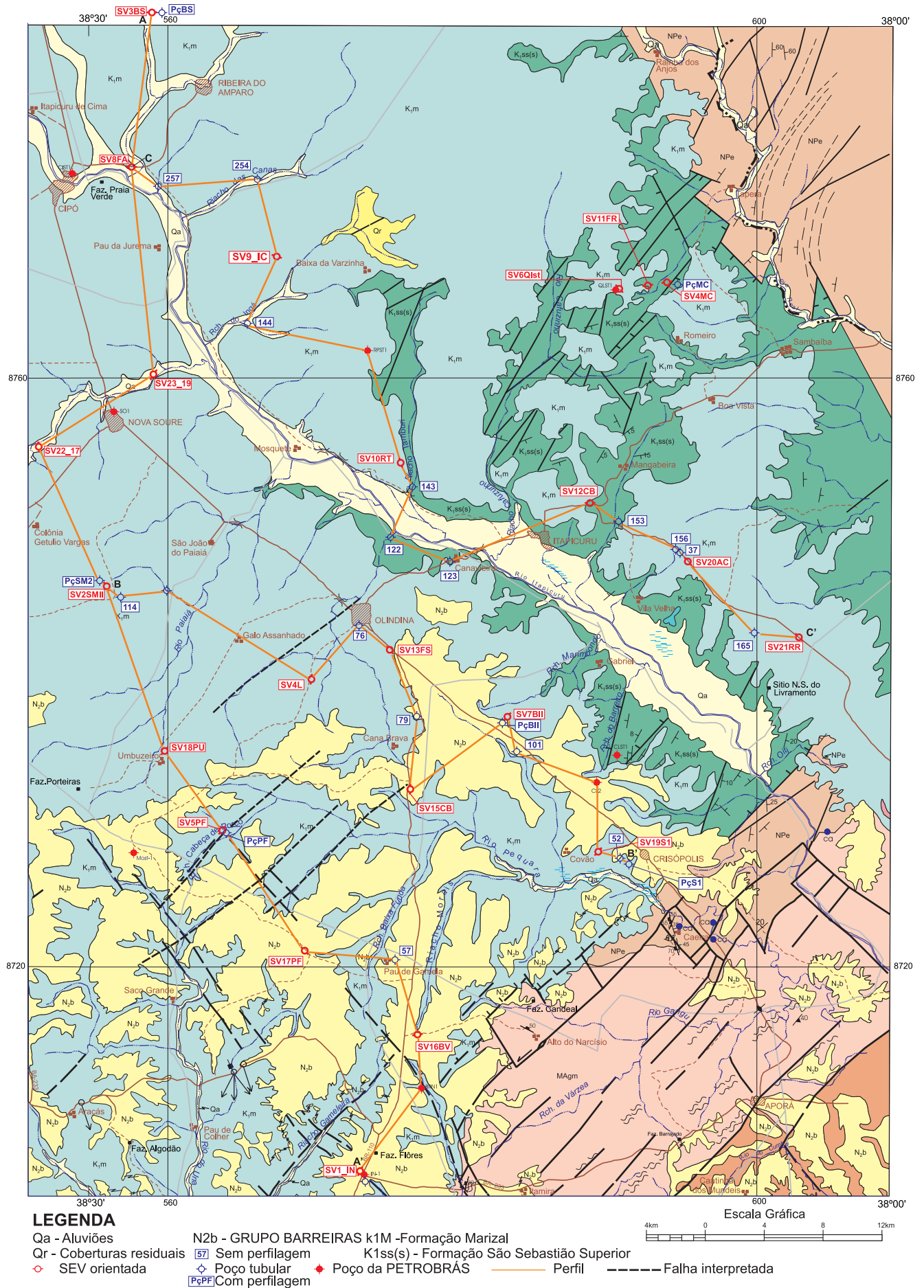
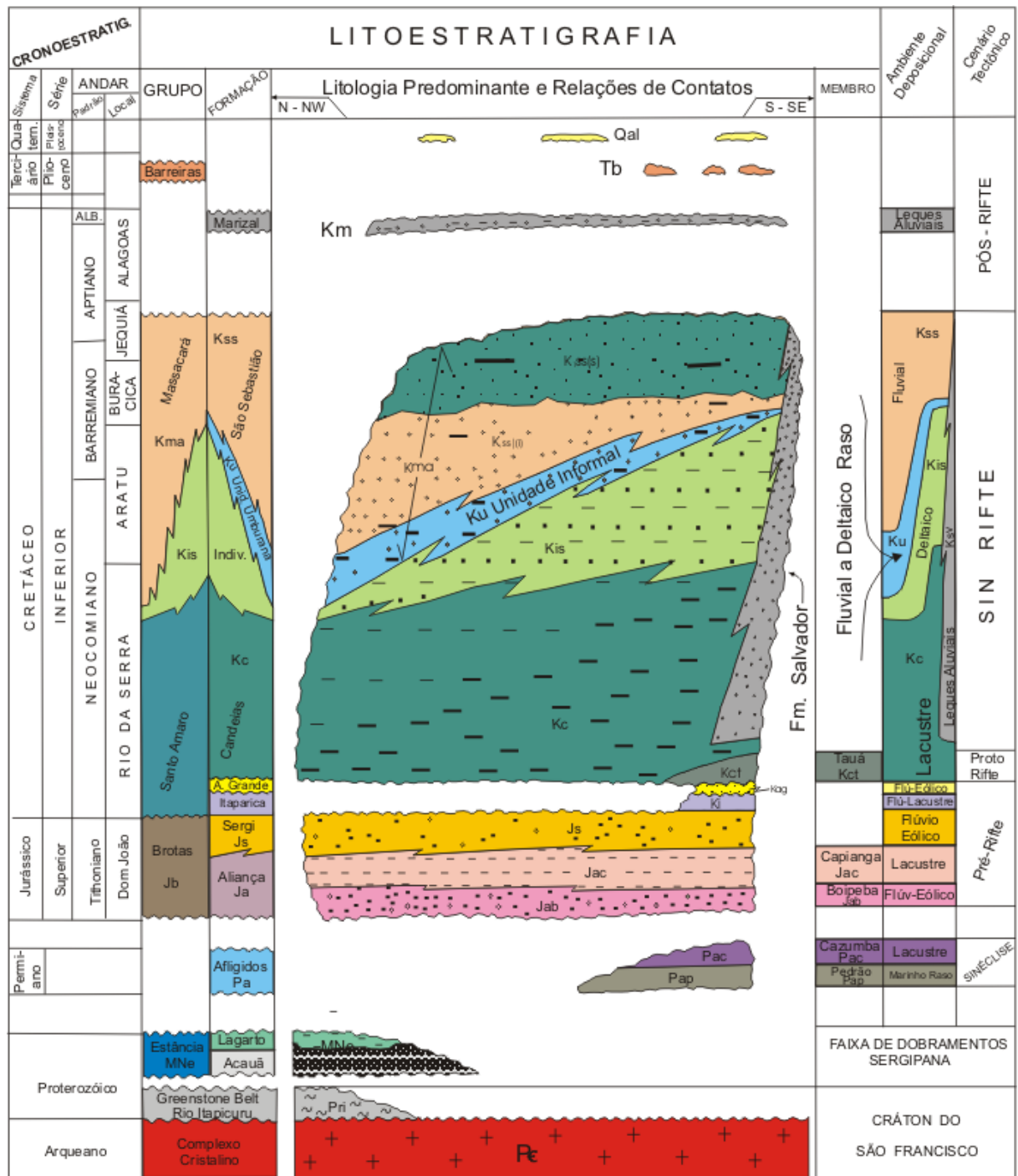


Figura 1.3: Mapa Geológico com poços e SEV's orientadas utilizados nos perfis (parcial modificado de Guimarães, 2002)



Autor: A. Muricy
 Data: Outubro 2000
 Edição em CorelDRAW: Ricardo Hagge

Figura 1.4: Carta estratigráfica da Bacia do Tucano Sul (modificado de Muricy, 2001).

2

Fundamentos dos métodos geofísicos

2.1 Propriedades físicas das rochas

As propriedades físicas mais importantes para a avaliação das formações e/ou interpretação de perfis de poços são as de natureza elétrica, radioativas e acústicas.

Existem três grandes grupos de rochas encontradas nas bacias sedimentares: (i) terrígenas ou siliciclásticas, (ii) carbonatos e (iii) evaporitos. Os dois primeiros grupos, que são mais importantes para exploração de água subterrânea e de hidrocarbonetos, merecem uma atenção em termos de descrição. Dependendo do ambiente de sedimentação uma rocha sedimentar terrígena ou carbonática é constituída por três elementos: *arcabouço*, *matriz* e *cimento*.

O *arcabouço* (*grãos*) é a fração granulométrica da rocha que lhe dá sustentação de esqueleto, com diâmetros entre 0,062 mm e 2,0 mm, qualquer que seja a natureza ou composição desses grãos. *Matriz ou micrita* é a fração fina (menor que 0,039 mm) que é transportada em suspensão. A depender das condições ambientais ela pode preencher os espaços vazios entre os grãos. É geralmente constituída por um ou mais minerais de argila misturados com outros constituintes terrígenos ou carbonáticos. Quando presente, a matriz dá consistência à rocha. O *cimento ou espato* é o constituinte que é precipitado quimicamente nos poros da rocha. Pode ser composto por sílica, carbonatos, sulfatos, óxidos de ferro, manganês, etc. O cimento é o responsável pela rigidez das rochas sedimentares e tende a fechar os espaços vazios existentes (diminui a porosidade).

Na técnica de perfilagem, esta conceituação geológica se modifica, uma vez que os sensores utilizados, quer de natureza elétrica, acústica ou radioativa, são incapazes de distinguir um grão de sílica de uma massa de cimento silicoso; um grão carbonático (fóssil ou intra-

clasto) de um cimento carbonático. Portanto, o modelo adotado para o estudo de perfis considera a rocha sedimentar dividida em duas partes constituintes: (i) *A matriz*, a qual engloba o arcabouço, a matriz propriamente dita e o cimento ou seja, tudo que é sólido dentro de uma rocha; e (ii) *Os poros*, tudo que é vazio na rocha, ou tudo que pode ser preenchido por fluidos.

Porosidade e Fator de Formação

A porosidade é uma propriedade importante das rochas, pois mede a sua capacidade de armazenamento de fluidos. É definida como a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_t) da rocha, expressa em percentual ou “índice de vazios” (valor entre 0 e 1).

Quanto à gênese, a porosidade de uma rocha classifica-se em dois grupos: *A porosidade primária* que a rocha adquire durante a sua deposição ou bioconstrução. Exemplos: porosidade intergranular dos arenitos e interparticular dos calcários. Já a *porosidade secundária* é aquela resultante de processos físico-químicos subsequentes à diagênese das rochas. Exemplo: fraturas em arenitos, folhelhos, calcários e embasamento e cavidades causadas pelo ataque químico em calcários e, em menor proporção, em arenitos.

Distinguem-se também a *porosidade total*, conforme definido no início desta seção, (que é importante para o fluxo elétrico mas não para o fluxo hidráulico na rocha), e a *porosidade efetiva*, a qual leva em conta apenas os espaços vazios interconectados. A porosidade total é um parâmetro desejável nos cálculos de interpretação dos perfis, muito embora a efetiva seja mais importante economicamente (Nery, 1989).

Os *fatores que afetam a porosidade* nos sedimentos e rochas terrígenas são: (i) Forma, arredondamento e arranjo dos grãos; (ii) Grau de seleção dos grãos; e (iii) Compactação e teor de argila. Nos carbonatos os fatores são: (i) Densidade e intensidade do fraturamento; (ii) Dissolução; (iii) Grau de cimentação; (iv) Conteúdo de matriz; e (v) Dolomitização.

Várias são as técnicas utilizadas para medir a porosidade de rochas consolidadas. Normalmente, elas incluem a determinação três parâmetros: (i) Volume total, (ii) Volume de sólidos e (iii) Volume de vazios. Em perfis, medições de porosidade podem ser obtidas através de métodos elétricos, sônicos e radioativos.

Originalmente definida com base num *fator de resistividade da formação*, a lei de Archie (Archie, 1942) contribuiu para a introdução de um parâmetro geométrico fundamental para um meio poroso, definido como

$$F = \phi_e^{-m} \quad (2.1)$$

onde F é o fator da formação, ϕ_e é a porosidade efetiva e m é um fator empírico referido como índice de cimentação.

Resistividade elétrica das rochas

A matriz das rochas é, geralmente, formada de minerais praticamente não condutores de eletricidade, tais como silicatos, óxidos carbonatos, etc. Por isso, sua condutividade elétrica é determinada pela presença de fluidos condutores (soluções eletrolíticas) nos espaços vazios ou poros. A presença de fluidos menos condutores, tais como água doce, óleo e/ou gás, torna a rocha menos condutiva, ou seja, mais resistiva. Todavia existem (apesar de serem raras as ocorrências), minerais acessórios nas rochas sedimentares tais como minerais metálicos bons condutores de eletricidade: pirita, calcopirita, galena, magnetita, etc. Por outro lado, as argilas, por serem mais volumetricamente importantes e por apresentarem elevada quantidade de cátions em sua superfície externa, influenciam na condutividade das rochas argilosas.

Os condutores metálicos conduzem a corrente elétrica através da transferência de elétrons de seus átomos, enquanto nos eletrólitos ela é transmitida por meio da livre movimentação iônica, isto é, eletroliticamente.

Pela lei de Ohm, a resistência (R) de um condutor é diretamente proporcional ao comprimento (L), a ser percorrido pela corrente elétrica, e inversamente proporcional à área (A) atravessada. A constante introduzida nesta proporcionalidade (ρ) é a *resistividade*, ou seja, $R = \rho(L/A)$ com ρ normalmente expresso no Sistema Internacional em Ohm.m.

O movimento ordenado dos íons dissociados dos sais presentes numa solução, sob a ação de um campo elétrico é o fator responsável pelo transporte de corrente elétrica. Portanto, quanto mais íons em uma solução, maior será sua condutividade elétrica. Por outro lado, a temperatura diminui a viscosidade do fluido e, assim, favorece a movimentação dos íons. Conseqüentemente, a *temperatura*, e a *salinidade* das soluções, são fatores que influenciam, diretamente, na condutividade das rochas.

Para arenitos limpos, Archie (1942) observou que o fator de formação (F) correspondia à razão entre a resistividade da rocha completamente saturada com um eletrólito (ρ_o) para a resistividade daquele eletrólito (ρ_w), isto é

$$F = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (2.2)$$

Com isso, as medidas de resistividade elétrica efetuadas em furos passaram a ser usadas para estimar quantitativamente a porosidade das formações.

Para arenitos argilosos, Lima e Sharma (1990, 1992) descrevem um modelo volumétrico no qual os grãos são constituídos por núcleos quartzosos isolantes capeados por cascas de argilas molhadas portadoras de uma condutividade volumétrica equivalente. Usando a teoria de Bruggeman-Hanai e, após simplificações algébricas para o caso dc, eles propõem as seguintes expressões para interpretar medidas elétricas em poços e em frente a formações areno-argilosas,

$$F = \frac{\sigma_{mf} - \sigma_w}{\sigma_{xo} - \sigma_o} \quad (2.3)$$

e

$$\sigma_{cs} = \frac{\sigma_o F - \sigma_w}{m(F - 1)}, \quad (2.4)$$

onde σ_{mf} é a condutividade do filtrado da lama, geralmente medida no campo, e σ_w a condutividade da água nativa, que pode ser medida diretamente ou derivada do perfil de potencial espontâneo(PE), σ_{xo} e σ_o são as condutividades volumétricas da *zona lavada* e da *zona virgem*, estimadas do perfil elétrico (leitura do normal curto ou outro dispositivo de investigação rasa) e do perfil de indução (ou outro dispositivo de investigação profunda), respectivamente. Já σ_{cs} corresponde à condutividade volumétrica da matriz sólida do arenito argiloso da qual se pode extrair uma estimativa da argilosidade da formação.

Portanto, se temos um arenito limpo, podemos utilizar a equação 2.2, enquanto para um arenito argiloso, com transporte de corrente em paralelo nos sólidos e fluidos, recorreremos às equações 2.3 e 2.4.

Condutividade hidráulica

É o coeficiente de proporcionalidade (K) que aparece na lei de Darcy

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L}, \quad (2.5)$$

onde h_1 e h_2 são as alturas hidráulicas nas extremidades de um filtro granular, A é a área transversal do filtro e Q é a vazão (dimensões L^3T^{-1}) é um parâmetro que contém contribuições provenientes do meio (porosidade, dimensão média de grãos ou de poros, e características da distribuição granulométrica), assim como do fluido intersticial (viscosidade e massa específica).

Esta condutividade hidráulica K (dimensões LT^{-1}) pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte forma:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2.6)$$

onde k é a permeabilidade intrínseca do meio poroso (dimensões L^2) e ρ é a massa específica (ML^{-3}), μ é a viscosidade absoluta ($ML^{-1}T^{-1}$). A permeabilidade intrínseca pode ser expressa em cm^2 ou em Darcy (D). É possível separar em K as influências relativas ao fluido daquelas da matriz sólida, bastando, para isso, usar a analogia com o fluxo de Poiseuille, ou seja, fluxo laminar de fluidos em tubos cilíndricos e a análise dimensional é aquela que se obtém da equação 2.6, a qual leva a seguinte conversão: Considerando-se $k = 1D = 9,86977 \times 10^{-13}m^2$, substitui-se as constantes, e, para a água “doce” a $20^\circ C$, obtém-se $1D = 9,614 \times 10^{-6}m/s$.

No caso de sedimentos não consolidados, vários estudos comprovaram as seguintes conclusões:

- Quanto maior o tamanho médio dos grãos do solo, maior a permeabilidade (porque os vazios são maiores).
- Quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade.
- Amostras com um tamanho de grão dominante apresenta maior permeabilidade.

Como será visto adiante, este parâmetro será calculado usando a equação de Kozeny-Carman (Brace, 1977; Walsh e Brace, 1984) que foi adotada por Lima (1993):

$$k = \frac{Nr^2}{a_0} F^{\frac{2m-1}{-m}} \quad (2.7)$$

onde N é o número de capilares conectados, r é o raio hidráulico médio e a_0 é um fator de forma dos canais capilares, F e m são calculados pelas equações 2.2 e 2.1, respectivamente. Apesar do experimento de Darcy representar um sistema unidimensional de fluxo, a equação 2.5 pode ser generalizada e expressa de forma tridimensional como

$$\mathbf{q} = -K\nabla\varphi, \quad (2.8)$$

onde K é um escalar constante representativo do fluxo de um fluido homogêneo, num meio poroso também homogêneo e isotrópico e φ é o potencial hidráulico. A vazão \mathbf{q} não corresponde à velocidade macroscópica de um fluido e sim a valores estatísticos médios num

elemento de volume representativo de um meio poroso. Essa velocidade é dada por $\mathbf{v}=\mathbf{q}/\phi_e$, onde ϕ_e é a porosidade efetiva do meio.

Diversos autores têm mostrado, empiricamente, que existe relação entre permeabilidade e condutividade elétrica de uma rocha (Croft, 1971; Kelly, 1977), e que há similaridades entre as tortuosidades elétrica e hidráulica de um meio granular (Lima, 1995; Clennell, 1997).

Lima e Niwas (2000), com base no modelo conceitual elétrico para a condutividade volumétrica proposto por Lima e Sharma (1990, 1992) e usando analogia com o modelo de Kozeny-Carman para a condutividade hidráulica, derivaram a seguinte equação

$$k = \alpha_o \left[\frac{\phi_e^{(m-1+1/q)}}{1 + \delta_c \sigma_{cs}} \right]^q, \quad (2.9)$$

para determinar a permeabilidade hidráulica a partir de medidas geoeletricas. Na equação 2.9, o parâmetro α_o (dimensão L^2) é um fator relacionado à forma dos poros e à superfície específica do arenito limpo de mesma textura, δ_c é um termo litológico dependente do tamanho médio das areias e argilas, σ_{cs} é a condutividade média do grão capeado do arenito, e q e m são parâmetros geométricos da distribuição granulométrica. Quando $\sigma_{cs} = 0$, a equação 2.9 reduz-se à forma usual da equação de Kozeny-Carman conforme descrito na literatura.

Propriedades radioativas

Basicamente um átomo consiste de três tipos de partículas elementares: (i) nêutrons de massa igual a 1 u.m.a. (unidade de massa atômica) e de nenhuma carga elétrica; (ii) prótons de massa igual a 1 u.m.a. e uma carga positiva; e (iii) elétrons que orbitam como nuvens, em torno do núcleo e possuem massa da ordem de $1/1.840$ u.m.a. e uma carga negativa.

Dentro da sistemática nuclear, todos os elementos possuem no mínimo três configurações de núcleo. Cada configuração dá-se o nome de “nuclídeo” e os diferentes nuclídeos de um elemento são os “isótopos” daquele elemento. Representa-se um nuclídeo na forma ${}^A_Z\text{E}$, onde E é o símbolo do elemento, $A = Z + N$, Z é o número atômico = número de prótons = número de elétrons num átomo neutro e N é o número de nêutrons que varia com os diferentes nuclídeos; e A é o número de massa atômica que, por conseqüência, também muda de um nuclídeo para outro.

Existem cerca de 1.700 nuclídeos dos quais apenas 260 são estáveis, isto é, não mudam suas estruturas atômicas ou seu estado energético, e ainda menos nuclídeos estáveis ocorrem naturalmente. Por outro lado nuclídeos instáveis, que são a maioria, trocam de estrutura liberando energia em forma de radiações, transformando-se em elementos ou nuclídeos diferentes (“filhos”).

Durante a fase de estabilização dos núclídeos ocorre uma liberação de energia junto com partículas, todas com denominação de raios, com as seguintes características:

1. *Raios alfa* - possuem quatro vezes a massa do próton. Por causa da grande massa, só consegue penetrar, na matéria, a espessura de algumas folhas de papel. Corresponde ao núcleo do Hélio.
2. *Raios Beta* - são elétrons, sendo, portanto, facilmente desviados por campos magnéticos. Podem penetrar vários milímetros em alumínio.
3. *Raios Gama* - não possuem carga, logo, não são afetados por campos eletromagnéticos. São radiações eletromagnéticas similares às ondas de luz e de rádio de $\lambda = 0,1 \times 10^{-8}$ cm (0,1 Ångstrom). Só são absorvidos por várias polegadas de chumbo.

Destas radiações, apenas os raios gama são detectados pelos equipamentos normais de perfilagem, por causa de sua alta capacidade de penetração. Estes raios possuem características tanto de partícula como de ondas de alta frequência, e o termo “fóton” também é utilizado para descrever sua energia.

A energia de radiação é medida em eletrons-volt (eV) ou seus múltiplos quiloelétron-volt (kev) e milhões de elétron-volt (MeV). Por definição, um eV é a energia equivalente à um elétron quando submetido a um diferencial de potencial igual a um volt.

A amplitude de um pulso elétrico recebido por um detector de radiação qualquer é função da energia (ou velocidade) do fóton que nele penetra. A intensidade da radiação está relacionada com o número de pulsos detectados por unidade de tempo.

Propriedades acústicas

O som se propaga nas rochas com velocidades que dependem da natureza de sua matriz, da proporção de vazios nelas contidos e das propriedades dos fluidos que preenchem esses vazios. Por conseguinte, torna-se possível usar medidas da velocidade do som através das rochas para determinar a razão de proporcionalidade entre sólidos/líquidos/gases. Existem vários tipos de ondas que se propagam nos corpos sólidos. Duas delas, todavia, nos interessam mais de perto:

- *Ondas compressionais ou longitudinais*: A vibração das partículas sólidas ocorre na direção da propagação, cuja velocidade é dada pela equação:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \mu/3}{\rho_b}}, \quad (2.10)$$

onde ρ_b é a massa específica do meio, K é o módulo de massa ou resistência à deformação e μ é o módulo de rigidez ou cisalhamento.

- *Ondas de cisalhamento ou transversais:* A oscilação das partículas se dá perpendicularmente à direção da propagação. Estas ondas são próprias dos corpos sólidos porque eles oferecem resistência às tensões de cisalhamento. A velocidade de propagação é dada por:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_b}}. \quad (2.11)$$

As duas equações de definição indicam que V_p é sempre maior que V_s para um meio homogêneo.

2.2 SONDAGEM ELÉTRICA DE SUPERFÍCIE

O método geofísico de eletrorresistividade utiliza o acoplamento dos campos eletromagnéticos, dados pelas equações de Maxwell, na presença de cargas elétricas a eles suscetíveis (elétrons dos materiais metálicos e íons das soluções eletrolíticas que permeiam poros e discontinuidades das rochas), ou seja,

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.12)$$

e

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.13)$$

onde \mathbf{J} é a densidade de corrente elétrica, \mathbf{D} é o deslocamento elétrico, \mathbf{E} e \mathbf{H} representam os campos elétrico e magnético, \mathbf{B} é o vetor indução magnética e t é a variável tempo. A relação constitutiva para meios condutivos é expressa pela lei de Ohm,

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (2.14)$$

onde σ é uma grandeza física denominada condutividade elétrica. Em meios isotrópicos σ é uma grandeza escalar, enquanto em meios anisotrópicos corresponde a um tensor (Keller, 1988).

Em condições estacionárias, as derivadas em relação ao tempo são nulas, e a equação 2.13, junto com a condição da conservação de carga elétrica ($\nabla \cdot \mathbf{J} + \partial q / \partial t = 0$), se reduzem, respectivamente, a

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (2.15)$$

e

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (2.16)$$

Se o rotacional do campo elétrico é nulo, significa que \mathbf{E} é conservativo, e há uma função escalar V , denominada potencial, tal que

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (2.17)$$

Substituindo-se a expressão da lei de Ohm (equação 2.14) na equação 2.16 para meios isotrópicos e lineares, pode-se escrever:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0. \quad (2.18)$$

Substituindo, na equação 2.18, o \mathbf{E} dado em 2.17, conclui-se que o potencial elétrico V deve satisfazer a

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.19)$$

ou

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0. \quad (2.20)$$

Se a região de interesse apresentar condutividade constante e diferente de zero, o primeiro termo do primeiro membro da equação acima se anula, e a relação a ser satisfeita pelo potencial passa a ser a equação de Laplace, ou seja,

$$\nabla^2 V = 0. \quad (2.21)$$

2.2.1 Potencial em meio homogêneo

A solução da equação de Laplace num semi-espaco condutor homogêneo e isotrópico de resistividade ρ ($\rho = 1/\sigma$), que representa uma terra plana, energizada por uma fonte pontual de corrente de intensidade I , para o potencial elétrico num ponto de observação P , distante r da fonte é dada por (Keller e Frieschknecht, 1966):

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r}. \quad (2.22)$$

Esta equação constitui a relação fundamental da prospecção elétrica. Uma vez que são usados mais de um eletrodo de corrente, pelo princípio da superposição, o potencial será avaliado como a soma dos potenciais individuais de cada eletrodo. Para um arranjo quadripolar do tipo Schlumberger (figura 2.1 à página 37), teremos, para a diferença de potencial:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right), \quad (2.23)$$

onde $AM = a - \frac{b}{2}$, $BM = a + \frac{b}{2}$, $AN = a + \frac{b}{2}$, $BN = a - \frac{b}{2}$, o que resulta em

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right), \quad (2.24)$$

ou

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}, \quad (2.25)$$

onde o parâmetro k é denominado “fator geométrico do arranjo”, já que depende unicamente da disposição relativa dos eletrodos no terreno.

A resistividade de um meio isotrópico e homogêneo pode ser calculada a partir da equação 2.25. Para meios anisotrópicos e heterogêneos, a resistividade determinada desta forma varia de acordo com a posição e com a orientação dos eletrodos. A expressão 2.25 constitui-se em uma função denominada “resistividade aparente” correspondente a um semi-espaco homogêneo e isotrópico equivalente. A função ρ não representa, necessariamente, a resistividade de algum elemento particular da terra, nem mesmo equivale a uma simples média de resistividades envolvidas. No entanto, é um conceito muito utilizado na geofísica elétrica e

eletromagnética (Ward, 1990). Geralmente a variação desta função com o espaçamento dos eletrodos é representada na forma de gráficos bi-logaritmos. A interpretação do comportamento dessa função permite estabelecer os parâmetros elétricos e geométrico-estruturais que caracterizam a secção geológica, a qual descreve e tipifica, o mais próximo da realidade, o comportamento dos litotipos de uma área particular investigada.

2.2.2 Sondagem elétrica

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV), cuja denominação é conseqüência da analogia com sondagem no sentido literal, com a qual se analisa diretamente os materiais do subsolo, tem como finalidade a determinação das resistividades dos vários litotipos subjacentes. Contudo, o método da eletrorresistividade pode ser utilizado em sondagem ou em perfilagem, em superfície ou em poços, respectivamente. Ao expandirmos o arranjo de eletrodos, a corrente penetra mais fundo em subsuperfície, o que permite a investigação de camadas mais profundas.

A idéia de SEV tem significado apenas para o modelo de N-camadas. Em ambientes sedimentares ou metamórficos com camadas planas e de mergulhos suaves, boas aproximações com o modelo de N-camadas são encontradas e a técnica em pauta é bastante conveniente (Parasnis, 1997; Orellana e Mooney, 1966). No caso da perfilagem ou caminhamento de resistividade, o arranjo é mantido com separação pré-fixada e deslocado sobre a superfície do terreno, ao longo de uma linha de perfil pré-definida.

Neste trabalho foi adotado o *modelamento direto* e a *inversão numérica iterativa*, a qual consiste em ajustar, iterativamente, a curva de resistividades a uma certa sucessão de camadas. As expressões “modelo de N-camadas”, “modelo 1D” ou “modelo de camadas horizontalmente estratificadas”, são referentes a um semi-espaco heterogêneo composto por camadas planas, horizontais, homogêneas e isotrópicas. Parte-se do pressuposto de que a terra é constituída por certo número de camadas, cada uma delas com resistividade uniforme e diferente da observada nas camadas sobre e subjacente. Considera-se apenas uma única fonte pontual de corrente e o potencial em cada camada deve satisfazer à equação de Laplace.

O problema inverso, ou seja, tendo uma curva de resistividade aparente versus $AB/2$, determinar o modelo geológico correspondente, é sobredeterminado e não-linear. A resistividade aparente pode ser linearizada através de uma expansão em série de Taylor. A solução dos problemas inversos lineares ou linearizáveis pode ser obtida por diversos métodos, dentre eles o dos mínimos quadrados e dos mínimos absolutos (Marinho, 1997). A interpretação de dados de eletrorresistividade, para modelos de camadas horizontalmente estratificadas, é

geralmente realizada com o auxílio de um procedimento iterativo de inversão.

Qualquer que seja o método de interpretação utilizado, ele terá de fornecer um bom ajuste entre a curva de campo e a curva teórica derivada, mas também de resultar em modelo geoeletrico que concorde com as informações geológicas disponíveis da área. Isto ocorre em decorrência de que, na maioria dos casos, as curvas de campo admitem muitas soluções, de forma que devemos eleger, dentro das margens de variações possíveis (com erro $< 3\%$), o conjunto de soluções com maior probabilidade de representar a verdadeira estrutura da zona estudada.

Conseqüentemente, tanto os métodos de interpretação menos operacionais (gráficos) quanto os mais operacionais (automáticos) estão fadados a terem seus resultados ajustados através de informações disponíveis de poços, afloramentos das camadas em questão, e mesmo mapeamento pré-existentes e conhecimento razoável da geologia estrutural da área. O conhecimento teórico e a experiência com o método geofísico a ser aplicado são muito importantes.

A despeito de condições favoráveis, com camadas horizontais e resistividade sem variação lateral, os dados obtidos por sondagens elétricas isoladas raramente fornecem uma interpretação satisfatória (Kunetz, 1966).

As SEV's obtidas neste trabalho foram classificadas individualmente, obedecendo à forma usual para uma curva de 3 camadas, com 4 tipos básicos: (i) Tipo A ou ascendente (meios condutivo, resistivo, mais resistivo); (ii) Tipo Q ou descendente (meios resistivo, condutivo, mais condutivo); (iii) Tipo H ou de mínimo (meios resistivo, condutivo, resistivo) e (iv) Tipo K ou de máximo (condutivo, resistivo, condutivo). Para as curvas de mais de 3 camadas, agregam-se duas ou mais letras, conforme o caso.

Através do estudo comparativo das características e heterogeneidades comuns de um grupo de sondagens, torna-se possível obter conclusões mais precisas. A interpretação de certo número de sondagens executadas em locais estratégicos dentro da área de estudo, possibilita distinguir os efeitos nas curvas que são causados por fenômenos locais (exemplo: Grupo Barreiras localmente arenoso na SEV17LF) e estruturais (exemplo: falha - na SEV1IN).

2.2.3 Ambigüidades

O problema da ambigüidade em Geofísica Aplicada tem sido abordado há décadas e permanece como tema atual por tratar-se de uma limitação inerente dos métodos geofísicos. A ambigüidade na interpretação de SEV's se manifesta de duas formas: Os denominados "Princípio da Equivalência" e o "Princípio da Supressão". Em ambos os casos a dificulda-

de aparece no instante em que necessitamos determinar as características de camadas cuja relação espessura versus profundidade, é muito pequena.

O *Princípio da Equivalência* se manifesta quando há uma camada cuja resistividade é muito maior ou muito menor que a resistividade das camadas encaixantes. Sabe-se que uma camada resistiva entre duas outras condutivas, faz-se perceber ao máximo pela sua *resistência transversal unitária* (T), produto de sua resistividade por sua espessura ($T = \rho h$); enquanto uma camada condutiva entre duas camadas resistivas evidencia-se no máximo por sua *condutância longitudinal unitária* (S), produto de sua condutividade por sua espessura ($S = \sigma h$). Torna-se difícil, senão impossível, distinguir entre duas camadas resistivas de diferentes espessuras se os produtos delas pelas respectivas resistividades forem os mesmos. Da mesma forma, camadas condutivas não podem ser individualizadas se as razões das espessuras e resistividades forem iguais.

A equivalência de soluções corresponde ao fato de que mais de um conjunto de parâmetros geoeletricos podem representar a mesma curva de sondagem. Isto ocorre porque várias distribuições de resistividade, diferentes umas das outras, conduzem a sondagens elétricas similares. As equivalências mais evidentes se dão nas curvas dos tipos H e K, onde geralmente se incluem os aquíferos.

O *Princípio da Supressão* trata daquelas camadas cujas resistividades são intermediárias entre as resistividades das camadas sobre e subjacentes. Caso as camadas sejam pouco espessas, quase não influenciam a curva de resistividade. Quando a espessura da camada intermediária aumenta, passa a afetar a curva, porém, antes de identificá-la, seu efeito é confundido com aquele causado pela variação de espessuras ou resistividades das camadas envolventes.

A supressão de camadas, ou camadas ocultas, como a terminologia indica, diz respeito ao número de parâmetros do modelo estratificado. Tem a ver também com a resolução do método, pois uma camada fina em profundidade não se manifestará na curva, enquanto que esta mesma camada em posição mais rasa deverá ser percebida em primeira análise. Um ramo A da curva pode ser na realidade do tipo KH; um ramo Q pode ser HK; entre um trecho QH pode ser incluído um ramo HK. Em geral, sem dispor de informações a priori, escolhe-se como solução o modelo com menor número de camadas.

2.3 Perfilagem de poços

É uma imagem visual, em relação à profundidade, de uma ou mais características ou propriedades das rochas atravessadas por um poço. Pode-se obter, assim, perfis do tipo litológico, do tempo de perfuração, granulométrico, etc; confeccionados manualmente.

Por outro lado, existem os perfis não manuais de poços, nos quais distinguem-se as rochas em função de suas propriedades elétricas (resistividade elétrica ou potencial eletroquímico natural), acústicas (velocidade de propagação ou tempo de trânsito das ondas sonoras) e radioativas (radioatividade natural ou induzida). Estes perfis são obtidos por meio do deslocamento contínuo de um sensor de perfilagem (sonda) dentro de um poço e são genericamente denominados perfis geofísicos, qualquer que seja o processo físico de medição utilizado.

Algumas diferenças entre perfis manuais e geofísicos podem ser enumeradas:

1. As profundidades dos últimos são mais exatas (erros admitidos da ordem de 30 cm por 1.000 m de poço).
2. Cada descida de uma sonda do perfil geofísico, em um poço, pode ser realizada em 1 hora/1.000 metros de poço, com um registro mínimo de 5 propriedades de rochas. Os perfis manuais nunca são confeccionados em tempo tão curto, mesmo para uma só propriedade das rochas.
3. O erro humano é praticamente eliminado nos perfis geofísicos. O aparelho registra uma propriedade da rocha “in loco”. Muitas vezes, amostras coletadas pertencem, em percentagens significativas, a intervalos acima das profundidades efetivamente consideradas, por causa dos freqüentes desmoronamentos.
4. Os poucos dados obtidos no poço são substituídos, nos perfis geofísicos, por várias curvas contínuas (é importante, porém, não prescindir de uma descrição sucinta das amostras de calha).

Os perfis elétricos surgiram em 1927 para responder perguntas dos estudiosos da exploração petrolífera, tais como: Quais são as profundidades do topo e da base das camadas de interesse? Quais suas espessuras efetivas? Quais as suas porosidades? Quais as suas permeabilidades? Qual o tipo de fluido intersticial? Qual é a percentagem deste fluido? Qual é a percentagem de extração possível? (Nery, 1989).

A medição dos parâmetros físicos é iniciada utilizando-se sensores dentro do poço, em deslocamento ascendente, constante e uniforme. Os sinais captados pelos sensores são enviados

à superfície através de sistema de telemetria e são registrados e processados em caminhões-laboratórios. As propriedades físicas são então representadas em função da profundidade, gerando o que se chama perfil geofísico de um poço.

2.3.1 Perfis de Potencial Espontâneo (PE)

Mais conhecido como SP (spontaneous ou self-potential), o PE resulta do potencial elétrico natural desenvolvido no interior do poço em relação a um potencial fixado na superfície. A origem deste potencial provém, basicamente, de dois processos ou efeitos: o *eletrocínético* e o *eletroquímico*:

- Os efeitos *eletroquímicos*, quantitativamente de grande importância na geração do PE, estão associados a fenômenos de características elétricas distintas: Junção líquida direta (E_j) ou através de membranas (E_m), entre fluidos de diferentes atividades químicas.
- Os efeitos *eletrocínéticos* (E_k) são produzidos pelo fluxo dos eletrólitos através dos poros capilares com paredes eletricamente carregadas.

A amplitude da deflexão do PE é proporcional à intensidade da corrente na lama de perfuração. Quando em frente a litologias permeáveis, a curva sofre uma deflexão, cuja polaridade depende do contraste de salinidade entre a água da formação e o filtrado da lama. Porém, quando encontra-se frente a litologias muito argilosas (folhelhos), a curva tende a seguir uma linha reta chamada “linha de base referencial dos folhelhos”. Os pontos de inflexão na curva, em geral, sugerem a existência de contatos litológicos (limites entre camadas).

Assim, podemos citar como utilidades da curva de PE: (i) Identificar zonas permeáveis; (ii) Auxiliar na determinação de litologias e definir contatos litológicos, permitindo correlações; (iii) São bons indicadores de argilosidade; (iv) Possibilitam a determinação da resistividade da água da formação (ρ_w); e (v) Determinação qualitativa da salinidade da água da formação (mais freqüente na indústria do petróleo).

A relação entre a deflexão em frente aos intervalos permeáveis (SP) e as resistividades, que tem sido utilizada no ambiente de ocorrência de petróleo:

$$SP = -K \log \frac{\rho_{mf}}{\rho_w}, \quad (2.26)$$

onde ρ_w é a resistividade da água, ρ_{mf} é a resistividade do filtrado da lama, ambas referidas à mesma temperatura, e K é um parâmetro da solução que também depende da temperatura.

A utilização da equação 2.26 na hidrogeologia tem produzido valores incorretos de resistividade da água (Gondouin, Tixier e Semard, 1957; Alger, 1966; Lima, 1993). Por isso, Lima e Nery (1999) propuseram um procedimento semi-analítico para a interpretação dos dados de PE válido para a região da Formação São Sebastião, na bacia do Recôncavo:

$$SP = -K \log \frac{\rho_{mf}}{\rho_{ws}}, \quad (2.27)$$

onde $\rho_{ws} = 1,465\rho_w^{0,346}$. Tal conexão, permite obter valores mais próximos da realidade, pois corrige efeitos dos íons HCO_3^- , SO_4^- , Ca^{++} e Mg^{++} presentes na água da formação permeável.

Neste trabalho, foi utilizada a equação $\text{STD} = 4414,9271\rho_w^{-0,923}$, deduzida pelo método dos mínimos quadrados em que o coeficiente de correlação (r^2) foi de 1,006, calculado para 28 amostras de água de poços que exploram o aquífero São Sebastião e localizam-se nas folhas (1:100.000) de Olindina e Inhambupe, para as camadas produtoras dos poços perfilados.

2.3.2 Perfis de Raios Gama (GR)

A ferramenta de perfilagem gama é constituída por um detector-contador da radiação gama total que atinge a sonda posicionada dentro do poço. Esta radiação é originada principalmente de três fontes distintas: (i) dos “elementos filhos” do Urânio²³⁵; (ii) do “elemento filho” proveniente do Tório²³² (Tálio²⁰⁸); e (iii) do Potássio⁴⁰.

A unidade mais atualmente utilizada nos perfis de GR é a unidade API, que é a medida da radioatividade de uma rocha que serve de normalização, na qual foi disseminada quantidades conhecidas de Urânio (U), Tório (Th) e Potássio (K).

As argilas e/ou folhelhos são as rochas sedimentares que apresentam os mais altos valores de radioatividade (com exceção dos evaporitos potássicos), por causa da retenção de íons metálicos (entre eles U e Th) e da alta percentagem de radiação do K^{40} que geralmente é da ordem de 20% do total (Nery, 1989).

Além das argilas e folhelhos selantes acima citados, vale salientar que existem três grupos de rochas sedimentares mais importantes como reservatórios tanto de hidrocarbonetos como de águas subterrâneas, os *calcários* possuem as mais baixas concentrações de elementos radioativos, os *dolomitos* apresentam uma radioatividade um pouco maior e os *arenitos*, por geralmente apresentarem-se argilosos, são os litotipos, dos três citados, os que se mostram mais radioativos.

Pode-se estimar a argilosidade, a partir das medidas da curva de GR da seguinte forma: Considerando a variação linear das medições de GR, podemos calcular um índice de radiações

gama (I_{GR}) pela equação:

$$I_{GR} = \frac{(GR_{lido} - GR_{min})}{(GR_{max} - GR_{min})}, \quad (2.28)$$

onde GR_{lido} é o valor lido na profundidade em questão, onde se quer calcular a argilosidade, GR_{min} é o valor da leitura em frente ao nível de arenito mais limpo da camada considerada e GR_{max} é valor de GR lido em frente ao folhelho mais puro.

Algumas empresas de perfilagem utilizam a equação 2.28 para calcular uma estimativa de argilosidade volumétrica de arenitos. Porém, como a variação da radioatividade é não-linear, Asquith e Gibson (1982) propuseram uma equação empírica para estimativas mais próxima da realidade:

$$V_{SHGR} = 0,33(2^{2I_{GR}} - 1), \quad (2.29)$$

a qual é válida para rochas consolidadas.

2.3.3 Perfis elétricos de indução

Foi com a finalidade de medir a resistividade das camadas em poços contendo lamas muito resistivas que Doll desenvolveu a perfilagem elétrica por indução no ano de 1950. As sondas deste tipo de perfil possuem bobinas transmissoras que geram campos magnéticos primários, e receptoras que medem as respostas da formação em termos de campos secundários acrescidas dos campos primários (que são eliminados na resposta por meio da calibração do equipamento). O campo primário é gerado a partir da circulação de correntes alternadas na bobina e possui forma toroidal, de eixo igual ao do poço. Em geral, quando a lama do poço é pouco ou medianamente condutiva, o campo primário tem grande capacidade de penetração na formação, atingindo a zona virgem (aquela sem interferência da lama ou de seu filtrado).

Desta forma, obtém-se diretamente a partir destes perfis, as resistividades (ρ_{xo}) da zona lavada (saturada pelo filtrado da lama), quando observado o perfil normal curto - SN (de 16" ou 40,6 cm de separação de eletrodos A e M), e a resistividade da zona virgem (ρ_o), quando verificado o perfil normal de indução - DIR (de 40" ou 101,6 cm de separação entre as bobinas).

É possível ainda avaliar, embora qualitativamente, a "espessura" da invasão do filtrado da lama na formação e realizar correlações poço a poço, com auxílio destes perfis.

2.3.4 Perfil sônico

O princípio básico deste perfil requer a utilização de um transmissor de energia acústica, de frequência ultrasônica, e dois receptores. Mede-se, portanto, o tempo gasto no percurso entre os receptores colocados a uma distância fixa, na sonda de perfilagem. Este tempo é expresso em termos do inverso da velocidade, em microsegundos por pé de formação ($\mu\text{s}/\text{pé}$), cuja unidade é padronizada pelo API (American Petroleum Institute).

Uma vez que a velocidade do som é maior nos sólidos que nos líquidos e gases, lógico, o tempo de trânsito (TT) de uma onda sonora é menor nos meios sólidos que nos meios líquidos. Logo, se duas camadas aquíferas (por exemplo) mostram, no perfil sônico, TTs distintos, aquele aquífero com leituras de TT mais elevadas terá maior porosidade ou possível fraturamento. Ao estudar a correlação acima mencionada (TT x porosidade das rochas), Wyllie et al. (1956) demonstraram que o perfil sônico pode ser utilizado para determinar a porosidade total (ϕ_s) dos reservatórios, com sucesso, utilizando-se a equação (conhecida como *equação de Wyllie*)

$$\phi_s = \frac{(\Delta t - \Delta t_m)}{(\Delta t_f - \Delta t_m)}, \quad (2.30)$$

onde Δt_m é o TT da onda na matriz da rocha ($\simeq 55,5 \mu\text{s}/\text{pé}$ em média, calculada em medições de laboratório, utilizando amostras de arenito), e Δt_f é o TT observado no fluido percolante ($192 \mu\text{s}/\text{pé}$ para uma água de baixa salinidade).

A porosidade calculada com a equação 2.30 corresponde ao volume percentual total de vazios da rocha, dentro do volume investigado pela ferramenta. A falta de compactação nas rochas mais próximas à superfície ou mais recentes em termos de tempo geológico, altera as medições lidas no perfil sônico (a pressão de confinamento é suportada também pelos fluidos intersticiais). Portanto, a partir de observações de campo e experimentos de laboratório chegou-se à conclusão de que o indicador de compactação incipiente são as leituras de sônico (quando superam $100 \mu\text{s}/\text{pé}$) frente aos folhelhos sobre e sotopostos à camada de interesse, e que a porosidade calculada pela relação 2.30, deve ser corrigida por uma fator denominado “fator de correção B_{cp} ”:

$$B_{cp} = \frac{c\Delta t_{sh}}{100} \quad (2.31)$$

onde c é um fator de compactação, geralmente entre 0,8 e 1,2 e Δt_{sh} é a leitura sônica média dos folhelhos sobre e sotopostos.

A porosidade de sônico corrigida é então obtida dividindo-se a equação 2.30 pelo fator de correção B_{cp} considerando $c = 1$ (valor adotado neste trabalho):

$$\phi_{Sc} = \frac{(\Delta t - \Delta t_m)}{(\Delta t_f - \Delta t_m)} \frac{100}{\Delta t_{sh}}. \quad (2.32)$$

A porosidade efetiva (ϕ_e) é então calculada por meio da equação

$$\phi_e = \phi_{Sc} - V_{sh}\phi_{Ssh}, \quad (2.33)$$

onde V_{sh} é a argilosidade calculada com a equação 2.29 e ϕ_{Ssh} é a porosidade média dos folhelhos sobre e sotopostos, utilizando a equação 2.30.

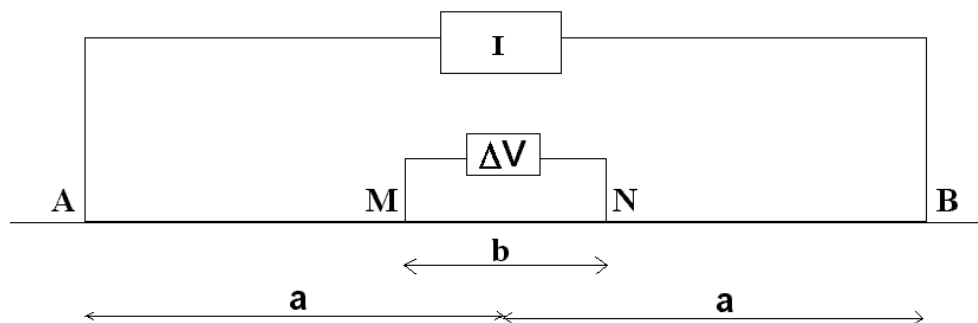


Figura 2.1: Disposição dos eletrodos no arranjo Schlumberger.

3

Caracterização geofísica da área

As caracterizações morfológica e petrofísica dos aquíferos na área de Olindina foram efetuadas com base na análise de perfis geofísicos de cinco poços de exploração de água e dois de exploração de petróleo, e na execução e interpretação geológica de 23 sondagens elétricas profundas realizadas na área.

Nesse capítulo, são descritos os principais resultados alcançados nos dois procedimentos de trabalho acima citados.

3.1 Perfilagens de Poços

3.1.1 Metodologia

Na inversão petrofísica dos perfis geofísicos dos poços foram adotados os seguintes procedimentos detalhados no capítulo 2:

- A descrição dos resultados de perfilagem é efetuada, preferencialmente, na ordem crescente de profundidade dos poços;
- Valores de resistividade elétrica das águas nativas das formações foram obtidas por medidas diretas sobre amostras coletadas nos poços ou foram computados do potencial elétrico espontâneo usando a equação 2.27;
- Os dados elétricos do indução e do normal curto, combinados com os valores conhecidos de ρ_w e ρ_{mf} foram usados nas equações 2.3 e 2.4 para computar F e σ_{cs} ao longo do perfil;

- Os valores do tempo de trânsito lidos nos perfis sônicos foram usados junto com as equações 2.32 e 2.33 para computar as porosidades totais e efetivas dos arenitos nos perfis;
- Os dados dos perfis de radiação gama foram convertidos em argilosidade usando as equações 2.28 e 2.29;
- Os índices de cimentação dos arenitos foram calculados usando a definição de fator de formação intrínseco como $F = \phi_e^{-m}$.
- A permeabilidade (k) foi calculada em mD. Foi utilizada a equação 2.9 para arenitos argilosos, a qual se reduz à 2.7, quando o arenito é limpo. Para a relação 2.9, foram adotadas as constantes $\alpha_o = 180.015$ mD, $\delta_c = 100$ m/S e $q = 2,78$, obtidas com dados experimentais de laboratório sobre amostras representativas de arenitos argilosos de várias partes do mundo (sugeridos pelos resultados de Lima e Niwas (2000)). A permeabilidade em m/s é obtida de k em mD usando a relação de conversão $1 \text{ m/s} = 1,040 \times 10^4$ mD para a água a 25°C (Bear, 1972).
- A maneira usada para verificar a confiabilidade da inversão petrofísica é por meio da comparação da argilosidade elétrica p - deduzida por Lima e Sharma (1992) para grãos capeados de forma esférica como

$$p = \frac{3\sigma_{cs}}{(2\sigma_{sh} + \sigma_{cs})}, \quad (3.1)$$

com $\sigma_{sh} = 1/\rho_{sh}$, ρ_{sh} sendo a resistividade média dos folhelhos adjacentes ou $\sigma_{sh} = 0,085$ S/m (Lima e Niwas, 2000), condutividade elétrica das cascas de folhelho puro de caulinita, que é provavelmente a argila mais comum nos arenitos aquíferos estudados - com a argilosidade calculada por radioatividade. Para tanto é importante recordar que $p = V_{sh}/(1 - \phi_e)$.

1. Poço Murici-Caldeirão, (Município de Itapicuru)

Os perfis geofísicos deste poço permitiram identificar duas seqüências aquíferas principais bem distintas (ver figura 3.4 à página 55). O perfil elétrico e a curva sônica indicam que os sedimentos arenosos encontrados da superfície até a profundidade de 50 m (cobertura da Formação Marizal) não estão totalmente saturados. Esta informação é consistente com as da SEV SV4MC (centrada a cerca de 1000 m a oeste do poço), a qual indica um contato marcante de decréscimo na resistividade a 36,4 m da superfície, coincidente com a superfície freática ou início da alternância arenitos/folhelhos saturados da seqüência aquífera superior. Vale salientar que o nível estático do poço (NE

= 55,42 m) não coincide com o nível freático inferido dos perfis geofísicos, provavelmente como um resultado de ascensão capilar. É possível também haver um gradiente hidráulico descendente das camadas freáticas para as camadas semi-confinadas, o que indica recarga “autóctone” das camadas semi-confinadas.

Na seqüência aquífera superior, representada pelos depósitos fluviais da Formação São Sebastião, os pacotes arenosos são mais espessos e resistivos e mostram padrões de SP e de radiação gama característicos de granodecrescência ascendente, isto é, aumento de argilosidade para o topo das camadas. A proporção de arenitos, nessa zona, é de praticamente 2/3.

A seqüência aquífera inferior, provavelmente associada a sedimentos da Formação São Sebastião Inferior (semelhantes aos do Grupo Ilhas), é caracterizada por alternância de camadas finas de arenitos argilosos e folhelhos, com poucos horizontes individualizáveis. A argilosidade aqui é mais elevada, caráter evidenciado tanto pela curva de radiação gama quanto pelas de resistividades elétricas. A proporção de arenitos, no intervalo atravessado pelo furo, é de cerca de 1/3.

Nas figuras 3.5 e 3.6 vêm representadas as distribuições verticais dos principais parâmetros petrofísicos estimados das informações geofísicas, de acordo com a metodologia resumida acima. Verifica-se que, efetivamente, a argilosidade (tanto elétrica quanto radioativa) é mais alta nos intervalos arenosos da seqüência aquífera inferior. A porosidade efetiva no intervalo superior varia entre 20 e 25% enquanto na seqüência inferior está acima de 30%. Valores de F , m e K permitem também uma distinção quantitativa entre as duas seqüências identificadas. Em geral F , e K são mais baixos na seqüência inferior. A tabela 3.1 mostra alguns valores de parâmetros calculados para alguns intervalos arenosos representativos conforme indicado na figura 3.5.

O índice de cimentação dos arenitos varia entre 1,2 e 2,4 e a salinidade da água, calculada usando a expressão 2.27 (em torno de 130 mg/l) é inferior à que consta na análise físico-química (508 mg/l), possivelmente pelo fato da água subterrânea não ser uma solução dominante de cloreto de sódio. Uma correção com base na equação $R_{ws} = 1,465R_w^{0,346}$, suporta essa afirmação.

Finalmente, a média geométrica das condutividades hidráulicas avaliada pela geofísica ($7,126 \times 10^{-6}$ m/s) ficou muito próxima daquela avaliada por hidráulica subterrânea - teste de bombeamento ($7,97 \times 10^{-6}$ m/s) (vê tabelas 3.1 e 1.1).

2. Poço Baixa do Salgado (Município de Ribeira do Amparo)

Aquífero	Intervalo (m)	V_{sh} (%)	ϕ_e (%)	m Coef. Cim.	K (m/s) $\times 10^{-6}$	Espessura (m)
1	101 a 107	3	20	1,8 e 1,3	8	6
2	130 a 147	16	13	1,8	6,32	10
3	159 a 171	26	5,5	0,9	3	6
4	194 a 209	3,3	31,6	1,8	17	10

Tabela 3.1: Parâmetros hidráulicos de pacotes arenosos selecionados nos dois sistemas aquíferos identificados.

O gráfico de dados de aquisição da figura 3.7 mostra o comportamento dos perfis geofísicos do poço BS de Ribeira do Amparo. Verifica-se que a seção é dominada por arenitos e assim constituída: (1) de 0 a 63 m arenitos heterogêneos e de granulação variada que caracterizam a Formação Marizal, praticamente sub-saturada em sua maior extensão, conforme indicam os perfis de resistividade; (2) de 63 m até a profundidade final do furo ocorrem espessos pacotes de arenitos, com delgadas intercalações argilosas (folhelhos) e um espesso pacote de siltito silicificado e fraturado (de 139 a 163 m de profundidade). Os arenitos são representativos de depósitos de canais e mostram, em alguns pontos, granodecrescência ascensional, conforme atestam as curvas de radiação gama e de SP. Todos esses pacotes contituem depósitos da Formação São Sebastião.

Na figura 3.8 estão representados os perfis petrofísicos derivados dos dados geofísicos do poço BS. Os resultados indicam que abaixo da Formação Marizal distinguem-se dois intervalos aquíferos, os quais são separados pela camada de siltito silicificado: (1) de 63 a 139 m tem-se um aquífero freático com porosidade, argilosidade e coeficiente de cimentação que crescem do topo para a base da seqüência, enquanto K decresce correspondentemente; (2) de 159 ao final do furo tem-se um aquífero semi-confinado mais limpo e de porosidade e permeabilidade mais uniformes que as do aquífero superior (alguns valores característicos pré-selecionados vêm mostrados na tabela 3.2). Observa-se também que a água do aquífero livre está mais salinizada que a do aquífero confinado conforme indicam as curvas do PE e da resistividade elétrica (ver figura 3.7).

É importante observar que os valores de resistividades interpretados na SEV SV3BS estão muito próximos das médias calculadas pela curva de indução, conforme mostra a figura 3.10 à página 61. Isso garante a validade dos modelos interpretados para as sondagens dessa vizinhança.

As estimativas de condutividade hidráulica receberam a mesma orientação daquelas utilizadas para m (ver figura 3.9). O aquífero confinado, no qual foram colocadas seções de filtros, mostrou uma média abaixo daquela mostrada na tabela 1.1 ($6,93 \times 10^{-6}$ m/s),

Aqüífero	Intervalo (m)	V_{sh} (%)	ϕ_e (%)	m Coef. Cim.	K (m/s) $\times 10^{-6}$	Espessura (m)
1	63 a 94	10	24	1	40	21
2	100 a 139	10	27	1,2	50	22
3	163 a 200	4	32	3,2*	0,6	37

Tabela 3.2: Parâmetros hidráulicos de alguns intervalos arenosos selecionados. Note que entre os intervalos 1 e 2 há uma lente de argila e entre as camadas 2 e 3 há um siltito argiloso que as separa.

o que é compreensível já que este valor foi superestimado por causa do uso de compressor no teste de vazão e pelo desconhecimento da profundidade da base do aquífero. A menor permeabilidade deste aquífero deve-se ao maior coeficiente de cimentação observado nesta camada (chega ao máximo de 3,2).

3. Poço Pau Ferro (Município de Olindina)

Este poço encontra-se a uma altitude de 235 m. Os dados de aquisição do poço Pau Ferro (PF) (figura 3.11), localizado sobre o “baixo de Olindina”, também mostra a presença de dois intervalos aquíferos:

- (a) O superior, freático, com cerca de 34 m de espessura, possui nível estático bem demarcado nos perfis elétricos e sônico na profundidade de 21 m; e
- (b) O inferior, semi-confinado se estende de 142 m até a profundidade final do furo. O nível estático do poço, definido após sua completação e desenvolvimento, situa-se na profundidade de 87,5 m. Tal fato sugere que a água do aquífero superior recarrega o aquífero inferior. A separação entre a Formação Marizal e o Grupo Massacará deve estar na base do folhelho arenoso amarelado que se observa a 89 m de profundidade, o que implica dizer que o aquífero freático é representante da Formação Marizal enquanto o aquífero inferior, semi-confinado, é pertencente ao Grupo Massacará.

Vale registrar que a parte inferior do perfil, abaixo de 230 m de profundidade, apresenta um comportamento elétrico anômalo, no qual a resistividade mostra um decréscimo acentuado, sem uma correspondente variação da contagem de radiação gama.

Os dados petrofísicos invertidos para o furo PF vêm dados nas figuras 3.12 e 3.13. Eles indicam que, no aquífero livre, as porosidades total e efetiva e o coeficiente de cimentação aumentam da base para o topo da camada, enquanto a argilosidade e a permeabilidade variam inversamente. No pacote semi-confinado inferior a porosidade e a permeabilidade são mais uniformes, variando de 9% a 12% e em torno de 1×10^{-4} m/s, respectivamente, na maior parte da seção.

A zona anômala de resistividade na base do intervalo confinado, parece indicar um

forte aumento de salinidade com a profundidade conforme sugere o perfil de STD. A discrepância de resistividade no arenito 2 apresentada na figura 3.14 deve-se provavelmente à maior ocorrência de folhelhos em profundidades superiores à profundidade do poço perfilado que influenciaram a SEV diminuindo a resistividade da camada 5 (figura I.5).

A camada mais superficial de arenito pode ser considerada um aquífero de baixo potencial, haja vista a saturação parcial interpretada nos 8 m mais rasos deduzida pelo aumento de resistividade e de DT das curvas, DIR e de sônico, respectivamente.

A camada mais profunda de arenito não mostra, neste poço, a sua base claramente caracterizada, mas esta interface foi considerada, para fins de estimativa da permeabilidade, como coincidente com o topo de uma camada de folhelho, com espessura de 4 m, a qual inicia a 263 m de profundidade (mostrada na perfilagem), ou seja, espessura (b) = 113 m.

Valores médios de argilosidade, porosidade efetiva, coeficiente de cimentação e permeabilidade estão mostrados na tabela 3.3.

Aquífero	Intervalo (m)	V_{sh} (%)	ϕ_e (%)	(Coef cim) m	K(m/s) (valor médio)	Espessura (m)
1	28 a 49	17	14	1	4×10^{-7}	21
2	150 a 230	7,5	9,5	0,9	1×10^{-4}	80
		média:9,5				

Tabela 3.3: Parâmetros hidráulicos computados para o poço PF

4. Poço Buriu II (Município de Crisópolis)

O perfil de aquisição da figura 3.15 mostra que este poço atravessou um pacote sedimentar multi-acamadado. Foram atravessadas 5 camadas aquíferas mais significativas que podem ser assim descritas:

- *Aquífero 1* (Aq.1): É um arenito pertencente a Formação Marizal, que ocorre no intervalo de 40 a 56 m (16 m de espessura).
- *Aquífero 2* (Aq.2): Ocorre no intervalo de 108 a 168 m (60 m de espessura), é o principal aquífero no qual poderiam ter sido colocadas mais seções de filtro para aumentar a capacidade produtiva do poço (ver figura 3.16).
- *Aquífero 3* (Aq.3): Ocorre no intervalo de 182 a 200 m (18 m de espessura).
- *Aquífero 4* (Aq.4): Ocorre no intervalo de 209 a 220 m (11 m de espessura), é o aquífero de menor potencial hídrico.

- *Aqüífero 5 (Aq.5)*: Ocorre no intervalo de 226 a 246 m (20 m de espessura), é uma camada com potencial hídrico só inferior ao Aq.2.

Este poço também mostra a presença de dois sistemas aquíferos:

- (i) Um superior, de menor espessura ($b \approx 20$ m), com topo, ou NE a 32 m de profundidade, podendo estar parcialmente confinado, representa a Formação Marizal; e
- (ii) O segundo sistema é confinado, multi-acamadado, com pelo menos três horizontes arenosos atravessados pelo furo, separados entre si por delgadas (6 a 8 m de espessura) camadas de folhelhos. Esses dois sistemas estão separados por espessa seqüência de folhelhos e siltitos, com mais de 40 m de espessura.

Vale salientar que a camada arenosa descrita no relatório de poço da CERB como arenito fino a médio do intervalo de 2 a 17 m, não estava totalmente saturado. A curva de DT indica saturação de sedimentos somente a partir de 32 m de profundidade. O nível estático referente à carga hidráulica dos aquíferos captados encontra-se a 46,58 m de profundidade, o que permite inferir um gradiente hidráulico do Aq.1 para o Aq.2 de aproximadamente $14,58/52 \approx 0,28$, sendo 52 a espessura do folhelho em metros.

A SEV mais próxima (executada na tentativa de ser paramétrica), foi centrada a cerca de 400 m de distância deste poço. Ela propiciou um perfil algo complicado, mas pode ser interpretado como na figura 3.2 à página 46.

Os parâmetros petrofísicos derivados para os arenitos estão mostrados na figura 3.16. Nela verifica-se que todos os arenitos são argilosos e que em geral a argilosidade aumenta em direção ao topo das camadas.

Apesar da imprecisão dos valores de K , por causa de distorções na curva de SP, dos valores das constantes utilizadas e possíveis anomalias de minerais radioativos que influenciam a curva de GR, em alguns pontos, os valores calculados pela teoria de hidráulica subterrânea estão relativamente próximos como mostra a tabela-resumo 1.1, onde $K = 3,2 \times 10^{-6}$ m/s (ver tabela 3.4 e figura 3.1).

Aqüífero	Coef. cim. m	V_{sh} (%)	ϕ_e (%)	$K(\times 10^{-6})$ (m/s)	Espess. (m)
1	0,7	10	13	8,5	16
2	0,7	17	16	1,6	52
2-base	1,4	2	21	4,65	8
3	0,9	14	17,5	2	18
4	0,6	28	9	1,41	11
5	1,6	4	21	15	20

Tabela 3.4: Poço Buriu II, Crisópolis - Tabela-resumo de parâmetros hidráulicos, onde a média de K nas camadas explotadas é de 2,79 enquanto a média geométrica de K na tabela 1.1 é de $2,99 \times 10^{-6}$ m/s.

Aqüífero	V_{sh} (%)	PHIe (%)	K (m/S)	K (tabela 1.1)
1	10	13	8,5	Media Geométrica: 2,99
2	17	16	1,6	
2-base	2	21	4,65	
3	14	17,5	2	
4	28	9	1,41	
5	4	21	8	

Media de K para as camadas explotadas: 2,79 m/s.

Observacao: K em milhonesimos de m/s.

Figura 3.1: Poço Buriu II, Crisópolis - Tabela-resumo de parâmetros hidráulicos.

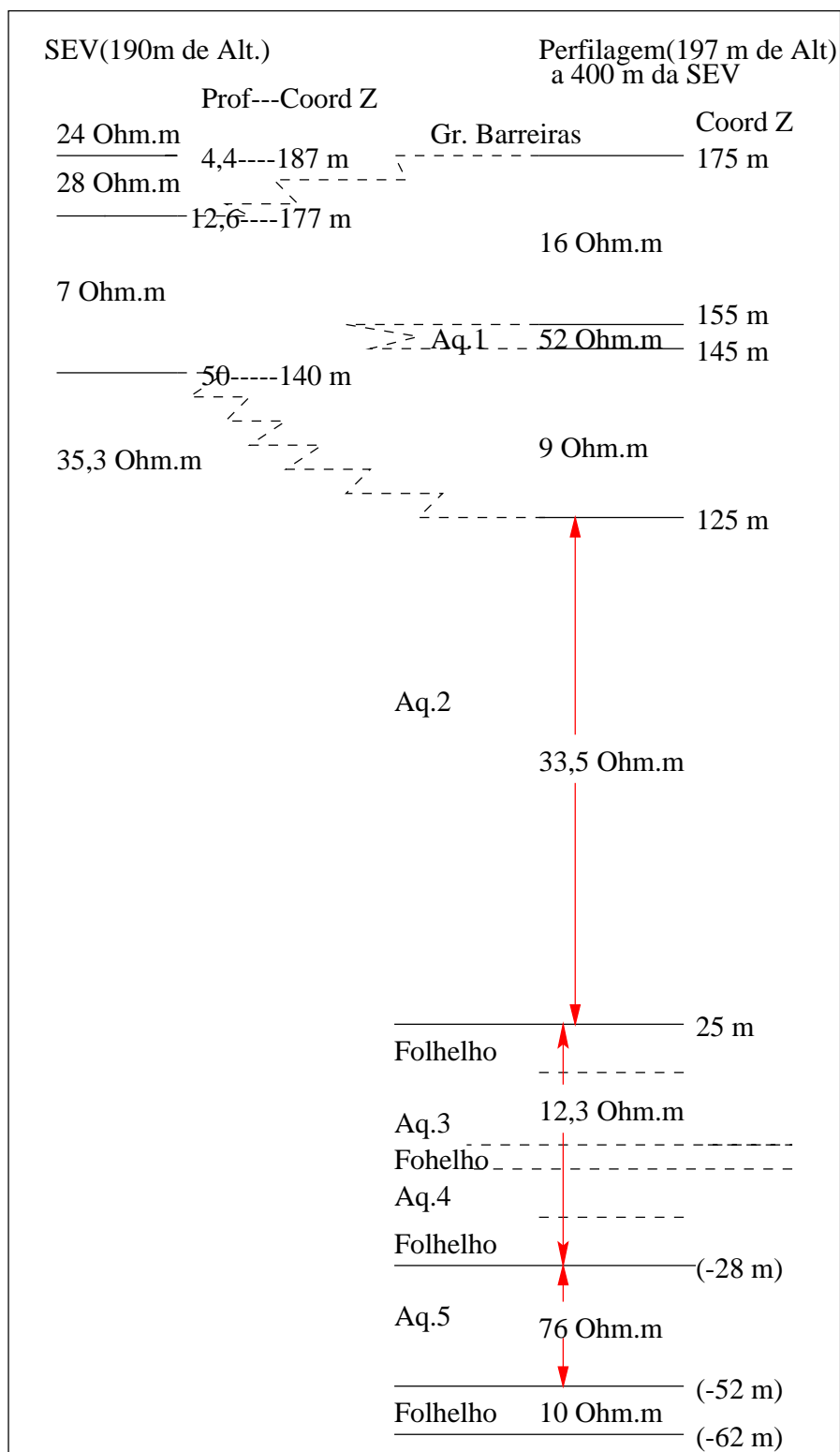


Figura 3.2: Poço Buriu II, Crisópolis - Valores comparativos de resistividades da SEV versus perfilagem.

5. Poço São Miguel 2 (Município de Nova Soure)

Este poço atravessou um pacote sedimentar simplesmente descrito, com base na perfilagem, como 2 camadas de arenitos e uma de folhelhos (ver figura 3.18, à página 69).

O arenito mais superficial, que ocorre da superfície até 34 m de profundidade (34 m de espessura), é quase totalmente seco, com exceção dos últimos 4 metros (deduzidos pela curva de sônico), o que o faz localmente estéril.

O pacote de folhelhos, ocorre entre 34 a 123 m (89 m de espessura), com várias intercalações arenosas, a maior delas entre 52 e 60 m de profundidade. O nível hidráulico observado aos 87,17 m representa a carga hidráulica do aquífero principal que pode estar recebendo recarga desta intercalação arenosa e do arenito mais superficial, principalmente via fraturas e falhas.

O arenito basal que é o aquífero principal, e que está sendo explotado pelo poço, tem como topo a profundidade de 123 m e, seguramente, não foi alcançado seu limite inferior (não foi identificado na perfilagem nem pela SEV SV2SM2). Este aquífero terá prioridade na descrição dos gráficos de parâmetros interpretados. A curva do PE apresenta-se deformada, mas a linha de base dos folhelhos, usada para cálculo do potencial estático, foi corrigida.

O gráfico da figura 3.19 mostra que a curva de STD apresenta valores sempre maiores que o registrado na análise físico-química (média ponderada de 571 e 522 mg/l, respectivamente). Não é normal esta diferença a mais (49 mg/l), fato que pode ser explicado pelo comportamento irregular da curva de PE. Contudo, para efeito de cálculo de K , foram utilizados valores ρ_w deduzidos pela curva do PE e foi analisada a validade dos valores calculados.

A argilosidade média do intervalo com filtros ficou em torno de 8%, que é a média geral do aquífero, com exceção do intervalo de 148 a 162 m em que o V_{sh} médio é em torno de 4%.

A porosidade efetiva mostrou valores de 22% no intervalo de 130 a 250 m e de 18% no intervalo de 250 aos 300 m do final da perfilagem.

Quanto à condutividade hidráulica mostrada na figura 3.20, o intervalo de 190 aos 300 m apresenta uma diferença de valores calculados pelas equações 2.7 e 2.9, talvez por conta da maior sensibilidade da primeira aos ruídos dos valores do PE. A média, considerando os melhores valores, ficou em torno de $1,41 \times 10^{-6}$ m/s. Se considerarmos todos os valores calculados teremos uma média próxima de 10^{-7} m/s, a qual deve ter significância, pois o bom potencial mostrado pelo valor de vazão específica da tabela

1.1 não é confiável por causa do uso de compressor no teste de vazão combinado ao baixo nível piezométrico do poço (87,17 m).

A correlação da SEV com o poço perfilado ficou algo estranho por conta da escala nos perfis AA' e BB', mas ficou mais compreensivo na figura esquemática 3.3, em que a escala vertical quase não tem exagero.

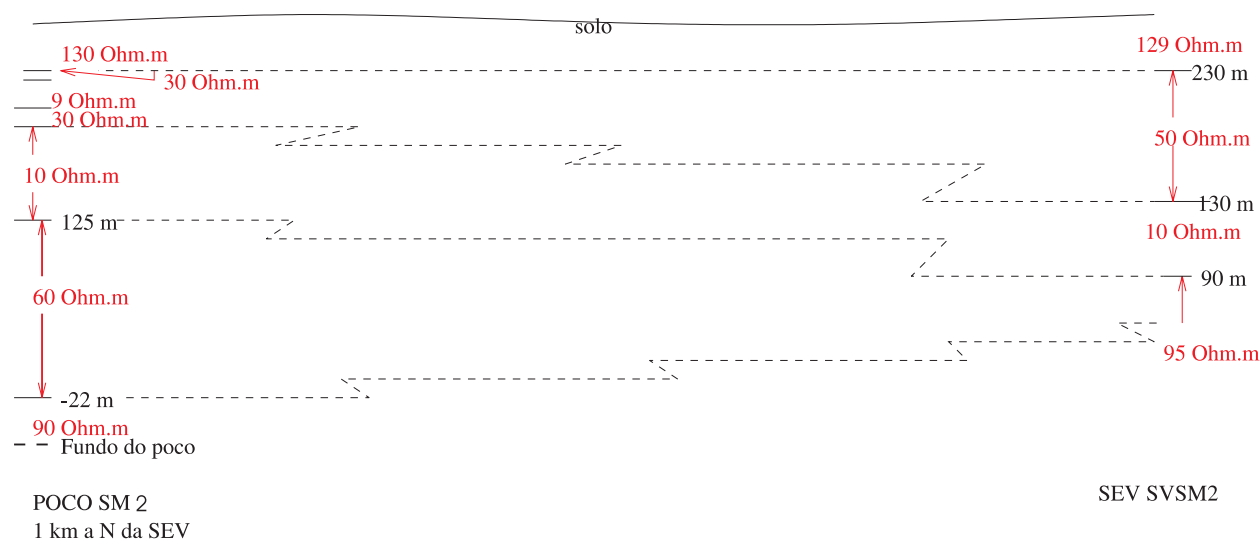


Figura 3.3: Poço São Miguel 2, Município de Nova Soure. Correlação poço - SEV.

6. Poço Ql1st-1 (PETROBRAS)

Esta perfilagem mostrou que as prováveis camadas aquíferas apresentam resistividades aparentes variando de 45 Ohm.m nas camadas mais argilosas até 80 Ohm.m nas camadas mais limpas (vê figura 3.21). A SEV realizada com centro de eletrodos a 50 m deste poço resultou em valores de ρ_o bem maiores que os desta perfilagem, provavelmente por causa da alta resistência de contato eletrodo/solo e do grande diâmetro do furo.

A formação atravessada pelas descrições litológicas é a denominada São Sebastião Superior. Como os dados do PE e da resistividade LN (Normal Longa) (figura 3.21) não se mostram confiáveis, as interpretações de salinidade, ρ_w , argilosidade, porosidade, fator de formação de resistividade, coeficiente de cimentação e permeabilidade, não foram realizadas.

7. Poço 1-IN (PETROBRAS)

Os dados deste poço foram utilizados para a confecção do perfil AA' e mostraram valores de resistividade dos arenitos São Sebastião com as seguintes características: (i) Arenitos mais limpos: 110 Ohm.m; e (ii) Arenitos mais argilosos: 85 Ohm.m.

Observa-se também que os arenitos mais limpos são mais espessos e freqüentes (ver figura 3.22). Neste poço e nas suas proximidades ocorre expressiva camada de sedimentos do Grupo Barreiras, a qual vai do solo à profundidade de 40 m. Abaixo do Grupo Barreiras repousa, discordantemente, a Formação Marizal a qual começa com uma camada de folhelho e termina num siltito argiloso, aos 99 m de profundidade. As posições destes contatos foram adotadas na confecção do perfil AA'.

A SEV SV11N, a qual teve o centro de eletrodos a 100 m deste poço mostrou valores de ρ_o compatíveis com os desta perfilagem (vê figura I.1), mas estão deslocados verticalmente, fato explicado pela falha com direção N50°W, a qual passa exatamente neste poço e deve ter componente vertical de movimento dos blocos.

3.1.2 Avaliação geral da condutividade hidráulica

Pela tabela 3.5, conclui-se que as equações aplicadas com critério aos dados de perfilagens de poços, constituem-se em ferramentas importantes para avaliação, camada por camada, do potencial hidrogeológico do aquífero São Sebastião. São valores comparáveis àqueles encontrados por Lima e Niwas (2000), para a bacia do Recôncavo ($K = 7,633 \times 10^{-6}$ m/s, em média), e por Bastos (1999) na região de Camaçari-Dias D'Ávila ($K = 3,56 \times 10^{-6}$ m/s, em média).

Poço	$Q/\Delta s$ ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$)	$K(m \cdot s^{-1}) \times 10^{-6}$ (hidrodinâmica)	$K(m \cdot s^{-1}) \times 10^{-6}$ (geofísica)
PF	6,35	30,15	47,49
SM2	4,02*	—	1,41
MC	3,37	7,97	7,126
BS	3,11	<6,93	3,87
BII	1,11	3,2	2,79

Tabela 3.5: Avaliação hidráulica comparativa dos poços. $Q/\Delta s$ é a vazão específica.

*Avaliação superestimada.

*Note-se que a colocação, em segundo lugar, do poço SMII (em termos de vazão específica) não foi confirmada com relação à permeabilidade avaliada por geofísica, em função da não utilização de vazão constante no teste de vazão (avaliação hidráulica superestimada). A condutividade hidráulica da camada explotada deste poço, após estimativa geofísica, passa a ter o menor potencial dos cinco poços perfilados.

3.2 Caracterização geolétrica

Por causa de uma nítida diferença nas características do aquífero São Sebastião da parte norte para a parte sul do Rio Itapicuru, as feições elétricas destas áreas são descritas em dois sub-ítemos distintos. Todas as sondagens elétricas obtidas nesse trabalho foram invertidas quantitativamente usando o pacote unidimensional RESIST v. 1.0, de domínio público e de autoria de Van del Velpen (1988). A precisão, a qualidade e a convergência desse procedimento é similar a de outros procedimentos computacionais desenvolvidos no CPGG/UFBA. Como normas para viabilizar essas inversões e reduzir as ambiguidades intrínsecas do método geolétrico foram adotados os seguintes passos:

1. Fixar o número de camadas de cada modelo com base nas feições gerais da curva da respectiva sondagem, das informações litológicas de poços da vizinhança e da correlação com modelos obtidos para sondagens vizinhas;
2. Fixar ou atribuir limites para as espessuras e resistividades de cada modelo tendo como base dados de poços e a correlação associativa entre sondagens.

O processo de inversão foi iniciado com a interpretação de todas as sondagens paramétricas (sondagens elétricas centradas próximo a poços de exploração de petróleo ou de água subterrânea). Isso permitiu precisar o rigor da inversão e a existência ou não de fenômenos de equivalência e supressão. Em seguida todas as demais sondagens foram invertidas, inicialmente de uma forma livre, apenas fixando-se criteriosamente valores iniciais para as resistividades e espessuras das diferentes camadas do sub-solo.

3.2.1 Área da sub-bacia Tucano Sul

Nesta área, localizada a sul do rio Itapicuru, há uma maior frequência de curvas do tipo **KHK**, e, em segunda ordem de ocorrência, aparecem curvas do tipo **HKH**.

Nas SEV's do Baixo de Olindina (estrutura observada no perfil das figuras 3.23 e 3.24), há uma maior frequência de curvas do tipo **HA** combinado com tipo **K** ou **Q**, por causa da ocorrência de uma camada de folhelho que se inicia a 10 m de profundidade, e espessura crescendo no sentido norte-sul da sub-bacia.

Os valores de resistividades interpretados para arenitos caem em dois grupos: Os mais altos variam de 500 a 930 Ohm.m e os mais baixos de 30 a 130 Ohm.m. Interpretamos os primeiros como camadas arenosas sub-saturadas e o segundo grupo de valores como arenitos

argilosos saturados. Folhelhos apresentam resistividades tipicamente no intervalo de 5 a 20 Ohm.m e chega a 45 Ohm.m nos mais arenosos (SEV SV17LF).

O perfil AA' (figura 3.23), mostra que os arenitos São Sebastião apresentam valores de resistividade interpretadas desde 57 até 145 Ohm.m (esta é a mesma tendência mostrada no perfil BB' da figura 3.24). Por conta da máxima abertura utilizada na expansão das SEV's não foi possível precisar as resistividades de arenitos abaixo de 150 m de profundidade por causa da influência de intercalações argilosas (ver sondagens SV7B2 e SV19S1 na figura 3.24). Verifica-se um maior espessamento das camadas argilosas no sentido norte-sul e oeste-leste, e uma maior limpeza e uniformidade de arenitos nos sentidos contrários, em especial dentro da estrutura denominada "Baixo de Olindina".

Neste setor da bacia há uma maior quantidade de dados, tanto de perfilagem de poços como de fichas técnicas, motivo pelo qual será aqui mais detalhada. Em termos de litológicos o *Grupo Massacará* apresenta grande variação, com arenitos de granulação variando de fino a grosseiro à medida que nos aproximamos da borda leste da bacia, aspecto observado principalmente no perfil BB'. Subordinadamente ocorrem lentes de folhelhos puros e folhelhos arenosos com espessuras sempre inferiores a 50 m e de extensão limitada. Pode-se citar como litologias pertencentes à *Formação Salvador*, os conglomerados brechosos, às vezes argilosos e às vezes arenosos que ocorrem próximo à borda leste da bacia.

A distinção entre a Formação Marizal e o Grupo Massacará, problema importante neste trabalho, foi efetuada levando em conta um contato brusco entre sedimentos de alta argilosidade na base da Formação Marizal, com sedimentos arenosos de baixa argilosidade do topo do Grupo Massacará. Exceção a esta regra foi observada apenas num segmento de cerca de um quilômetro a norte da SEV SV18PU (figura 3.23) e noutro bem mais extenso entre as SEV's SV14L e SV15CB (figura 3.24) onde, mantendo-se a regra haveria uma espessura exagerada para a Formação Marizal. A espessura máxima das coberturas do Grupo Massacará, nesta sub-bacia, chega a 160 m, controlada pela estrutura de "graben" do Baixo de Olindina.

Como acontece na SEV SV17LF (figuras 3.23 e I.17), geralmente na área ocorre a seguinte seqüência: (i) um nível condutivo superior representando o solo umedecido por chuvas ocorridas na época do levantamento; (ii) um nível resistivo representativo de material arenoso sub-saturado; (iii) segue-se um espesso pacote condutivo de argila arenosa com intercalações de folhelho, pertencentes à *Formação Marizal*; e (iv) arenitos São Sebastião semi-confinados pelo meio anterior, com $\rho_o \approx 120$ Ohm.m, que são reservatórios de água doce (STD menores que 300 mg/l, geralmente) e possuem intercalações de folhelhos pouco extensas.

Em termos estruturais verifica-se, no perfil AA' da figura 3.23, no sentido sul-norte até

a falha de Itapicuru, *quatro estruturas* dignas de nota.

A *primeira* é uma falha de gravidade, na qual se encaixa o Riacho da Gameleira, que deve se estender mais para nordeste além do limite esperado.

A *segunda*, que não aparece indicada no mapa geológico, relaciona-se a uma ramificação associada a falha de Sátiro Dias, constante no arcabouço tectônico da bacia (Milani, 1987). Esta falha estende-se a nordeste até atingir o perfil BB' (figura 3.24, próximo à SEV SV15CB, onde apresenta rejeito menor).

A *terceira* é representada tracejada por causa da quase ausência de rejeito vertical. Está provavelmente relacionada à lineação que cruza o perfil BB' (figura 3.24), próximo à SEV SV13FS. Esta falha, mapeada com três quilômetros de extensão, é local de encaixe do vale do Riacho dos Porcos.

A *quarta estrutura* é uma dobra homoclinal relacionada à falha Quixabeirinha constante no arcabouço tectônico de Milani (1987). Como esta estrutura afeta também os sedimentos da Formação Marizal, deduz-se tratar-se, com maior probabilidade, de uma estrutura de dobra homoclinal.

No perfil BB' as espessuras das coberturas do Grupo Massacará são sensivelmente menores, atingindo no máximo 110 m. As estruturas mais importantes mostradas neste perfil já foram comentadas na discussão do perfil AA'.

Os mapas de ρ_a para AB/2 de 100 m (figura 3.26) e 200 m (figura 3.27) mostram essas estruturas com pouca nitidez, sendo digno de nota a da falha a noroeste da SEV SV14L, que cruza o perfil BB' mas não o perfil AA'. O mapa da figura 3.28 (ρ_a para AB/2 de 500 m) mostra uma área delineada pela curva de $\rho_a = 40$ Ohm.m que parece corresponder ao Baixo de Olindina e dá uma boa idéia por onde passam as duas estruturas delimitantes deste baixo: (i) Uma falha a noroeste da SEV SV17LF (no perfil AA') e rente à SEV SV15CB (no perfil BB'); e (ii) A estrutura homoclinal que intercepta o perfil AA' entre o poço SM2 e a SEV SVSM2, com direção quase paralela à primeira.

3.2.2 Área da sub-bacia Tucano Central

Localizada a norte do Rio Itapicuru na folha de trabalho. Como na sub-bacia Tucano Sul ocorrem em maior frequência, curvas do tipo **KHK**, mas esta tendência não é muito nítida, pois ocorrem outros tipos como **QH**, **HKQ**, etc. Tentou-se fazer uma distinção entre as SEV's centradas sobre a Formação Marizal daquelas sobre a Formação São Sebastião, mas não foi possível estabelecer diferenças, talvez por conta do baixo número de SEV's sobre a

Formação São Sebastião (4 SEV's) e das dificuldades causadas por horizontes superficiais muito resistivos.

Em termos de litologias o perfil geoeletrico CC' mostra-se relativamente monótono em relação aos outros dois. Tal fato pode não representar fielmente o caráter petrográfico do setor, por causa da menor quantidade de poços (neste perfil só dispomos de informações de poços com profundidade inferiores a 150 m, a exemplo do poço de número 037, e nenhum poço com dados de perfilagem geofísica). Apesar da profundidade do poço RPst-1(4.229 m), as maiores variações faciológicas são observadas nos poços de número 257, 156 e 37, da CERB (ver figura 3.25).

As litologias predominantes no Grupo Massacará, incluem arenitos médios a grosseiros com variações para arenitos argilosos e folhelhos pouco espessos (estes últimos apresentam espessura máxima de 10 m no setor oeste e 20 m no setor leste do perfil CC'). No setor oeste, além das litologias acima citadas aparecem conglomerados brechosos com 60 m de espessura no poço 156 e argilosos e 20 m de espessura no poço 37. Estes conglomerados pertencem à Formação Salvador.

A *Formação Marizal*, se apresenta na forma de arenitos argilosos como litologia predominante, com folhelhos localizados.

É evidenciado neste setor, o alto grau de conexão hidráulica entre as formações Marizal e São Sebastião. As sondagens elétricas dessas coberturas mostram pequena espessura e uma tendência de queda gradual da resistividade aparente refletindo a tendência de aumento, em função da profundidade, da argilosidade ou de salinidade das águas que as percolam. Na maior parte das vezes, há um delgado corpo que separa o lençol freático, quase sempre salinizado, do semi-confinado com salinidade sempre dentro dos limites de potabilidade. Este último sempre ocorre em sedimentos do Grupo Massacará enquanto o primeiro nem sempre ocorre só na Formação Marizal.

O *Grupo Massacará* se faz representar na grande maioria das sondagens elétricas, como alternâncias resistivas e condutivas. Os valores de ρ_a oscilam pouco dentro deste grupo de sedimentos, saindo de um meio condutivo elétrico que não conduz água, passando para um meio levemente mais resistivo armazenador e transmissor de água, e finalmente para a um condutivo normalmente representativo de intercalações argilosas. As SEV's SV8FA, SV9IC, SV20AC e SV21RR (figuras I.8, I.9, I.20, e I.21), são representativas desta tendência.

Com relação aos mapas de ρ_a , as figuras 3.26, 3.27 e 3.28 mostram o *setor noroeste* nitidamente separado do *setor nordeste*, na área estudada. Este aspecto pode ser explicado pela separação dos setores por falhas de direção NE (estas falhas estão mais presentes no setor

nordeste). No setor noroeste predomina o caráter livre dos aquíferos do Grupo Massacará, enquanto no setor nordeste predomina o caráter semi-confinado do Grupo Massacará. Estas características não ficaram bem evidenciadas por causa da ocorrência de coberturas de areias resistivas nas sondagens do setor nordeste.

Quanto a estruturas podemos dizer que a separação entre os dois setores está bem nítida no mapa da figura 3.28, indicando a parte terminal do falhamento a leste do poço RPst-1, embora a mesma não tenha sido detectada no perfil CC'. Das falhas observadas no perfil CC', de leste para oeste, a 1^a, 5^a, 6^a e a 7^a correspondem a extensões, sob as coberturas, de falhas observadas em mapas geológicos pré-existentes, enquanto a 3^a e a 4^a foram deduzidas como intersecções com a falha de Itapicuru e a 2^a (observada a oeste da sondagem SV12CB) foi deduzida pelo forte desnível topográfico.

O setor noroeste inclui o segmento norte do perfil AA', que mostra uma estruturação simples, semelhante a do perfil CC'. Nele observa-se o contato erosivo entre a Formação Marizal e o Grupo Massacará e a espessura da Formação Marizal proporcional ao nível topográfico local, chegando a um máximo de cerca de 75 m, como ocorre no perfil CC'.

Os arenitos da Formação São Sebastião ao longo do perfil CC' mostram valor mínimo de 90 Ohm.m na SEV SV21RR e máximo de 147 Ohm.m na SEV SV10RT. Por isso achamos esta parte da área de estudos algo distinta da descrita como sub-bacia Tucano Sul. Segundo o mapa Bouguer de Magnavita (1992), a parte mais profunda da bacia encontra-se próxima ao poço RPst-1 da PETROBRAS. O embasamento vai se tornando mais raso a partir da falha existente entre este poço e a SEV SV10RT, no sentido oeste-leste e por “degraus”, até a falha situada a oeste da SEV SV12CB. A partir desta falha, até a borda leste da bacia de Tucano, a espessura de sedimentos permanece mais ou menos constante (Guimarães, 2002).

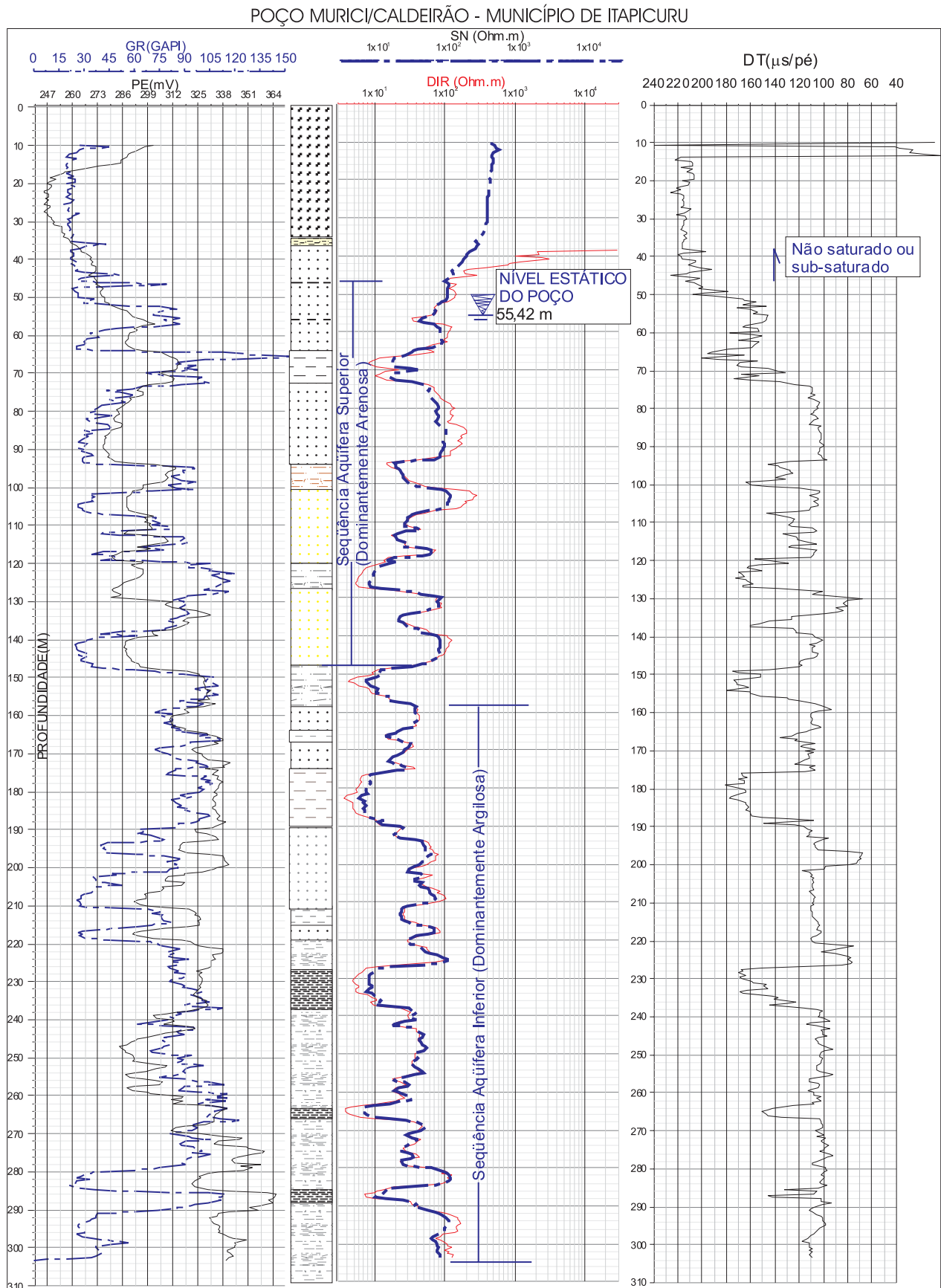


Figura 3.4: Poço Murici-Caldeirão, município de Itapicuru - perfis de GR, elétrico (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 55,42 m.

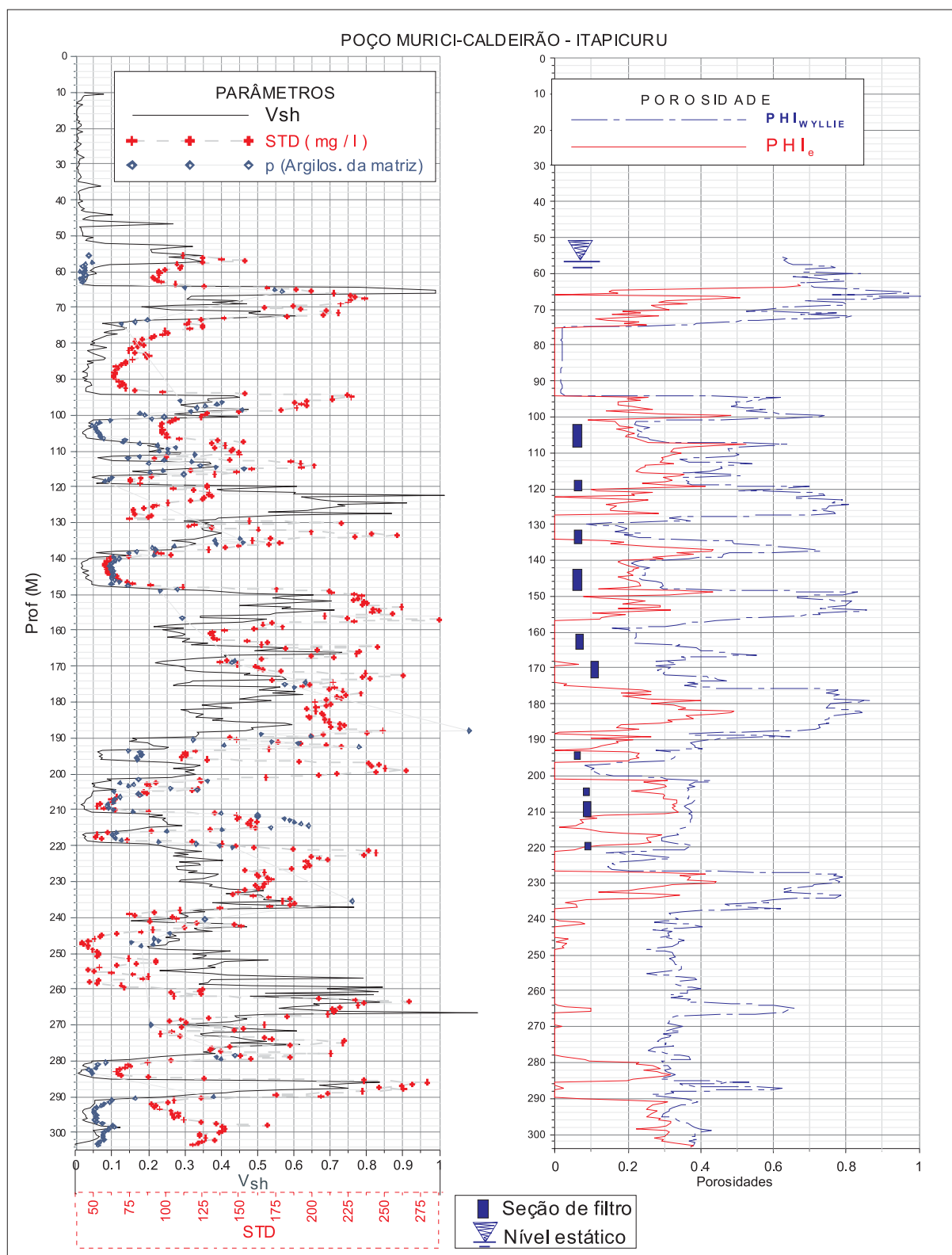


Figura 3.5: Poço Murici-Caldeirão, município de Itapicuru - perfis de: V_{sh} , STD, argilosidade da matriz (p); e porosidade.

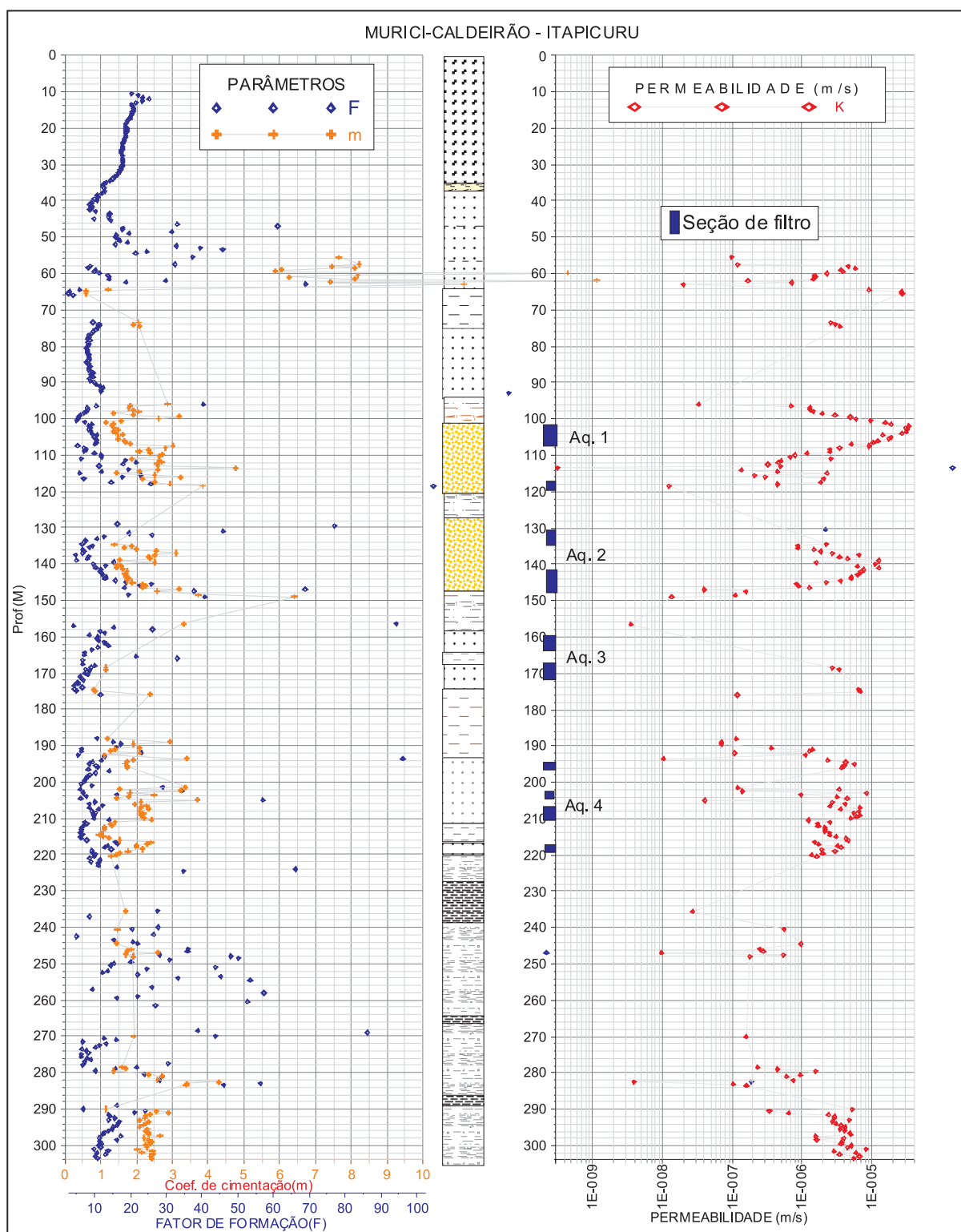


Figura 3.6: Poço Murici-Caldeirão, município de Itapicuru - perfis de: Coeficiente de cimentação (m), fator de formação de resistividade da eq. 2.3 (F) e condutividade hidráulica (K em m/s).

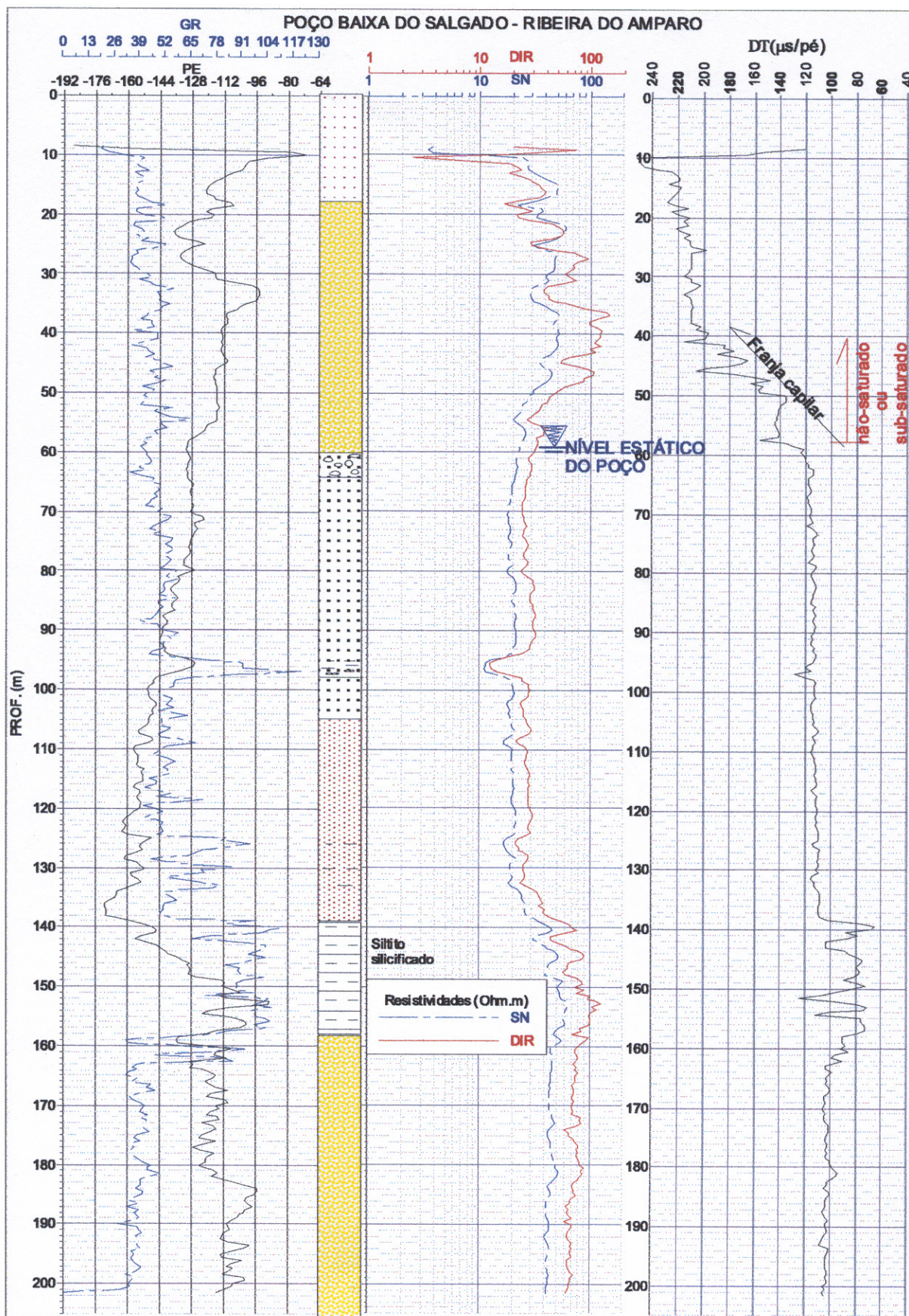


Figura 3.7: Poço Baixa do Salgado, município de Ribeira do Amparo - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 59,91 m.

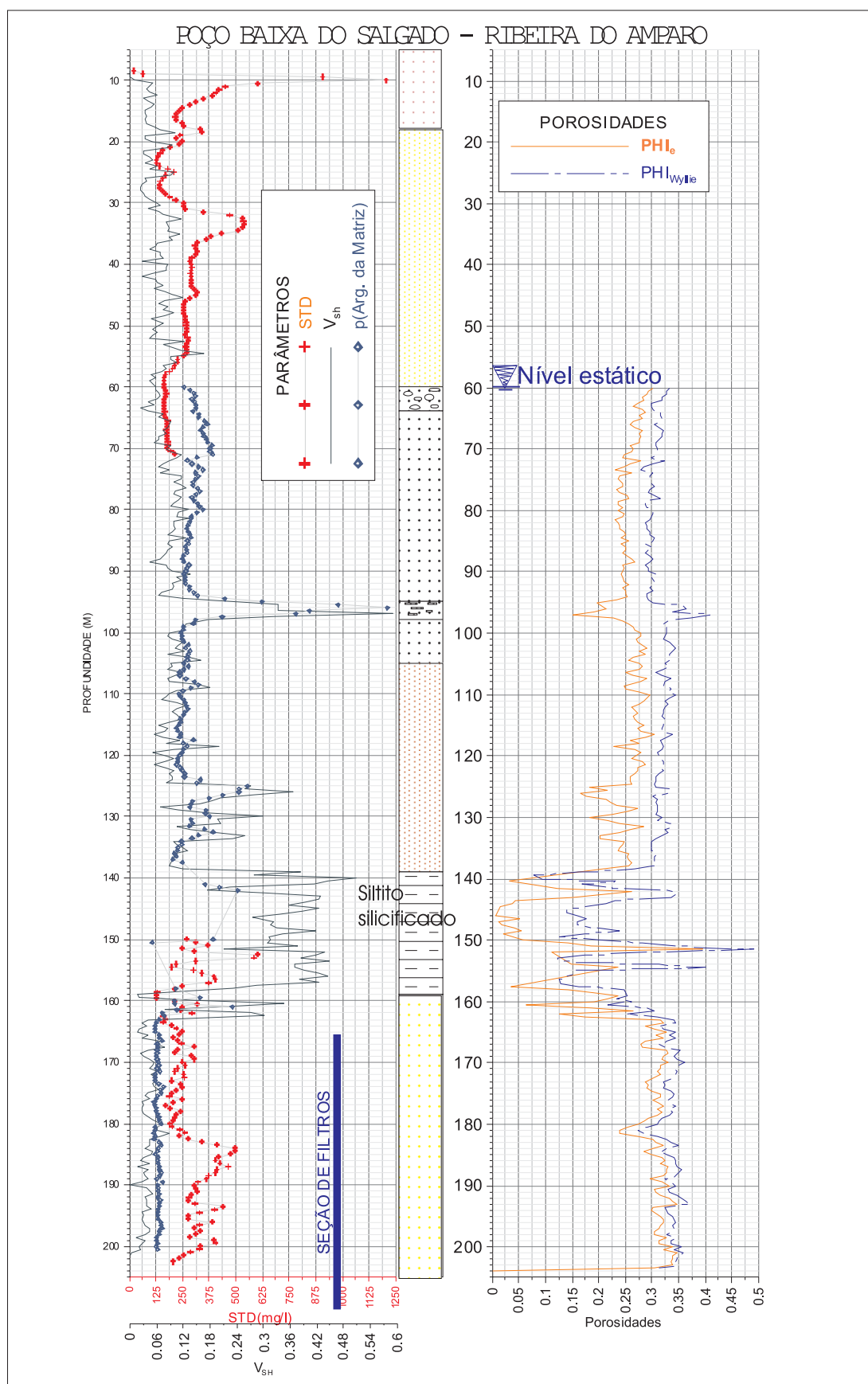
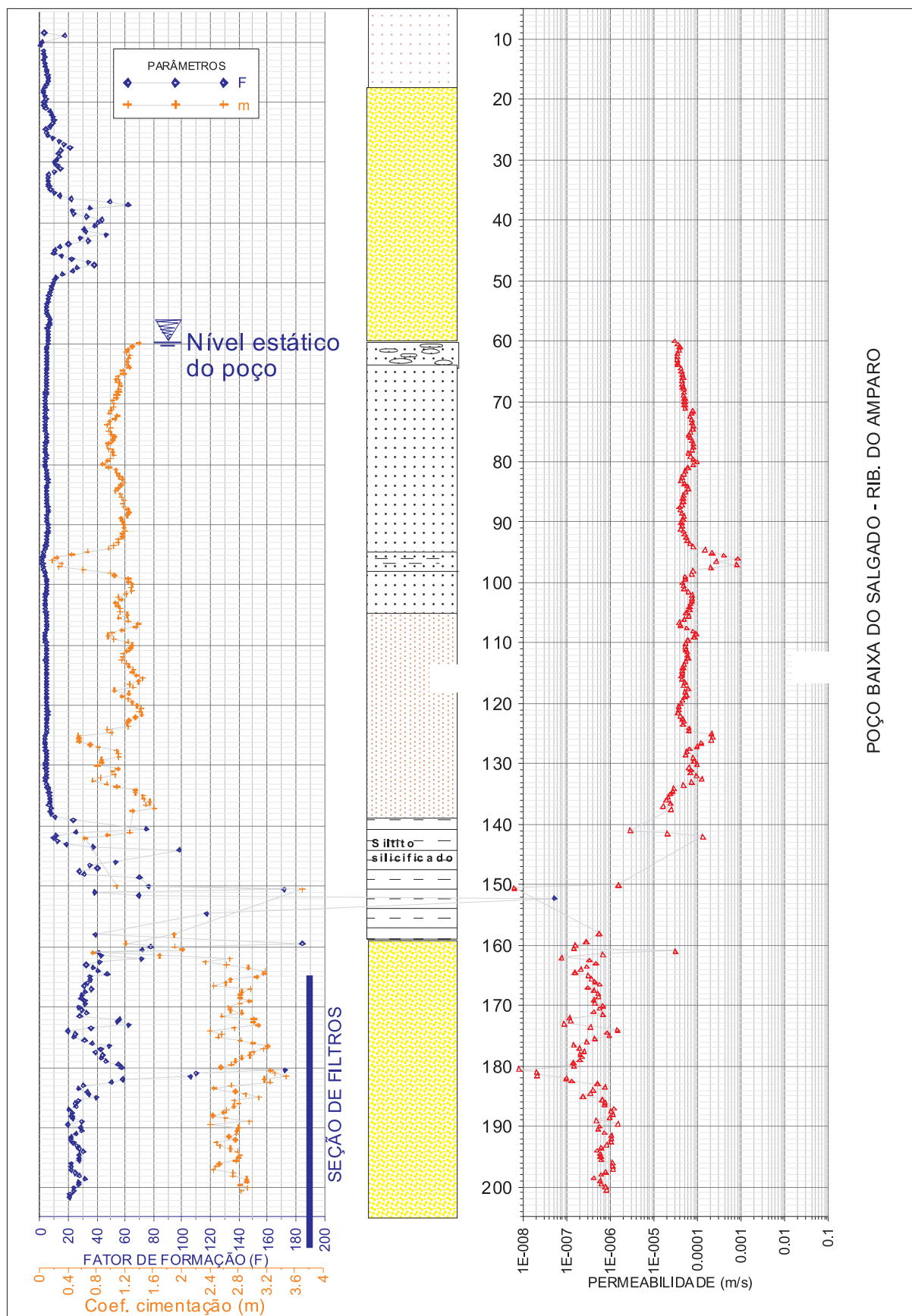


Figura 3.8: Poço Baixa do Salgado, município de Ribeira do Amparo - perfis de STD, V_{sh} , argilosidade da matriz (p); e de porosidade.



POÇO BAIXA DO SALGADO - RIB. DO AMPARO

Figura 3.9: Poço Baixa do Salgado, município de Ribeira do Amparo - perfis de m , F ; e condutividade hidráulica.

SEV (Ohm.m)	PERFILAGEM (DIR) (Ohm.m)	PROFUNDI- DADE
33	30	
93	68	25 m
18	26	55 m
84,3	76	138 m

Figura 3.10: Poço Baixa do Salgado locado numa altitude de 245m - Valores comparativos de resistividade interpretados na SEV versus médias da perfilagem, em Ohm.m.

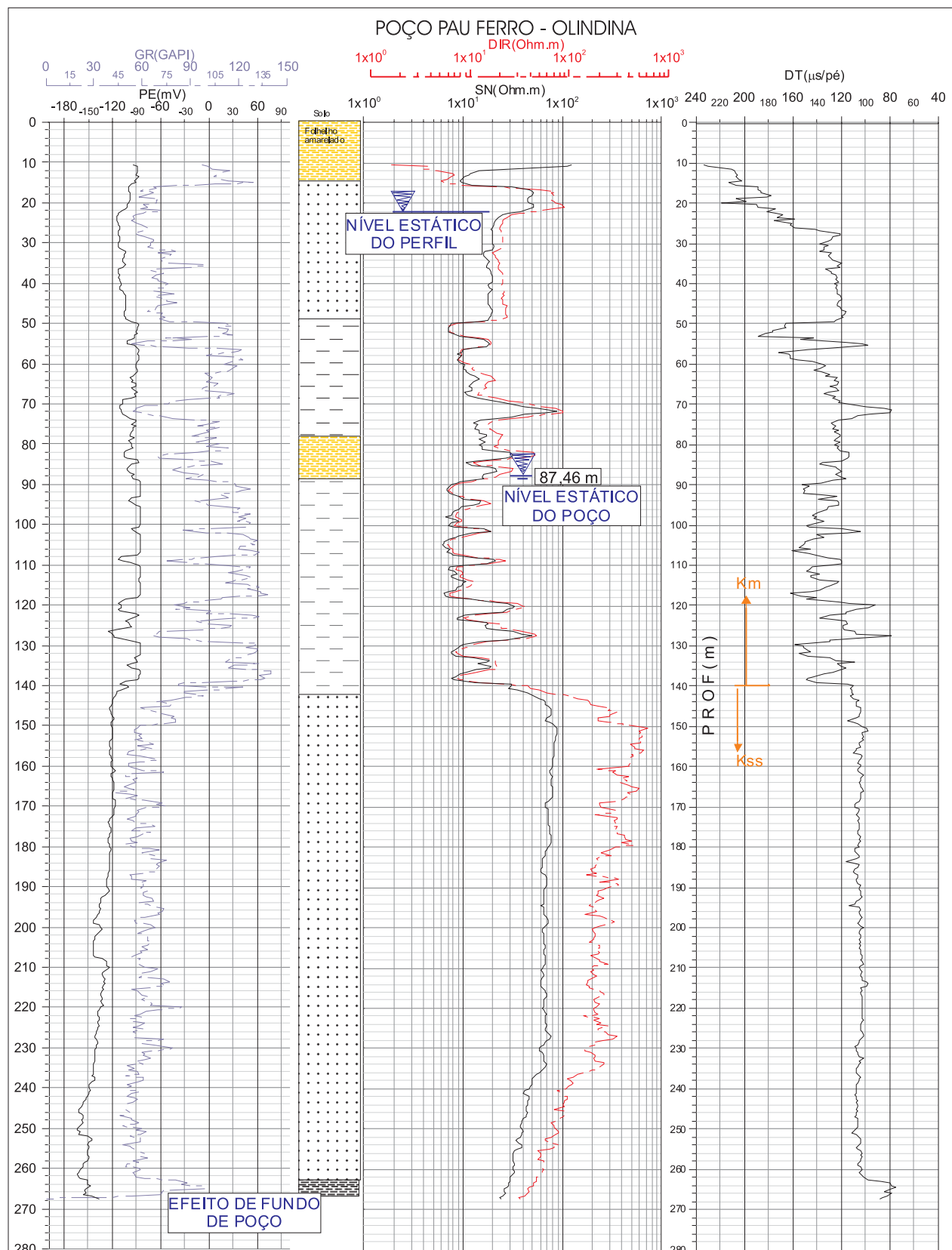


Figura 3.11: Poço Pau Ferro, município de, município de Olindina - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 87,46 m.

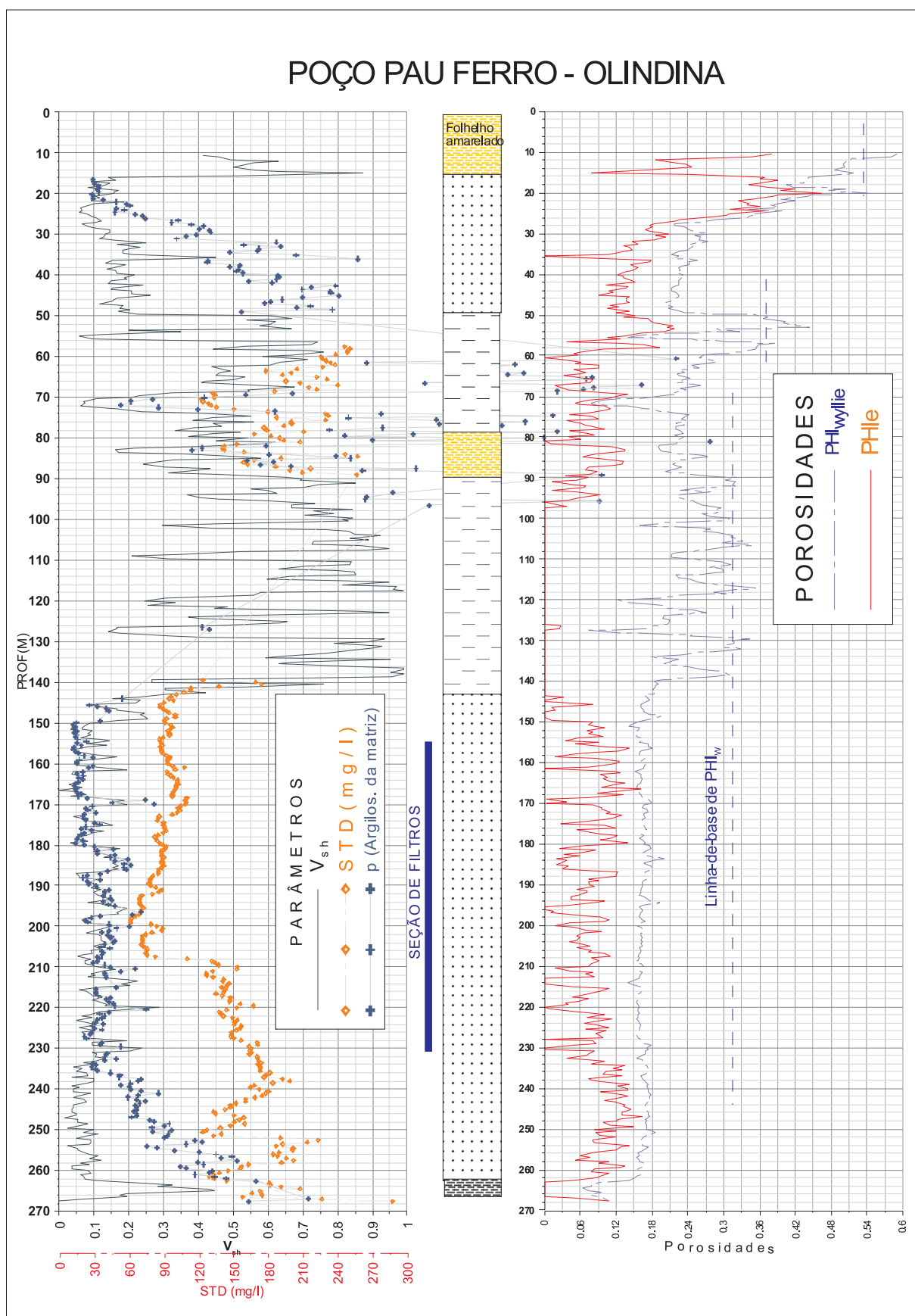


Figura 3.12: Poço Pau Ferro, Município de Olindina - perfis de: V_{sh} , STD, argilossidade da matriz (p) e porosidade.

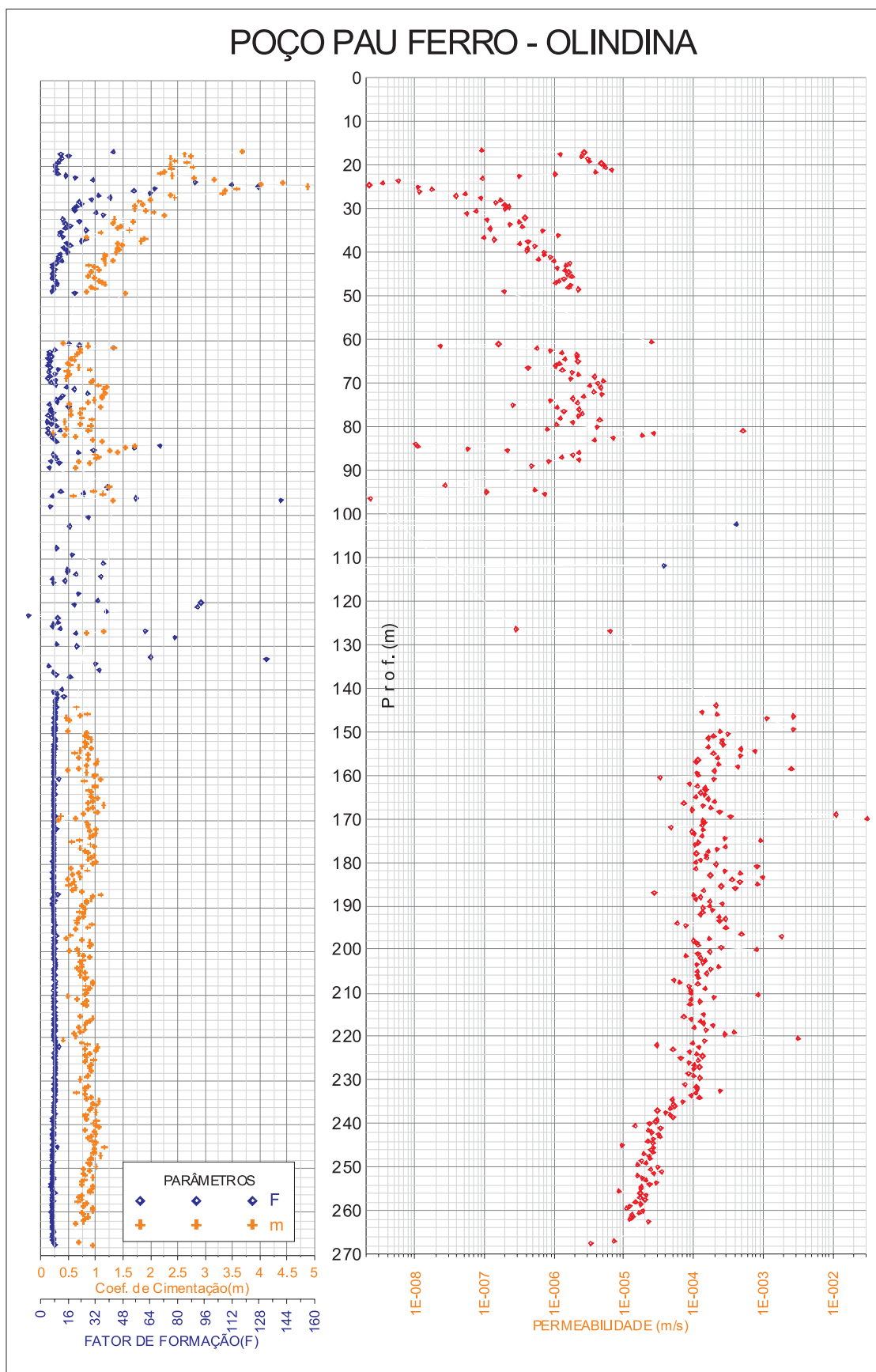


Figura 3.13: Poço Pau Ferro, Município de Olindina - perfis de m , F ; e de condutividade hidráulica.

LITO-LOGIA	SEV (Ohm.m)	PERFILAGEM (DIR) (Ohm.m)	PROFUNDIDADE
Folhelho1	6	6	15 m
Arenito 1 + Folhelho2	20,5	68	
Arenito 2	63	250	150 m

Figura 3.14: Poço Pau Ferro - Olindina locado numa altitude de 235m - Valores comparativos de resistividade interpretados na SEV versus médias da perfilagem, em Ohm.m.

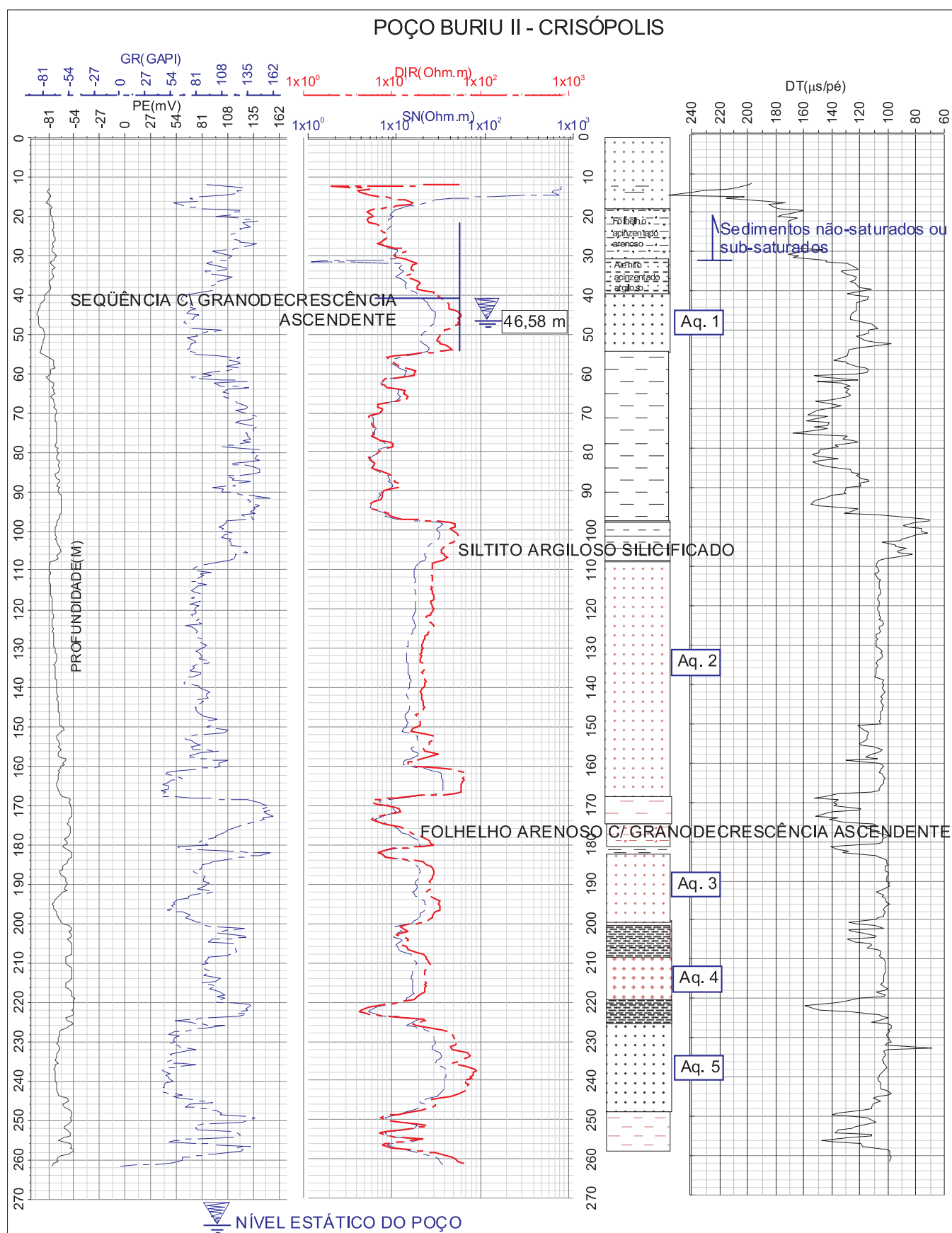


Figura 3.15: Poço Buriu II, município de Crisópolis - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 46,58 m.

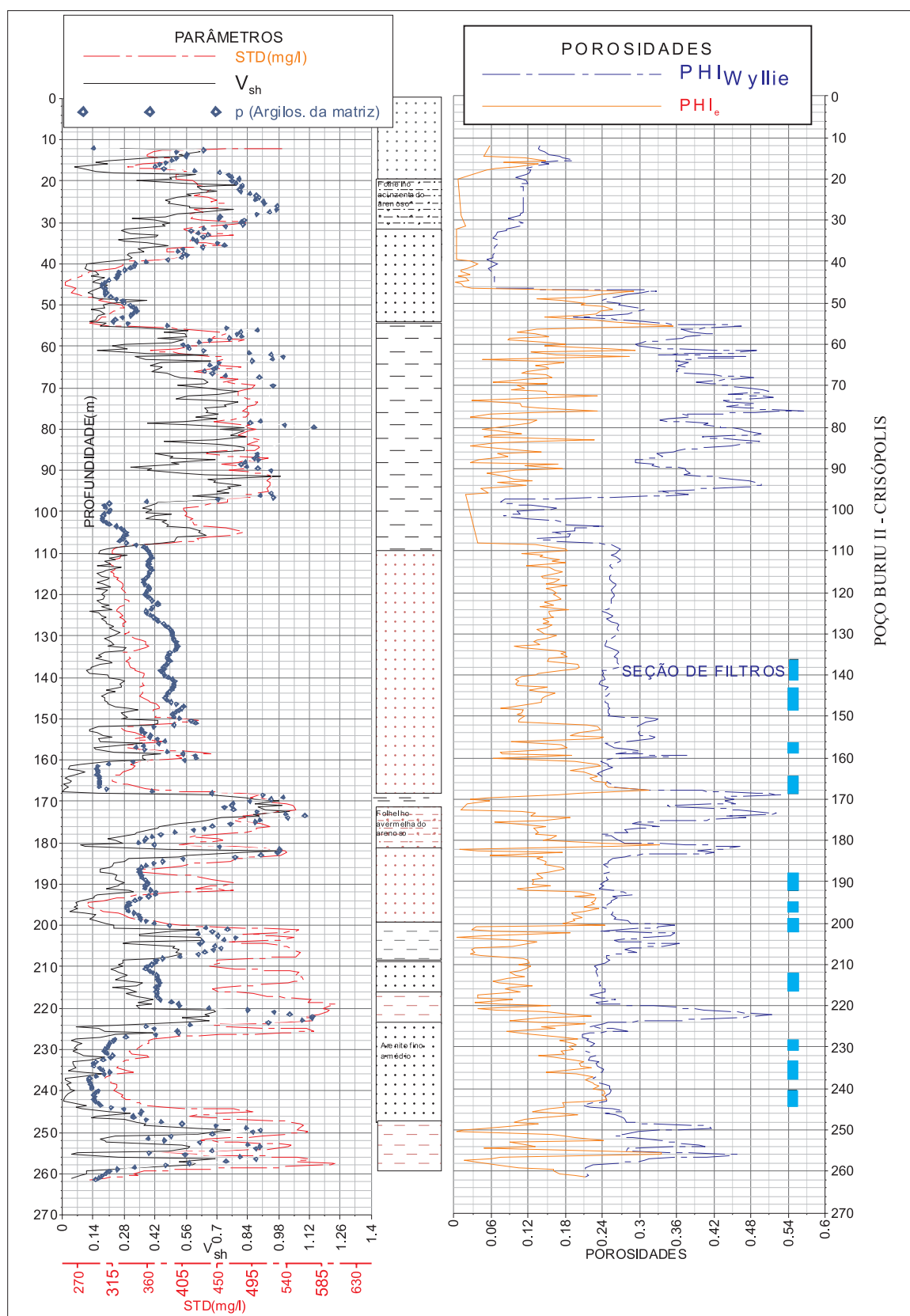


Figura 3.16: Poço Buriu II, Município de Crisópolis - perfis de: V_{sh} , argilosidade da matriz (p), STD; e porosidade.

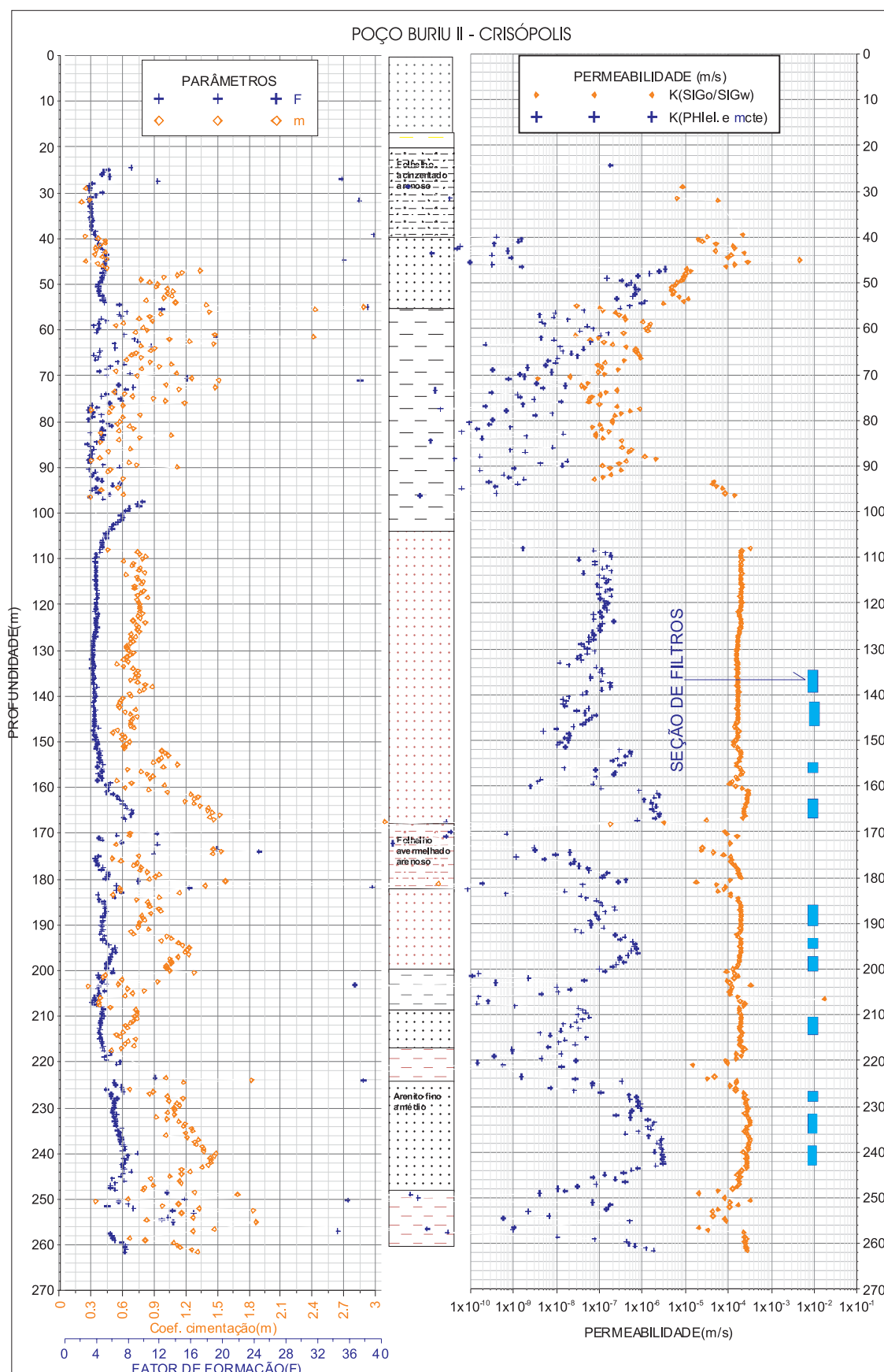


Figura 3.17: Poço BuriuII, município de Crisópolis - perfis de m , F e de condutividade hidráulica.

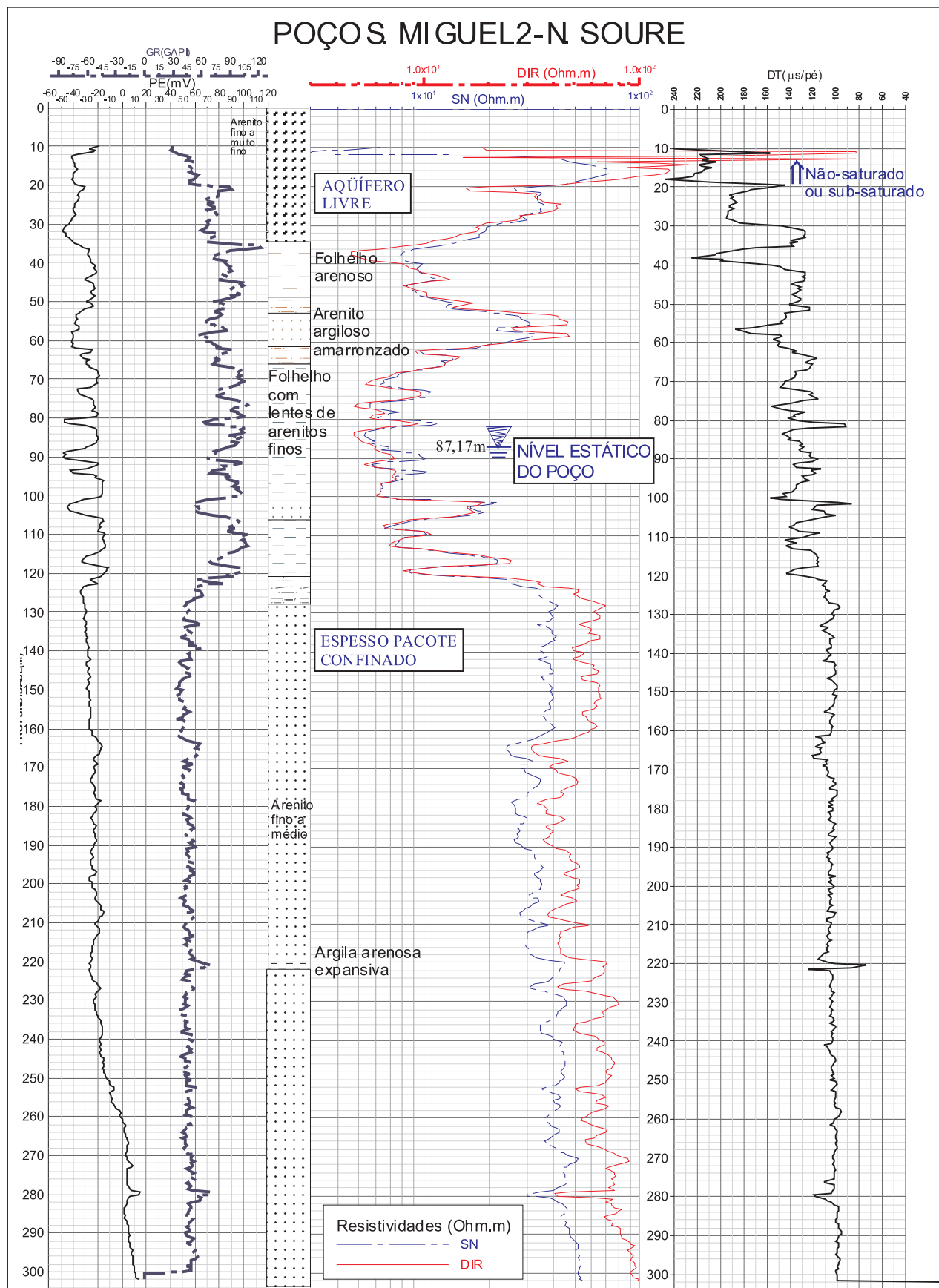


Figura 3.18: Poço São Miguel 2, município de Nova Soure - perfis de GR, elétricos (PE, SN e DIR), e sônico - NE = 87,17 m.

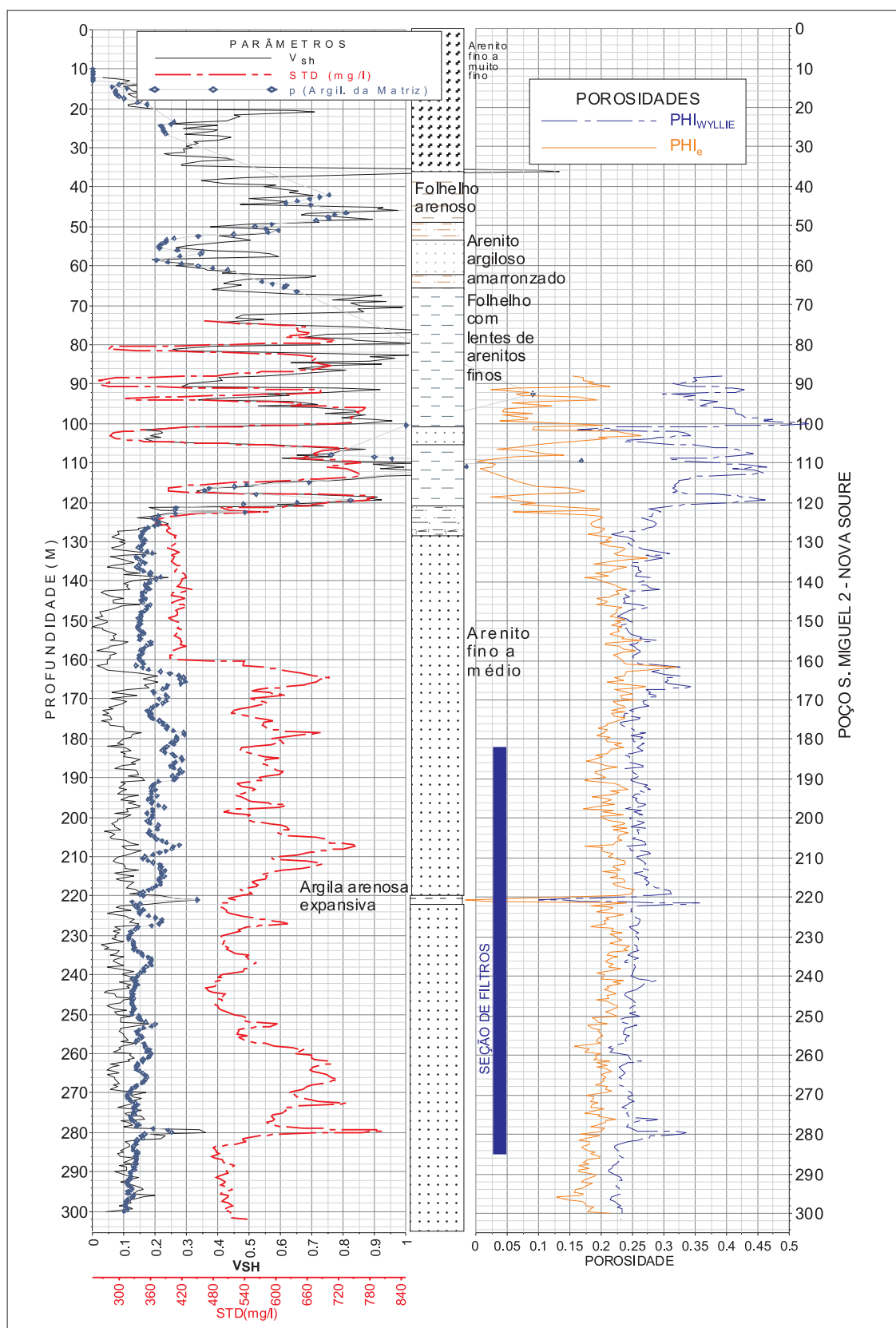


Figura 3.19: Poço São Miguel 2, Município de Nova Soure - perfis de: V_{sh} , argiloidade da matriz (p), STD; e porosidade.

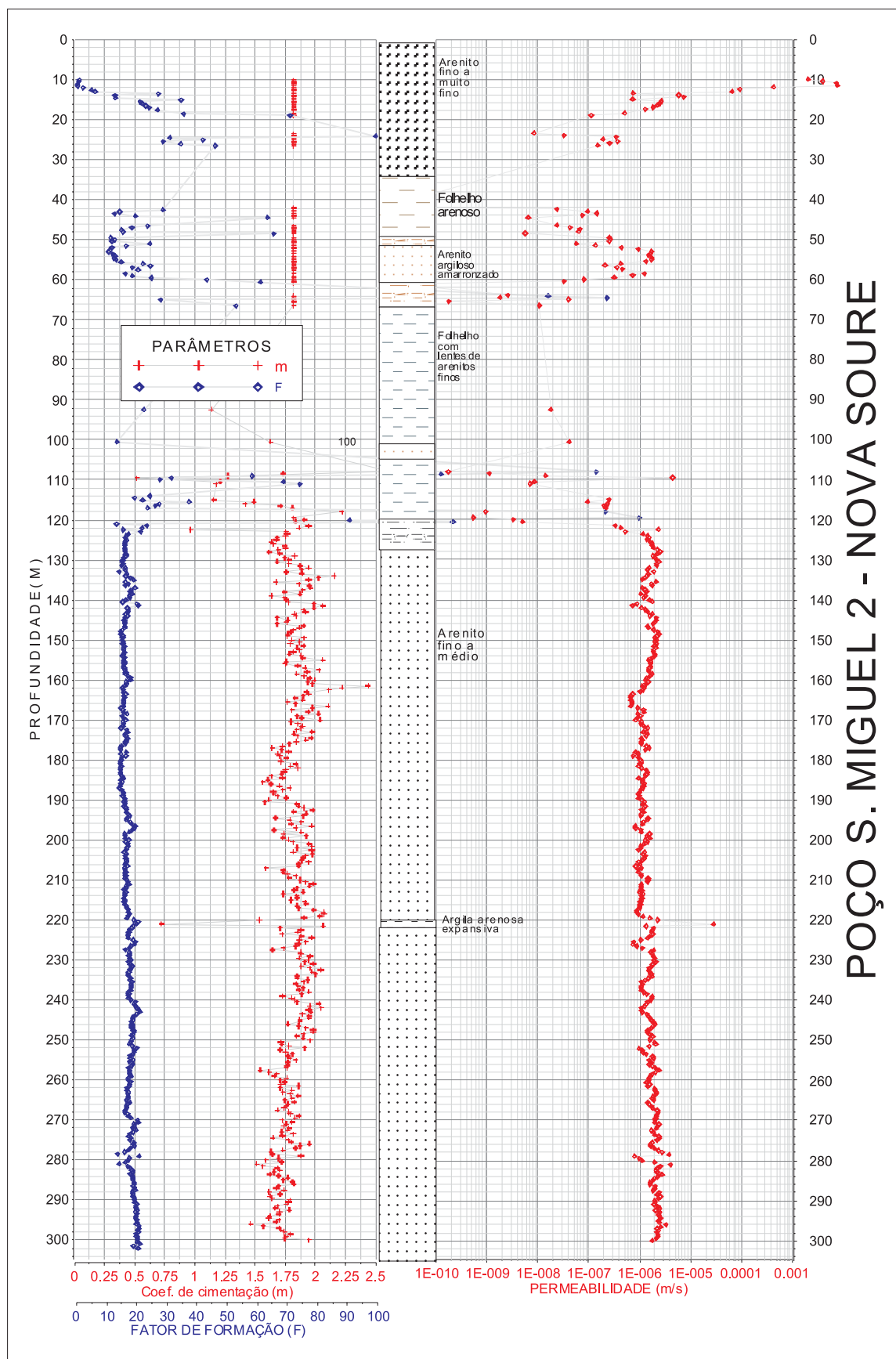


Figura 3.20: Poço São Miguel 2, município de Nova Soure - perfis de m , F e de condutividade hidráulica.

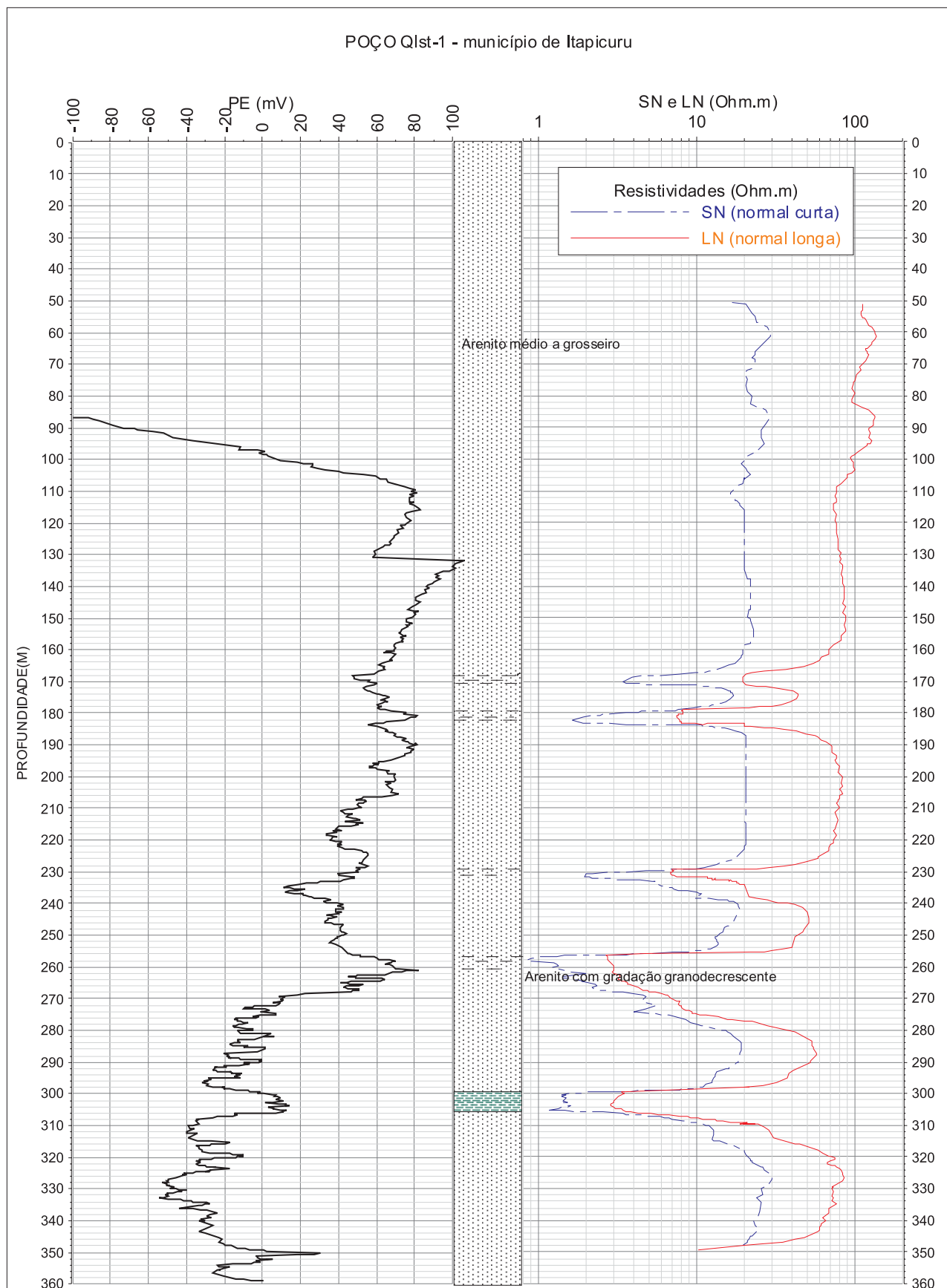


Figura 3.21: Poço Q1st-1 da PETROBRAS - perfis elétricos (PE, SN e LN).

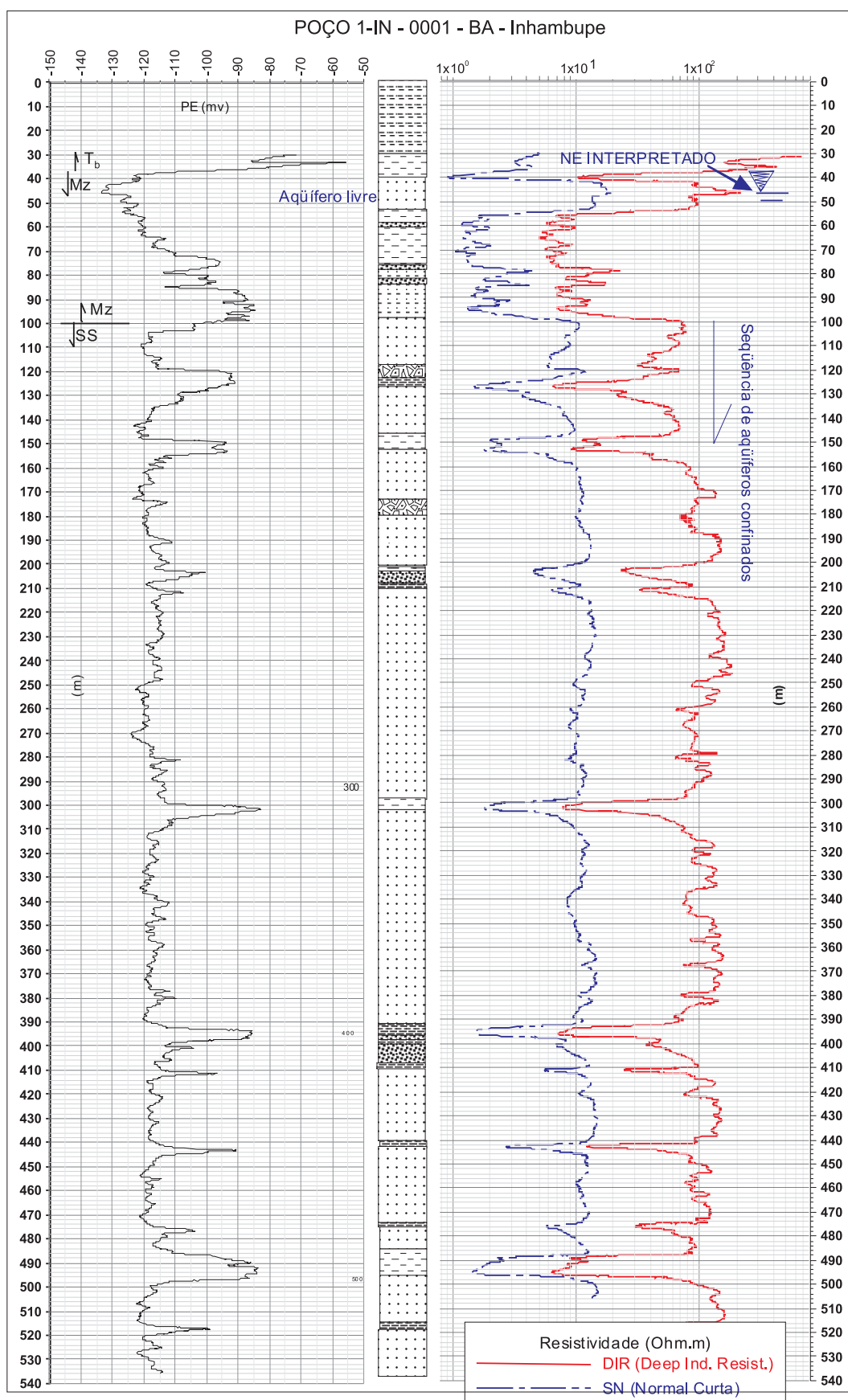


Figura 3.22: Poço 1-IN-1, da PETROBRAS - perfis elétricos (PE, SN e LN).

PERFIS GEOELÉTRICOS

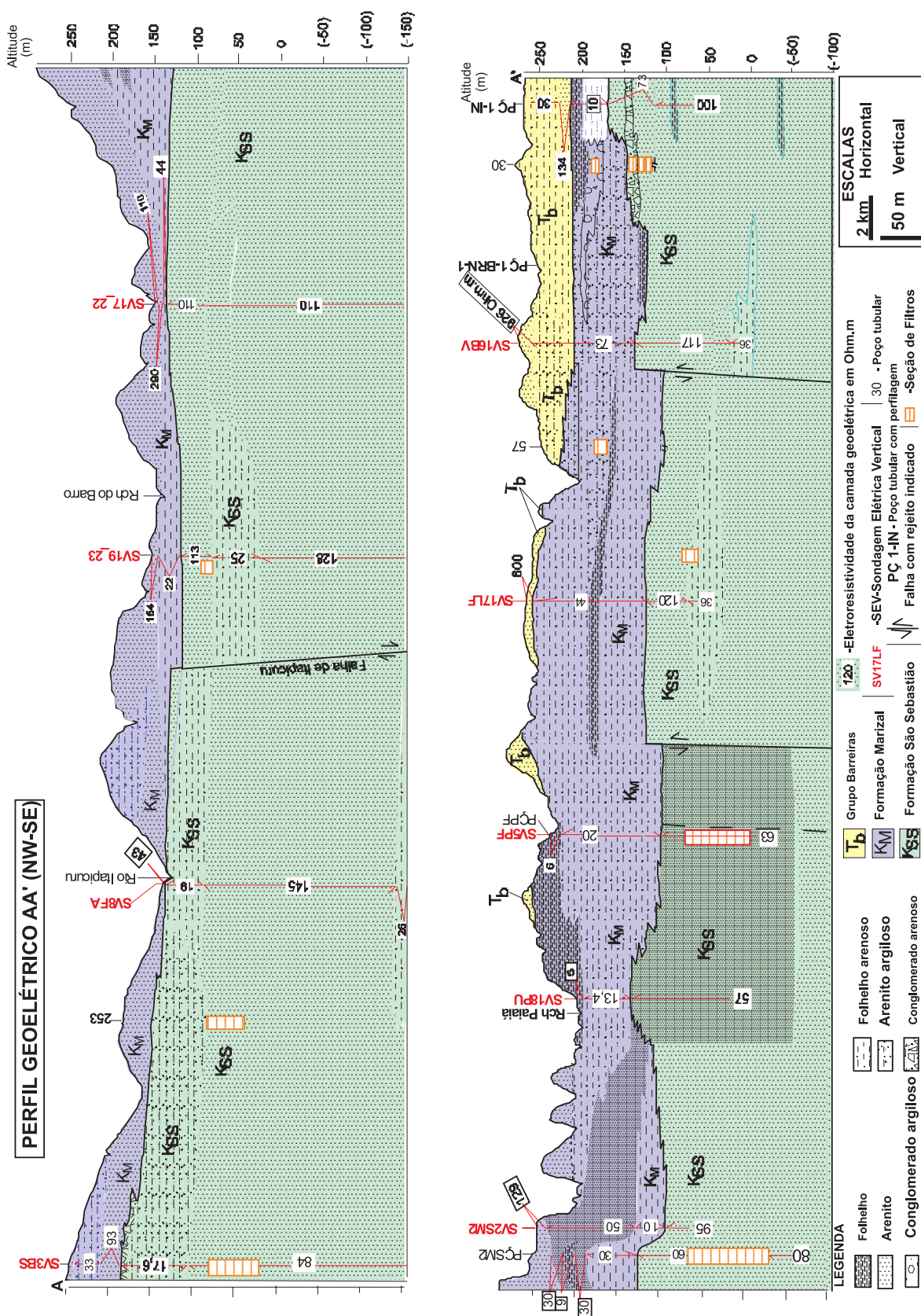


Figura 3.23: Perfil AA' (Norte - Sul).

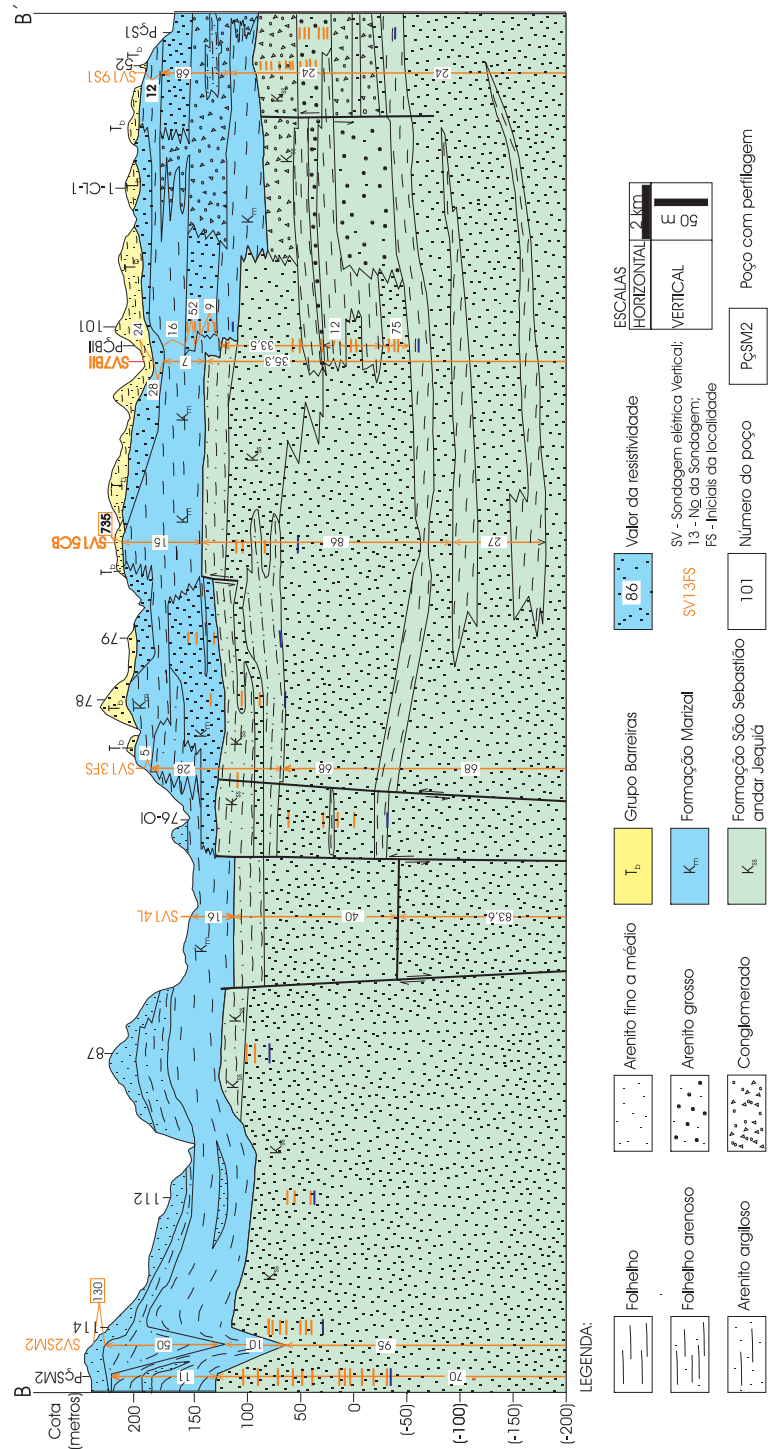


Figura 3.24: Perfil BB' (Oeste - Leste).

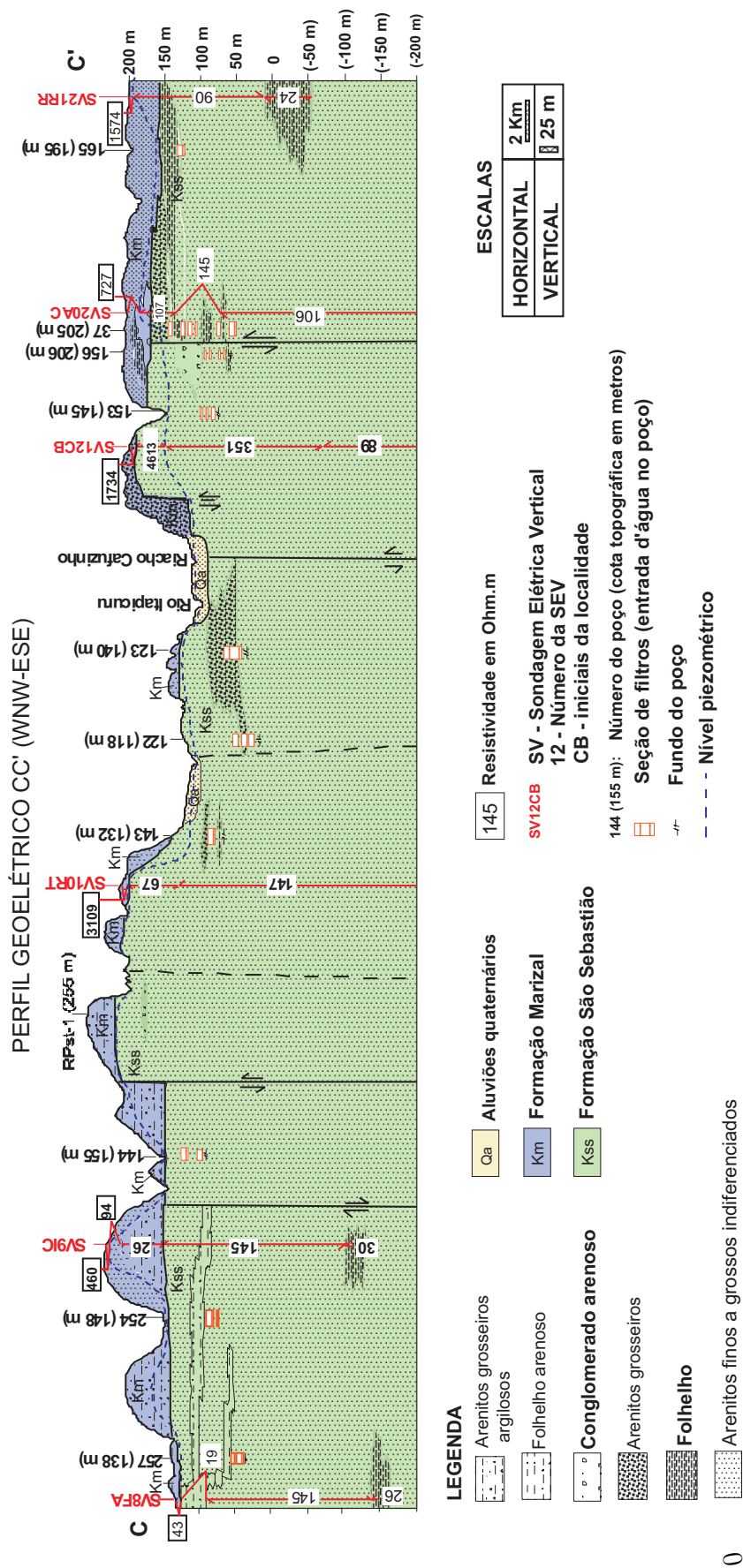


Figura 3.25: Perfil CC' (Oeste - Leste).

MAPAS DE ISORRESISTIVIDADE

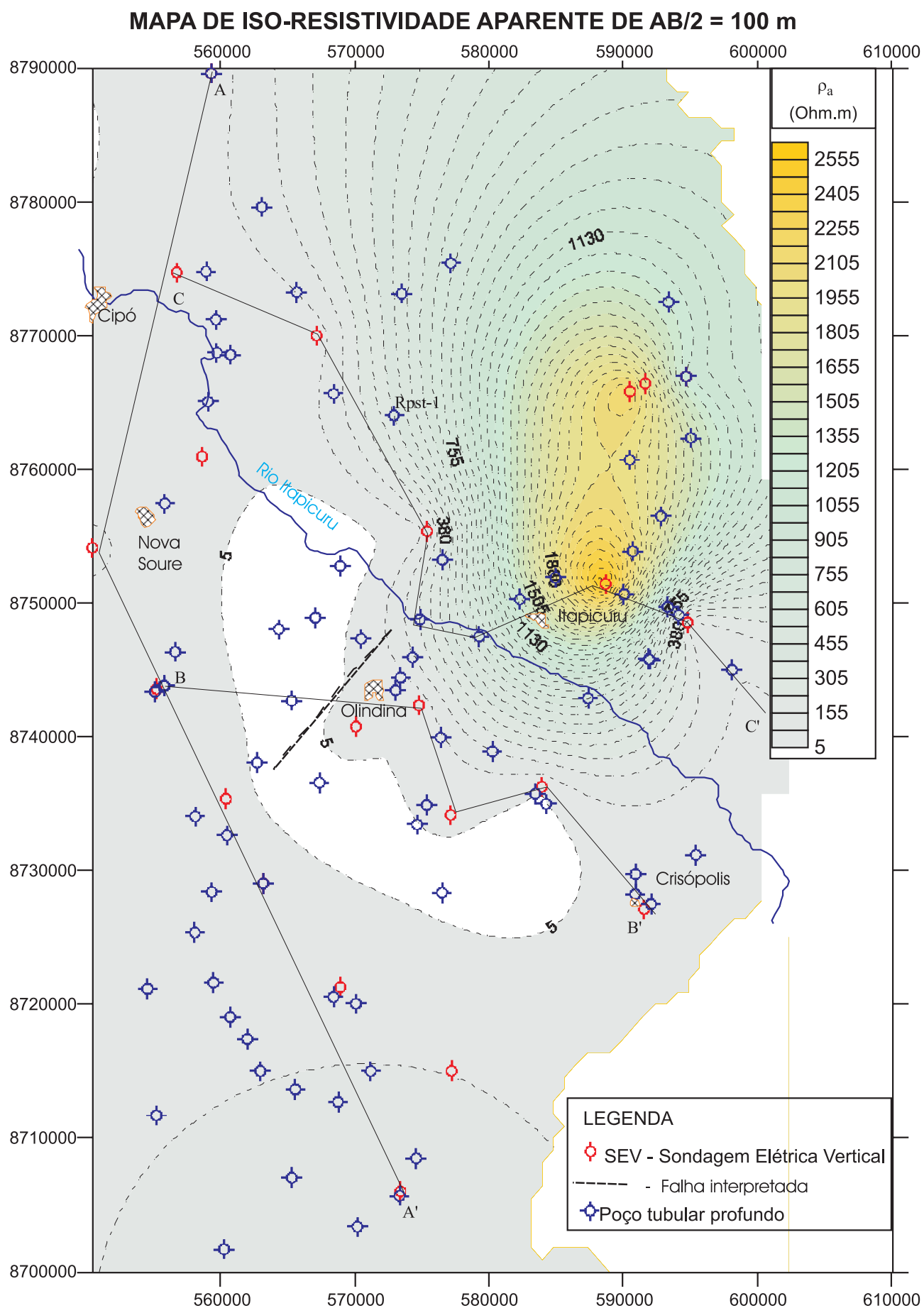


Figura 3.26: Mapa de isorresistividade aparente para $AB/2 = 100\text{m}$.

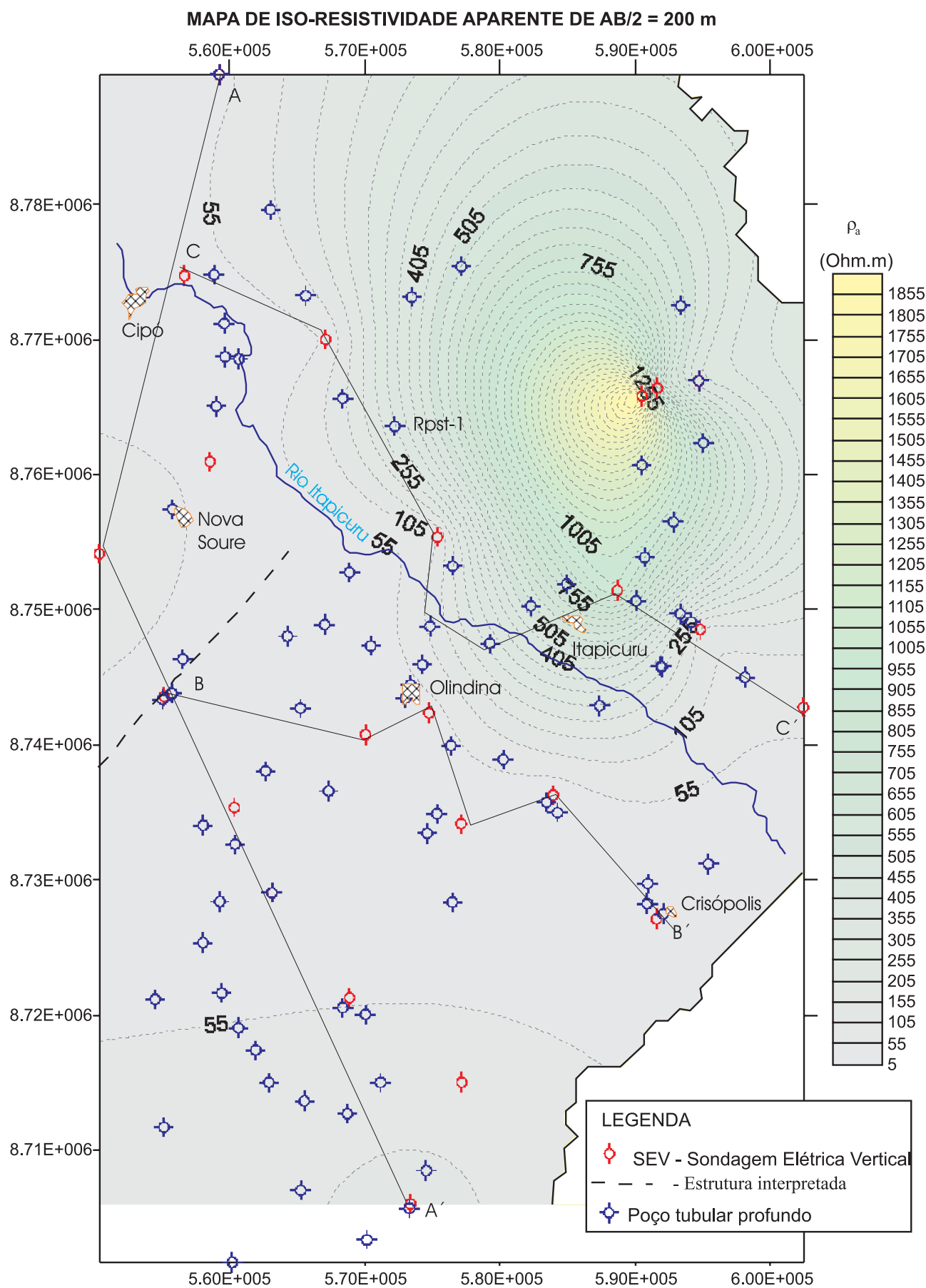


Figura 3.27: Mapa de isorresistividade aparente para $AB/2 = 200$ m.

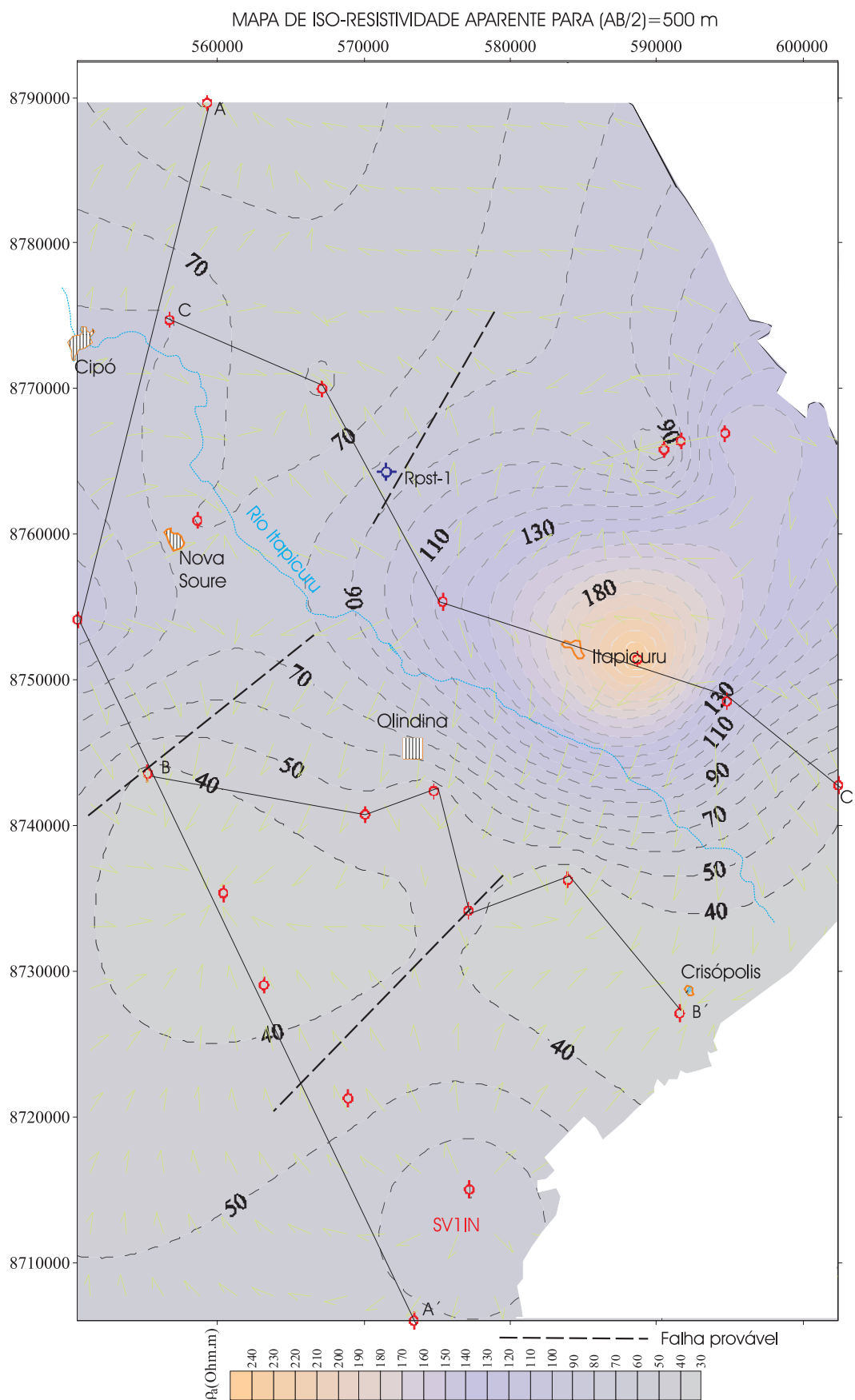


Figura 3.28: Mapa de isorresistividade aparente para $AB/2 = 500$ m.

MAPAS DE NÍVEL PIEZOMÉTRICO

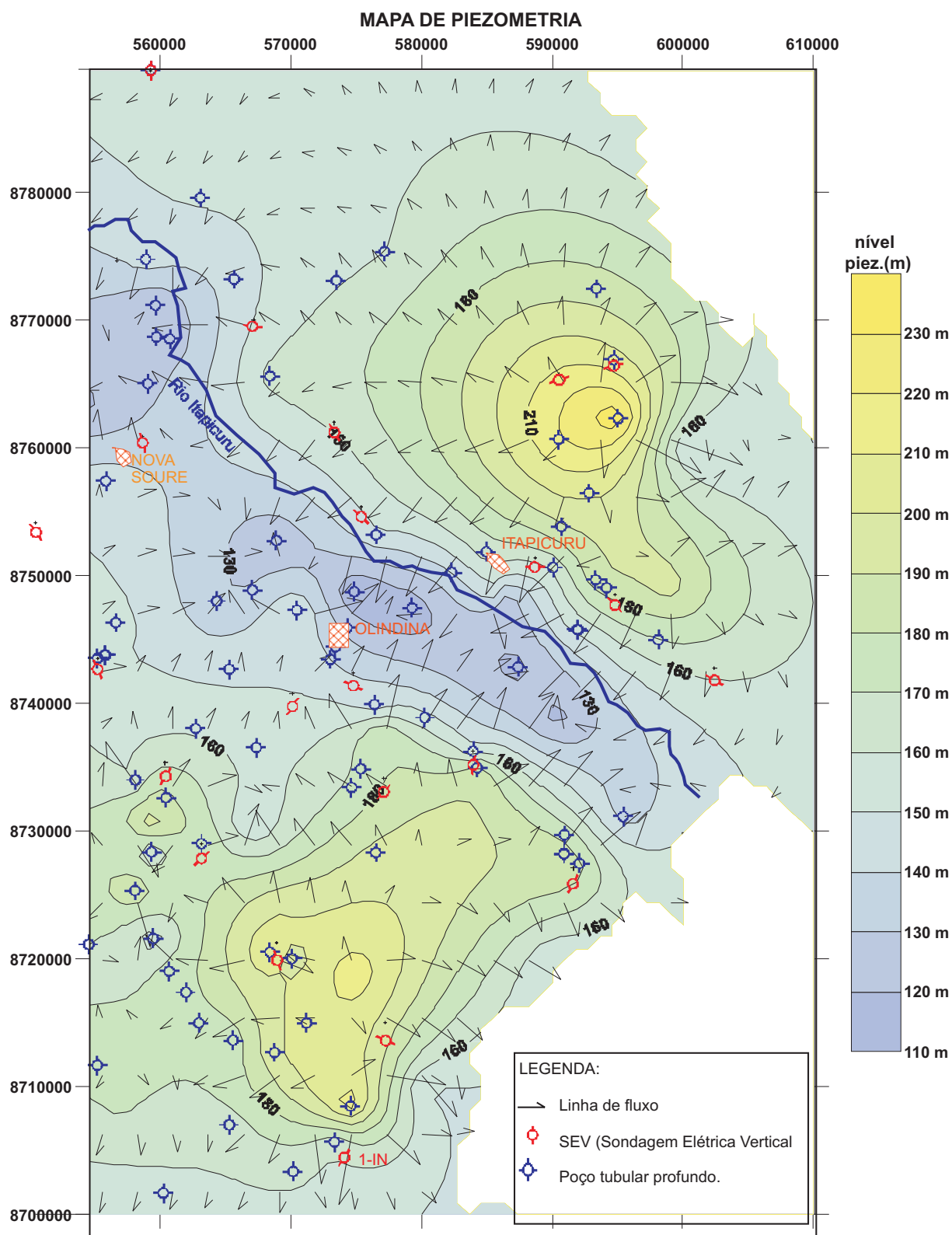


Figura 3.29: Mapa de piezometria.

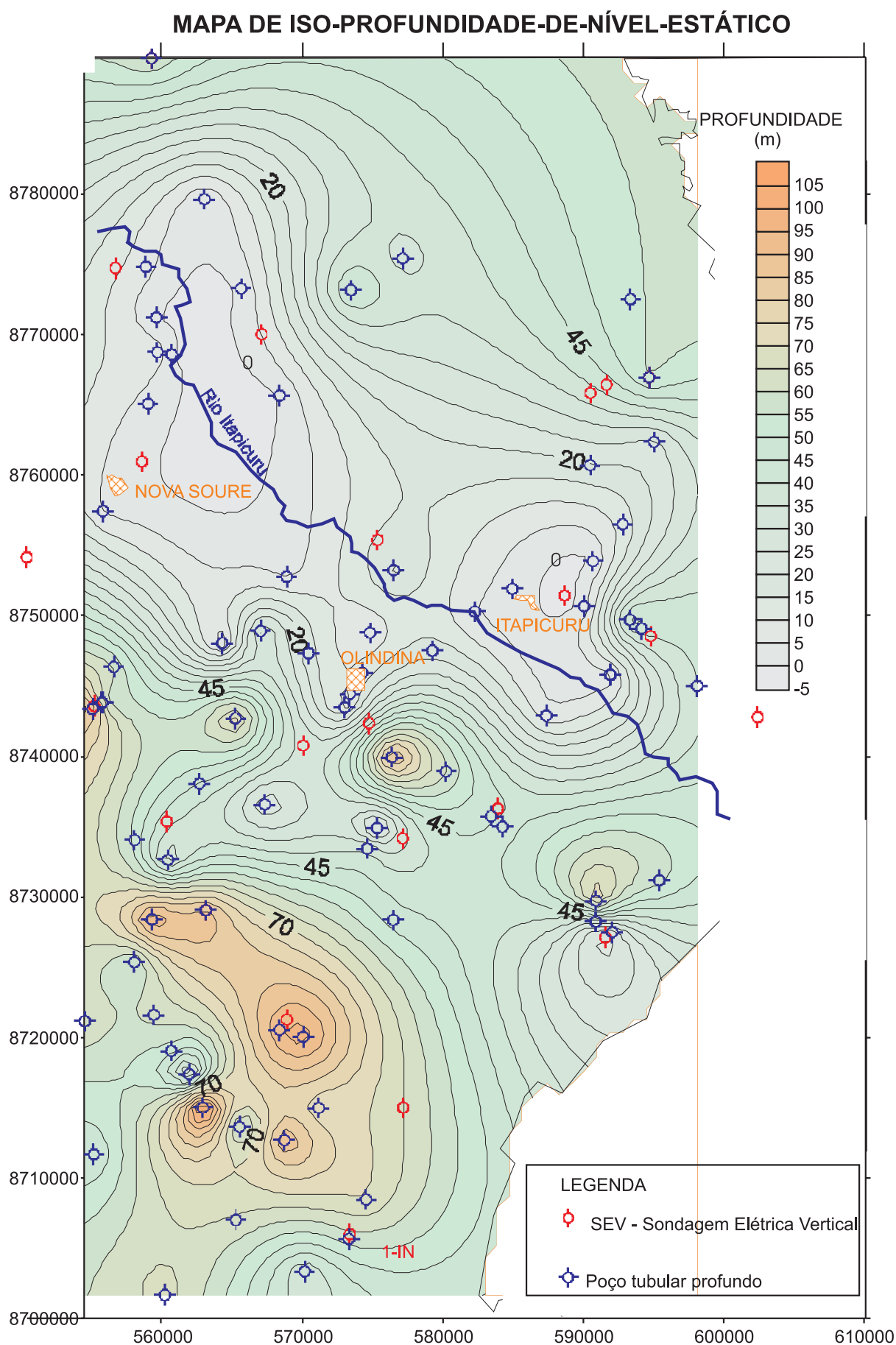


Figura 3.30: Mapa de profundidade do nível piezométrico.

MAPA DE ISOSALINIDADE TOTAL

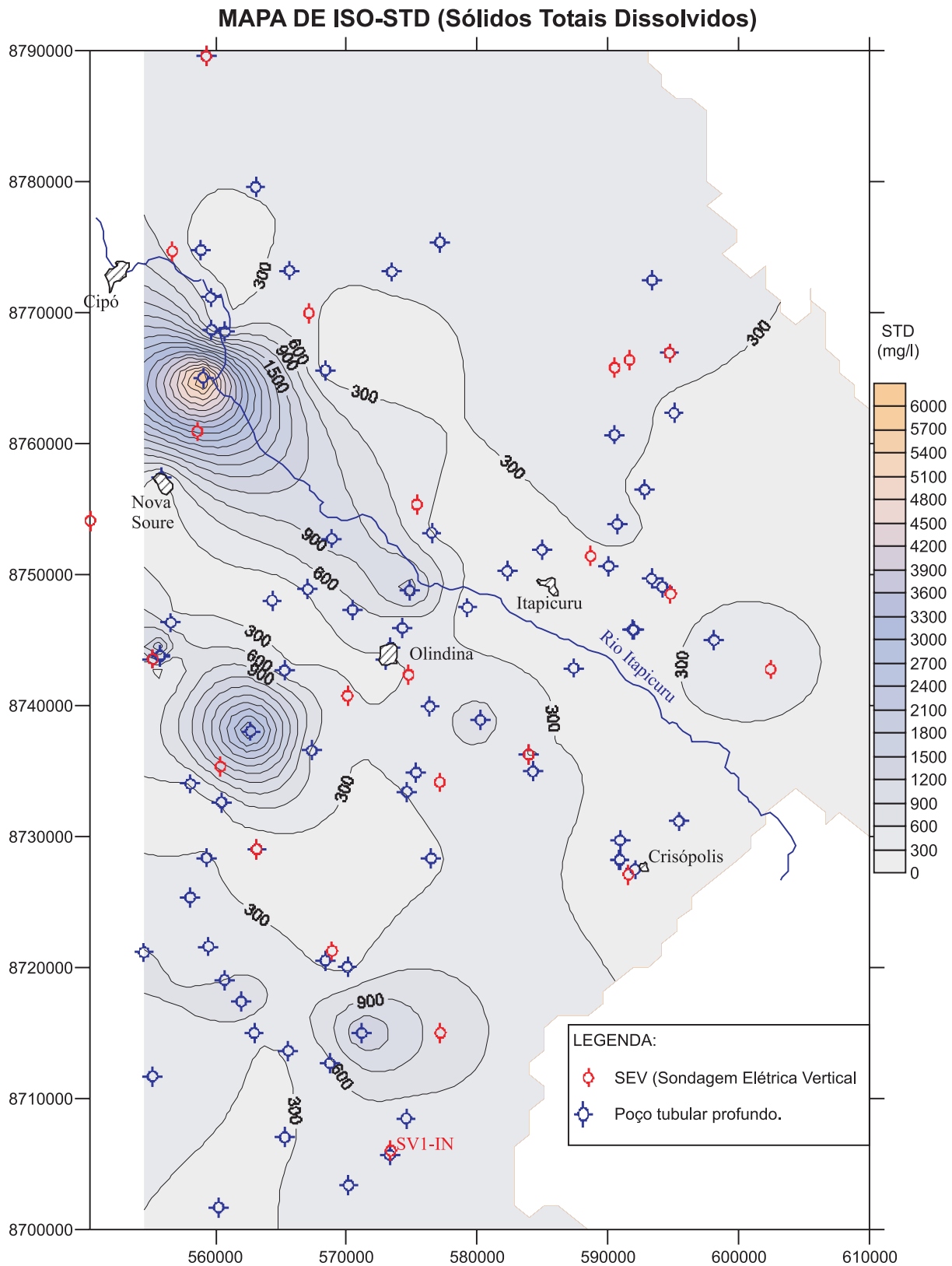


Figura 3.31: Mapa de isosalinidade total, em mg/l.

4

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso de perfilagens de poços tem se mostrado muito útil para auxiliar o estudo de estruturas das bacias sedimentares no âmbito de exploração de petróleo, no dimensionamento da geometria dos sistemas aquíferos e para reconstituir os ambientes deposicionais das formações (Lima (1993)). No presente trabalho, a perfilagem geofísica foi usada na interpretação litoestratigráfica dos sistemas aquíferos clásticos, na avaliação da qualidade da água distribuída neste sistema, bem como na aquisição de informações importantes para uma estimativa de reservas mais apurada tais como porosidades total e efetiva, argilosidade, coeficiente de cimentação e condutividade hidráulica, como fizeram Lima (1993), Lima (1995), Lima e Niwas (1999), Lima e Niwas (2000) e Bastos (1999).

O sucesso na aplicação de métodos de resistividade em superfície para mapear aquíferos em seqüências clásticas tem sido testado por Zodhy (1988), Van Overmeeren (1989) e outros.

Como ocorreu nos estudos recentemente realizados por Gomes (2003), na folha de Cipó (SC.24-Z-C-I) algumas falhas foram inferidas por sob a Formação Marizal, inferência esta resultante da interpretação conjunta de dados geofísicos e de coluna litoestratigráfica dos poços catalogados. Isso deverá contribuir para enriquecer de informações o mapeamento geológico executado pela CPRM e para melhor compreender as interações entre as várias camadas-reservatórios hídricos que ocorrem na área.

Observa-se nesta área, semelhantemente ao que foi publicado por vários autores, que existem dois sistemas aquíferos importantes: (i) o sistema aquífero livre representado por uma fração saturada da Formação Marizal, hidraulicamente conectada a arenitos do topo

do Grupo Massacará. Esta conexão é controlada e levada a termos tanto pela superposição estratigráfica quanto pela estruturação em falhamentos escalonados. Este sistema é mais abrangente e importante na área da Bacia Tucano Central; e (ii) um sistema aquífero confinado ou semi-confinado caracterizado tanto por espessos pacotes arenosos capeados por seqüências argilosas, quanto por múltiplos pacotes mais finos de arenitos e folhelhos alternados que pertencem ao Grupo Massacará, ou ao Grupo Ilhas, ou, ainda, por múltiplos pacotes de arenitos grosseiros e conglomeráticos e folhelhos alternados da Formação Salvador, na parte próxima à margem da borda leste da Bacia de Tucano. O segundo sistema ficou mais em evidência e restrito à área da Bacia Tucano Sul.

A produtividade desses dois sistemas aquíferos é basicamente controlada pela razão folhelho/arenito no intervalo de interesse para exploração e pela proporção de argilas nos arenitos deste intervalo. Essas características podem ser efetivamente estimadas, com relativo grau de precisão, pelos resultados de sondagens elétricas profundas combinadas ao estudo das perfilagens geofísicas de poços existentes na área. Quanto menor o valor da resistividade média determinada para um intervalo aquífero rastreado, maiores as chances de poços produtivos, resguardados os efeitos causados pela variação na resistividade do eletrólito saturante. Contudo, esses dois processos ocorrem, geralmente, de forma combinada, ou seja, intervalos com mais intercalações de folhelhos e arenitos mais argilosos, armazenam águas mais salinizadas por conta da filtração de membrana e das reações de intertroca catiônica fluido/matriz (Lima e Sharma, 1992).

Dessa forma, este mesmo critério pode ser usado para evitar poços em zonas com elevados teores de sais dissolvidos que podem ocorrer em sistemas de falhamentos em blocos escalonados, como é a área em questão. Uma dificuldade, que também foi relatada por Gomes (2003), refere-se à presença de uma espessa camada não saturada, provavelmente formada só de areia solta, a qual capeia boa extensão da área a norte do rio Itapicuru, e mascara a resposta de eletrorresistividade de horizontes mais profundos. A sugestão para contornar esta dificuldade seria utilizar eletrodos enterrados o mais profundo possível operacionalmente, de preferência, até onde o solo torna-se bem úmido.

A tabela II.1 mostra dados de coordenadas x, y e z dos pontos de SEV's e poços perfilados, nos quais x e y são coordenadas UTM medidas com GPS Magellan, com erro máximo de 10 m, enquanto z foi estimada por interpolação nos mapas topográficos em escala 1:100.000 da PETROBRAS. Estas informações são importantes para uso em cálculos de reserva ou para discretização em modelagem matemática.

O mapa de nível piezométrico 3.29 mostra que o fluxo subterrâneo segue mais ou menos o mesmo padrão de fluxo superficial, e a conclusão a que se chega é que, em termos gerais, o rio é

influyente com exceção de dois pontos de artesianismo mostrados no mapa 3.30, nos quais não há condições de confinamento, ou seja, nestes pontos o aquífero apresenta exultórios e este comportamento alternado do rio (influyente/effluente), se bem dimensionado, deverá explicar o comportamento anômalo das estações de medição de escoamento superficial citado no item 1.3.

O mapa de sólidos totais dissolvidos (STD) da figura 3.31 mostrou dois picos de anomalia. Segundo Lima (1993), são causados por mistura com águas provenientes de regiões mais profundas da bacia que se misturam com outras provenientes de vários níveis, via falhas e fraturas onde estas formam zonas permeáveis. Essas descontinuidades têm, naqueles setores, direção N45°E (na Bacia Tucano Sul, estas são mais freqüentes do que as de direção N50°W, principalmente no setor das anomalias de STD). No entanto, em termos gerais, o mapa de sólidos totais dissolvidos mostrou que a maior parte da área deve produzir água com salinidade abaixo dos 500 mg/l, principalmente na área da sub-bacia Tucano Central.

Em termos de recomendações podemos citar como algo importante um adensamento de informações com SEV's, incluindo-se algumas com dispositivo para interpretação em 2-D de resistividade e potencial espontâneo, formando perfis mais detalhados atravessando as estruturas em blocos escalonados para melhor compreensão da geometria e comportamento hidráulico das falhas e fraturas da área, em especial nas proximidades do poço 1-IN e São Miguel 2 (SEV's SV1IN e SV2SM2) e transversalmente ao rio Itapicuru, na altura da cidade homônima, para melhor compreensão da falha também homônima.

Pode ser incluído também como recomendação, um levantamento mais detalhado de qualidade das águas subterrâneas incluindo campanha de coleta para análise físico-química mais completa, pois, em toda esta área, só foram encontrados dois poços com análise completa em termos de hidroquímica. Apesar da maior parte dos poços que captam o aquífero São Sebastião terem salinidade acima de 500 ppm (qualidade não recomendada, para consumo humano, pelas legislações canadense e americana), estas águas parecem, em maior parte, ter baixa razão de adsorção de sódio e serem boas para irrigação ou mesmo consumo humano.

Nota-se uma grande diferença de vulnerabilidade à contaminação do aquífero São Sebastião na parte norte do Rio Itapicuru por conta da característica de aquífero livre, daí a recomendação de maiores cuidados quanto aos depósitos de lixo e esgotos nesta área.

Agradecimentos

Agradeço a minha esposa, Nena, pela paciência e dedicação, a meus pais, pelo apoio financeiro e fraterno incondicionais e concedidos até algum tempo após a graduação, aos colegas Cristiam dos Santos, Vicente Amorim Junior, Najara Sapucaia, Ricardo e Paulo Gomes e outros pela troca de informações para utilização dos diversos “softwares” de cálculos e apresentação de resultados das interpretações.

À CPRM e ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica por terem viabilizado a realização deste trabalho.

Agradeço também, aos funcionários da UFBA, em especial aos professores Olivar A. Lima de Lima e Geraldo Girão Nery pelas orientações, a Joaquim Bonfim Lago pela ajuda na editoração e a Luiz Medeiros dos Santos, pelos trabalhos e informações passadas na aquisição de dados de campo.

Finalmente, agradeço a Deus pelos momentos de inspiração.

Referências Bibliográficas

- Aguiar, G. A. e Mato, L. F. (1990) Definição e relações estratigráficas da Formação Affligidos nas Bacias do Recôncavo, Tucano Sul e Camamu, Bahia, Brasil., In: SBG, ed., *Anais*, vol. 1, pp. 157–170, Natal, RN, 36º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG.
- Alger, R. P. (1966) Interpretation of electrical logs on fresh water wells in unconsolidated formations, In: S. P. W. L. Analysts, ed., *17th Ann. Logging Symp.*, pp. 246–270, New York, Soc. Prof. Well Log Analysts, Soc. Prof. Well Log Analysts.
- Almeida, F. F. M. (1977) O Cráton do São Francisco, *Revista Brasileira de Geociências*.
- Archie, G. E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. Inst. Min. Eng.*, (146):54–62.
- Asquith, G. e Gibson, C. (1982) *Basic Well Log Analysis for Geologists*, Association of Petroleum Geologists, Tulsa - Oklahoma.
- Bastos, F. R. (1999) Caracterização petrofísica e hidrológica de aquíferos areno-argilosos usando perfilagem elétrica de poços, Monografia, UFBA, Salvador.
- Bear, J. (1972) *Dynamics of fluids in porous media*, Environmental science series, American Elsevier, New York.
- Bigarella, J. J. (1975) The Barreiras Group em Northeast Brazil., *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, (47):365–393.
- Brace, W. F. (1977) Permeability from resistivity and pore shape, *Journal of Geophysics*, (82):3343–3349.
- Bueno, G. V. (1987) Considerações sobre a sedimentação e origem do paleocanyon de Taquipe, bacia do Recôncavo (Brasil)., Dissert. de Mestrado, UFOP, Ouro Preto.
- Caixeta, J. M.; Bueno, G. V.; Magnavita, L. P. e Feijó, F. J. B. (1994) Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, In: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A Miguez de Mello, da PETROBRAS, ed., *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, vol. 8, pp. 163–172, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A Miguez de Mello, da PETROBRAS, Rio de Janeiro.

- Carvalho, J. S. e Costa, I. V. G. (1996) Levantamento hidrogeológico do município de Tucano: estado da Bahia, nº 1 In Série Hidrogeologia, Estudos e Projetos, Programa de Águas Subterrâneas para a Região Nordeste., Brasília.
- Clennell, B. (1997) Tortuosity: a guide through the maze, In: M. A. Lovell e P. K. Harvey, eds., *Developments in Petrophysics*, vol. 122, Geological Society Special Publication.
- Croft, M. G. (1971) A method of calculating permeability from electric logs, In: *U. S. Prof. Paper*, vol. 750, pp. 265–269.
- Gomes, P. J. P. (2003) Prospecção de água subterrânea na Bacia de Tucano Sul utilizando métodos elétricos, Dissert. de Mestrado, UFBA, Salvador.
- Gondouin, M.; Tixier, M. P. e Semard, G. L. (1957) An experimental study of the influence of the chemical composition of electrolytes on the SP curves, *Pet. Tec.*, (9):58–69.
- Guimarães, J. T. (2002) Projeto Bacia do Tucano Sul: Estado da Bahia, Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB, CPRM, Salvador.
- Keller, G. V. (1988) Rock and mineral properties, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Theory*, vol. 1, Society of Exploration Geophysicists.
- Keller, G. V. e Frieschnecht, F. C. (1966) *Electrical methods in geophysical prospecting*, Colorado, 1ª edic..
- Kelly, W. E. (1977) Geoelectric sounding for estimating hydraulic conductivity, In: *Ground Water*, vol. 15, pp. 420–425.
- Kunetz, G. (1966) Principles of direct resistivity prospecting, In: H. B. e R. van Nostrand, ed., *Geopublication Associates, Gebrüder Borntraeger - Berlim - Nikolassee*, 1ª edic..
- Lima, O. A. L. (1993) Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the Recôncavo-Tucano Basin, Bahia–Brazil, *Geophysics*, **58**(11):1689–1702, 18 FIGS.
- Lima, O. A. L. (1995) Water saturation and permeability from resistivity, dielectric, and porosity logs, *Geophysics*, **60**(06):1756–1764.
- Lima, O. A. L. e Nery, G. G. (1999) Determinação das resistividades verdadeiras de águas subterrâneas usando perfilagens de potencial espontâneo, In: SBGF, ed., *6th Int. Cong. of the Brazilian Geophy. Soc.*, Rio de Janeiro, SBGF, SBGF.
- Lima, O. A. L. e Niwas, S. (1999) Quantitative estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements, Submetido ao Journal of Hidrology.
- Lima, O. A. L. e Niwas, S. (2000) Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstones aquifers from geoelectrical measurements, *Journal of Hidrolog.*, (235):12–26.

- Lima, O. A. L. e Sharma, M. M. (1990) A grain conductivity approach to shaly sandstones, *Journal of Geophysics*, (55):1347–1356.
- Lima, O. A. L. e Sharma, M. M. (1992) A generalized Maxwell-Wagner theory of membrane polarization in shaly sands, *Journal of Geophysics*, (57):789–799.
- Magnavita, L. P. (1992) Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, NE Brazil, Tese de Doutorado, Wolfson College, University of Oxford, Oxford.
- Marinho, J. M. L. (1997) Inversões de sondagens de eletroresistividade com aplicação ao estudo de aquíferos clásticos na região de Acaraú - Itarema, Ceará, Tese de Doutorado, UFBA, Salvador.
- Milani, E. J. (1987) Aspectos da evolução tectônica das bacias do Recôncavo e Tucano Sul: folhas Cipó e Olindina, PETROBRAS, Rio de Janeiro.
- Muricy, F. A. F. (2001) Projeto síntese da geologia da bacia de Tucano Sul: estado da Bahia, Geologia Regional, Convênio de Cooperação e Apoio Técnico Científico CBPM – CPRM, Salvador.
- Nery, G. G. (1989) Perfilagem geofísica de poços, PETROBRAS-CENNOR, Salvador, petrobras-cennor edic., 230 p.
- Netto, A. S. T.; Braga, J. A. E. e Bruhn, C. H. L. (1984) Prospectos estratigráficos do Recôncavo: arcabouço estrutural, análise estratigráfica e potencialidade exploratória dos andares Rio da Serra e Aratu., Rel. Int. da PETROBRAS, Salvador.
- Neves, B. B. B.; Anjos, N. e Maior, J. (1968) Mapa hidrogeológico do nordeste, material cartográfico 25, Recife, Escala 1:500.000.
- Orellana, E. e Mooney, H. M. (1966) Tablas y curvas patrón para sondeos eléctricos verticales sobre terrenos estratificados, Interciencia, Madrid.
- Parasnis, D. S. (1997) Principles of applied geophysics, Chapman and Hall, 5^a edic..
- Picarelli, A. T. e Caixeta, J. M. (1991) Análise bioestratigráfica e paleogeográfica do Andar Aratu na Bacia do Recôncavo., Rel. Int. da PETROBRAS, Rio de Janeiro.
- Pontes, A. R. e Ribeiro, C. L. (1964) Detalhe geológico do Recôncavo Central (Mata-Salvador, Candeias-Santo Amaro)., Relatório Interno da PETROBRAS n. 108-2134, Salvador.
- RADAMBRASIL, M. M. E. (1983) geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra, vol. Folhas SC24/25 Aracaju/Recife, Divisão de publicação do Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro.

- Regali, M. S. P. (1966) Zoneamento palinológico e paleoclima da bacia do Recôncavo e Tucano., In: SBG, ed., *Congr. Bras. de Geol. - Anais*, vol. 20, pp. 92–93, Rio de Janeiro, SBG, SBG.
- Silva, O. B. (1978) Estudo do membro Água Grande da formação Itaparica., Rel. interno da PETROBRAS, Salvador.
- Van Overmeeren, R. A. (1989) Aquifer boundaries explored by geoelectrical measurements in coastal plain of Yemen: A case of equivalence, *Geophysics*, (54):38–48.
- Viana, C. F.; Gama Jr., E. G.; Simões, . A.; Moura, J. A.; Fonseca, J. R. e Alves, R. J. (1971) Revisão estratigráfica da Bacia do Recôncavo-Tucano, *Boletim Técnico da PETROBRAS*, 14(3/4):157–192.
- Walsh, J. B. e Brace, W. F. (1984) The effect of pressure on porosity and the transport properties of rocks, *Geophysics*, 89:9425–9431.
- Ward, S. H. (1990) Resistivity and induced polarization methods, In: S. H. Ward, ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. II, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa-Oklahoma, 2^a edic..
- Wyllie, A. A.; Gregory, A. R. e Gardner, L. W. (1956) Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Journal of Geophysics*, (21):41–70.
- Zodhy, A. A. (1988) Groundwater exploration with Schlumberger soundings near Jean, Nevada, Open-file report, (66):88–291.

SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS

ALTITUDE: 268 m
 SV1IN - Inhambupe - coord.: 573348; 8706016

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1.5	291.7	50	107.9
2	285.5	50	105.3
3	275.7	60	118
4	275.4	80	144.5
5	246.8	100	156.8
6	224.4	150	147.6
8	182.5	200	113.7
10	144.9	200	122.5
15	87.1	250	81.8
15	102.5	250	87.8
20	63.2	300	67
20	71.9	400	60.2
25	59.6	500	58.6
25	67.1	500	54
30	72.9	600	55.7
40	90.9	600	52
40	88.1	800	51.6
		1000	61.5

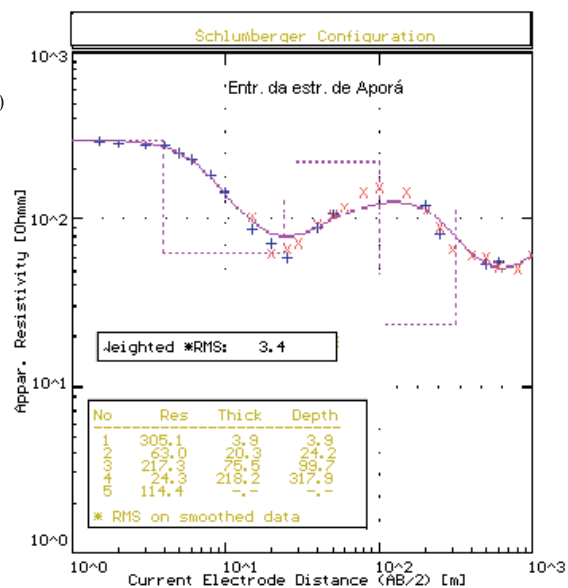


Figura I.1: SEV SV1IN, a 100 m do poço 1IN, da PETROBRAS. Esta SEV está sob influência de variações laterais.

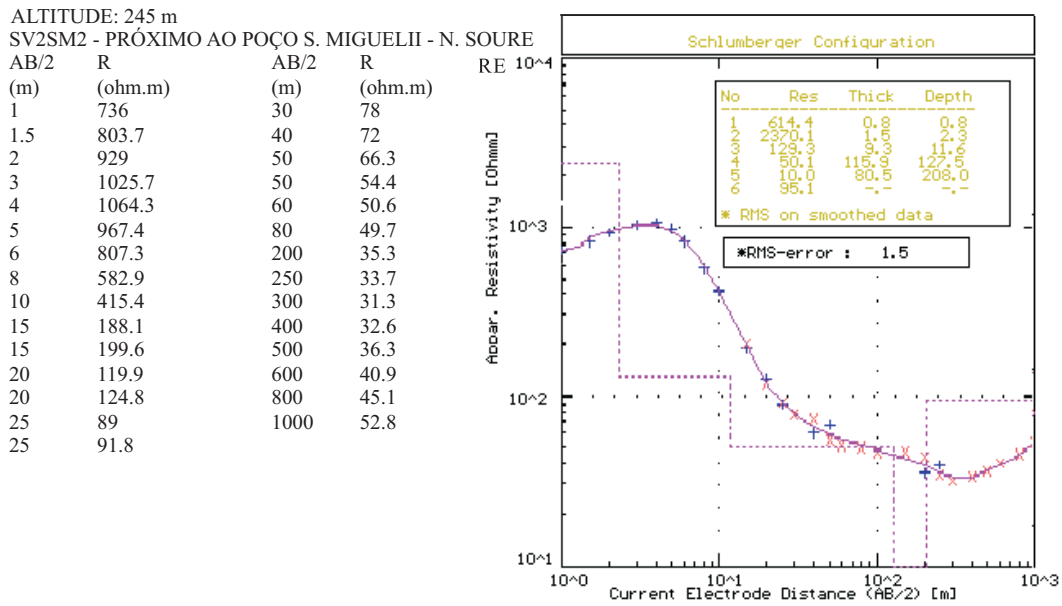


Figura I.2: SEV SV2SM2, a 1000 m do poço São Miguel2, da CERB.

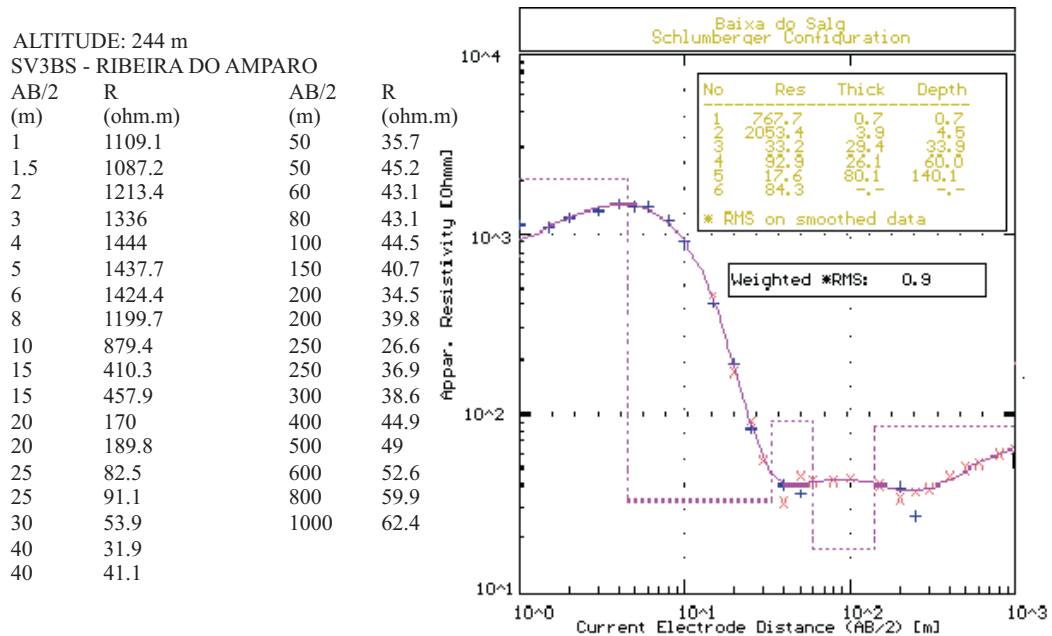


Figura I.3: SEV SV3BS, a 100 m do poço Baixa do Salgado, da CERB.

SV4MC - Itapicuru - ALTITUDE 260 m

AB/2 (M)	R (ohm.m)	AB/2 (M)	R (ohm.m)
1	606.7	50	1959.9
1.5	785.5	50	1856.4
2	881.2	60	1624.1
3	810.2	60	1760
4	865.9	80	1667.2
5	953.2	80	1480
6	989.4	100	1192.1
8	1191.9	100	1020
10	1358.2	150	427.8
15	1591	200	478.8
15	1587.4	200	413.3
20	1782.2	250	426.5
20	1777.1	300	410.7
25	1951	400	411.5
25	1950.6	500	425.1
30	2110.9	600	392.2
30	2000	800	416.2
40	1893.5		
40	1766.4		

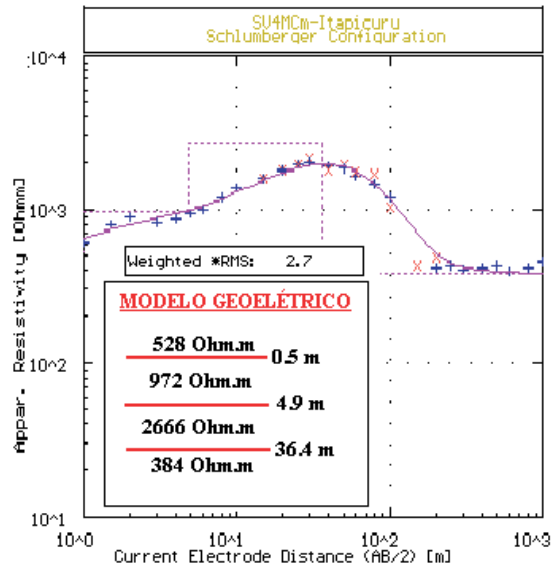


Figura I.4: SEV SV4MC, a 1000 m do poço Murici/Caldeirão da CERB.

SV5 - Pau Ferro, Olindina, ALTITUDE: 235 m

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1	104.3	50	12.2
1.5	108.3	50	11.1
2	114.9	60	12.6
3	104.4	80	15.7
4	92.7	100	17.7
5	69.1	150	21.2
6	51.4	200	25.6
8	29.1	200	22.6
10	15.5	250	27.7
15	6.1	250	25.8
15	8.1	300	28.9
20	5.5	400	33.3
20	6.8	500	37.3
25	6.3	600	40.8
25	7.6	800	44.9
30	8.7	1000	48.1
40	10.2		
40	9.2		

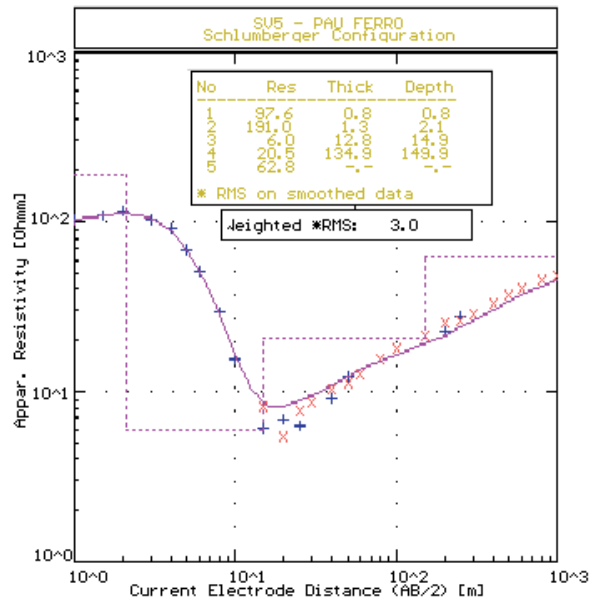
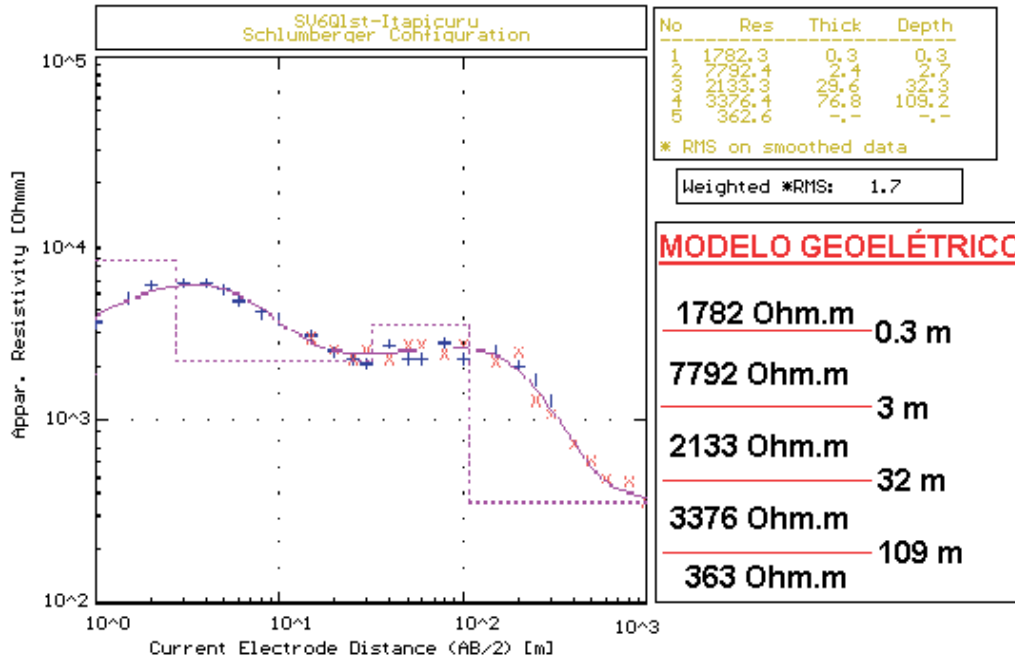
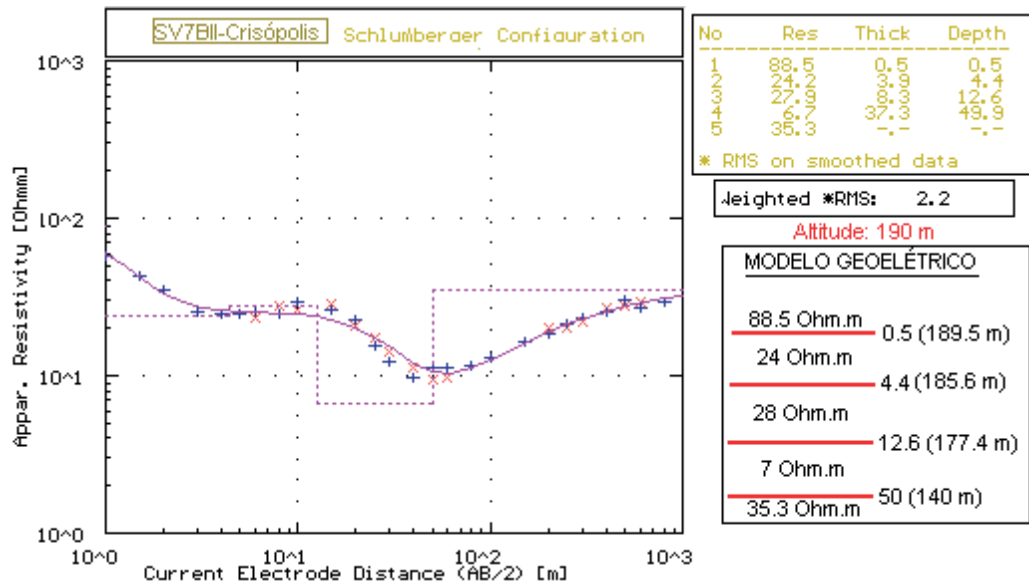


Figura I.5: SEV SV5PF, junto ao poço Pau Ferro, Olindina, da CERB.



Poço	1Q1st	-	Itapicuru-	SEV06
AB/2	R		AB/2	R
(m)	(ohm.m)		(m)	(ohm.m)
1	3512.5		50	2191.5
1.5	4641.5		60	2202.6
2	5513		60	2600
3	5821.8		80	2334.5
4	5740.1		80	2720
5	5239.9		100	2216.4
6	4610.4		100	2650
8	3966.9		150	2104.5
10	3657.3		150	2500
15	2900.4		200	2009.9
15	2852.7		200	2370.7
20	2436.6		250	1308.7
20	2423.2		250	1679.7
25	2213.4		300	1284
25	2187		300	1080
30	2449.6		400	750.3
30	2099		500	604.7
40	2626.6		600	477
40	2213.7		800	469.4
50	2596		1000	360

Figura I.6: SEV SV6Q1, a 50 m do poço 1-Q1st-2 da PETROBRAS.



SV7B2 - SEV A 400 m DO POÇO, NA DIREÇÃO 30 Az

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1	57.9	40	9.8
1.5	42.7	50	11.2
2	35	50	9.5
3	25.4	60	9.8
4	24.7	60	11.3
5	24.6	80	11.6
6	25.4	100	12.9
6	23	150	16.6
8	27.5	200	18.6
8	25	200	19.9
10	29.1	250	20.1
10	26	250	21.5
15	28.7	300	23.4
15	25.9	300	22
20	22.9	400	27.1
20	20.8	400	25.1
25	17.2	500	30.4
25	15.7	500	27.8
30	12.3	600	29.6
30	14	600	27.3
40	11.2	800	29.4

Figura I.7: SEV SV7BII, na Localidade de Buriu, a 600 m do poço Buriu II, da CERB.

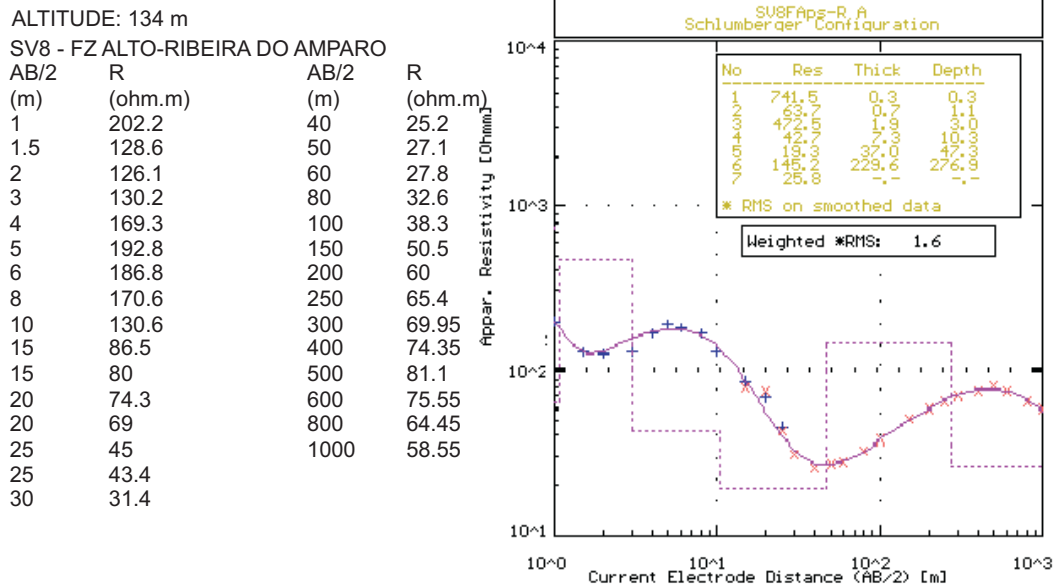


Figura I.8: SEV SV8FA, na Localidade de Fazenda Alto, município de Ribeira do Amparo.

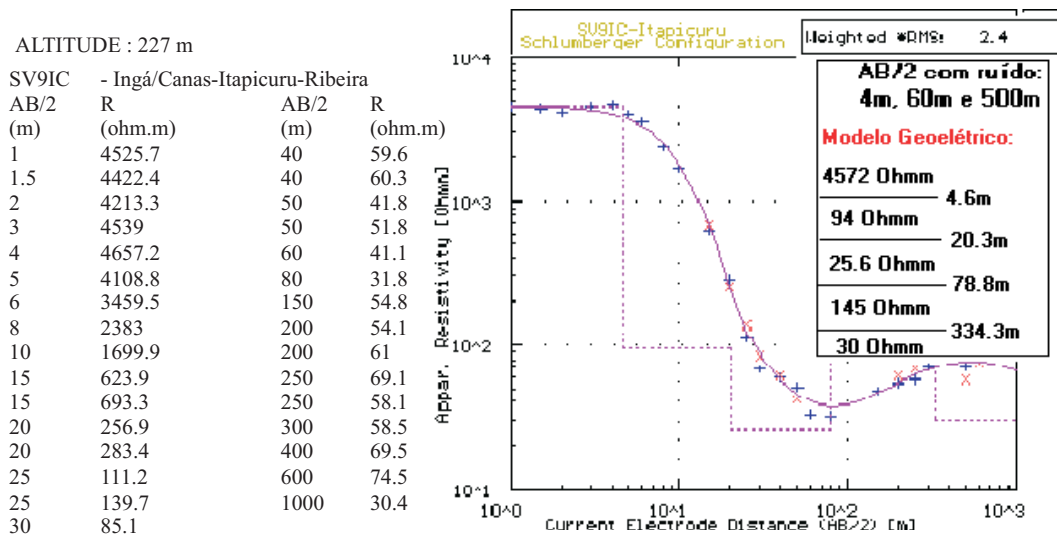


Figura I.9: SEV SV9IC, na Localidade de Ingá.

ALTITUDE: 209 m

SV10RT - Rch Tamburi

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1.5	6692	30	405.1
2	5896.6	30	450
3	4204	40	182.9
3	4600	40	231.2
4	3676.8	50	122.9
4	3900	60	87.1
5	3345.4	80	74.7
5	3550	100	76.4
6	3137.9	150	88.8
6	3320	200	95
8	2856.1	250	104.5
8	2750	250	115.2
10	2598.7	300	122.4
10	2770	400	127.6
15	1984.6	500	124.5
15	2073.7	600	126.8
20	1257.7	1000	139.9
20	1330.3		
25	688.7		
25	734.9		

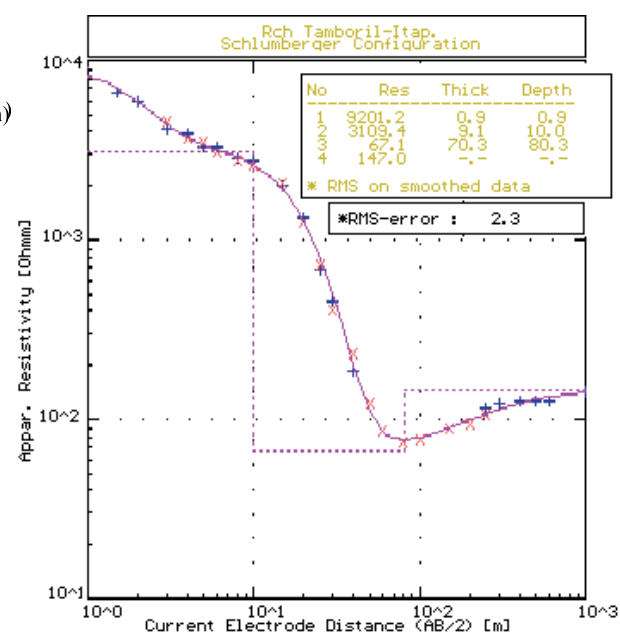
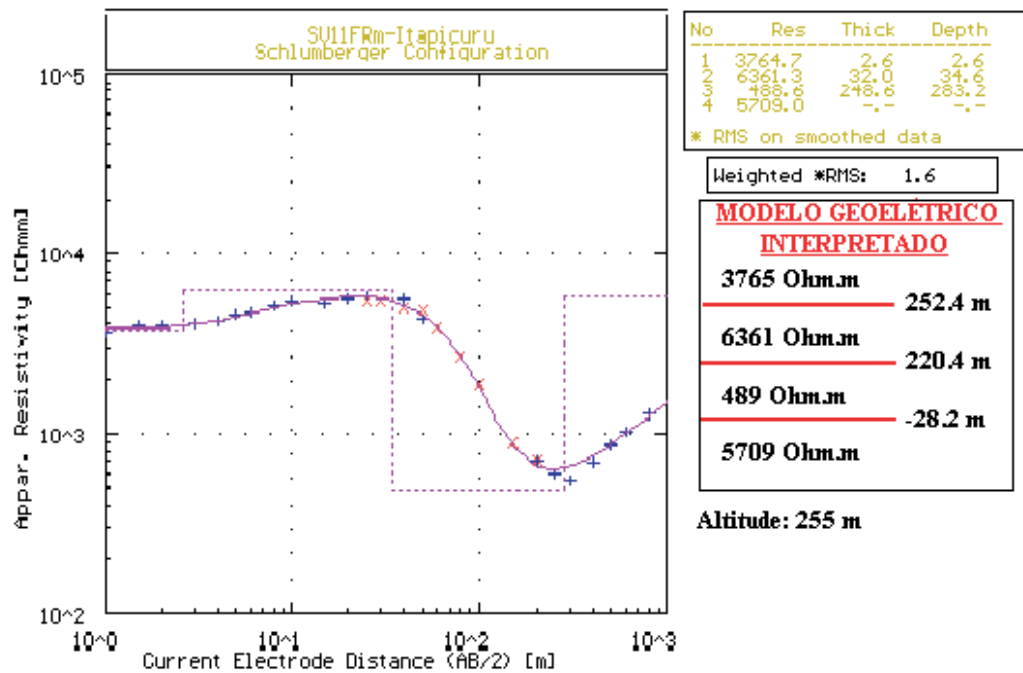


Figura I.10: SEV SV10RT, na Localidade de Riacho Tamboril.



SV11FZ - FZ Romeiro-Itapicuru

AB/2	R	AB/2	R
(M)	(ohm.m)	(M)	(ohm.m)
1	3580	50	4279.2
1.5	3898.3	50	4826.9
2	3917.3	60	3858.4
3	4042.9	80	2719.7
4	4181.2	100	1898
5	4570	150	893.9
6	4710.9	200	712.6
8	5053.8	200	715
10	5466.5	250	470.4
15	5305.3	250	587.6
15	4854.8	300	537
20	5583.2	400	684.3
25	5808.6	500	872.3
25	5394.6	600	1032.7
30	5498.5	800	1151
40	4981	1000	634.5
40	5527.9		

Figura I.11: SEV SV11FR, na Fazenda Romeiro - entre o poço 1-Q1st-2 da PETROBRAS e o de Murici-Caldeirão da CERB.

ALTITUDE : 200 m
 SV12CB - Povoado de Capoeira de Baixo - Itapicuru

AB/2 (M)	R (ohm.m)	AB/2 (M)	R (ohm.m)
1	4008.2	50	3549.4
1.5	5441.5	50	3710.9
2	5517.4	60	3537.6
3	5056.4	80	3095.7
4	4198.7	100	2658.5
5	3719.7	150	1534.4
6	3123.1	200	862.4
8	2606.7	200	958.1
10	2498.8	250	589
15	2801.5	250	656.8
15	2606.5	300	463.3
20	2994.1	400	317.7
20	2776.4	500	246.1
25	3223.6	600	172.6
25	2979.5	800	132.7
30	3211.4	1000	177
40	3373.2		
40	3543.1		

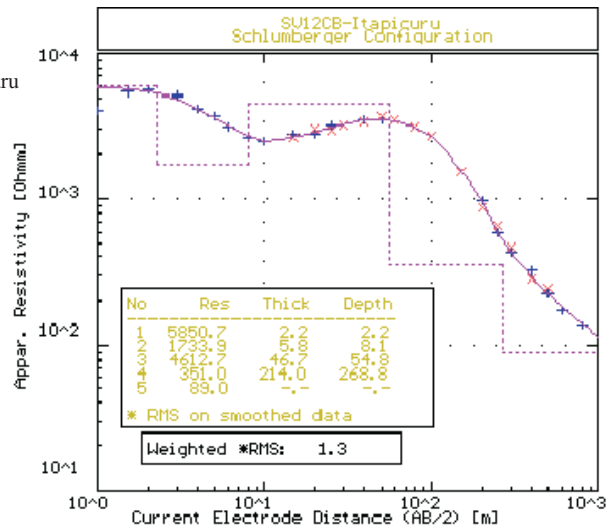


Figura I.12: SEV SV12CB, na localidade de Capoeira de Baixo.

ALTITUDE: 192 m
 SV13FS - Fz Sitio-Olindina (ao longo da pista)

AB/2 (M)	R (ohm.m)	AB/2 (M)	R (ohm.m)
1	72.9	50	15.8
1.5	36.3	50	15.9
2	21.7	60	17.1
3	9.2	80	19.2
4	6	100	20.4
5	5.2	150	24.8
6	5.2	200	29.2
8	5.2	200	30.8
10	5.9	250	32.4
15	8	250	34.3
15	6.9	300	36
20	9.9	400	40.2
20	8.6	500	43.5
25	11.7	600	46.7
25	10.2	800	48.7
30	11.6		
40	14.1		
40	14		

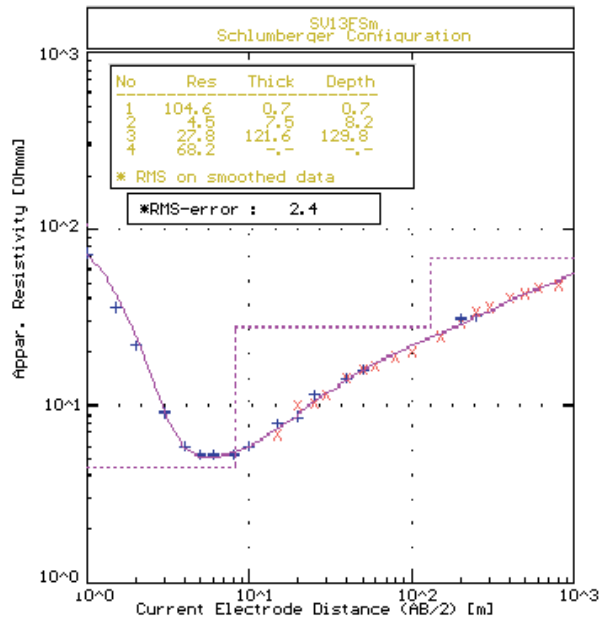


Figura I.13: SEV SV13FS, nas cercanias da cidade de Olindina.

ALTITUDE : 155 m
 SV14L - Licoriroba Olindina 4km da cidade

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1	39.6	50	16.9
1.5	16.5	50	17.1
2	12.9	60	18.1
3	10.2	80	19.2
4	10.5	80	20.5
5	10.9	100	20.4
6	11.5	100	21.8
8	12.8	150	23.9
10	13.8	150	25.3
15	15.2	200	29.9
15	14.7	200	27.3
20	15.6	250	33.4
20	15.1	250	30.7
25	15.7	300	34.4
25	15.1	400	40.8
30	15.5	500	47.3
40	15.6	600	51
40	15.7	800	52.9
		1000	55.1

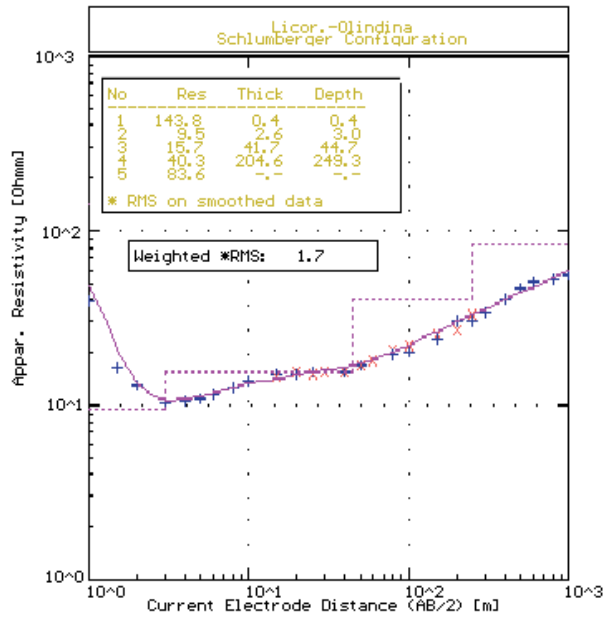


Figura I.14: SEV SV14L, na localidade de Licoriroba (4 km a sul de Olindina).

ALTITUDE: 220 m
 SV15CB - Cana Brava - Crisópolis

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1	531.4	50	14.6
1.5	578.9	50	14.7
2	657.2	60	15
3	702.4	80	17.3
4	711.6	100	19.9
5	630.8	100	18
6	562.2	150	26.5
8	415.6	150	23
10	282.7	200	31.7
15	118.6	200	29.5
15	181.8	250	30.6
20	56.5	250	31.9
20	83.4	300	36.9
25	31.5	400	38.9
25	45.7	500	42.5
30	26.3	600	45.5
40	15.8	800	43.5
40	17.7	1000	43.7

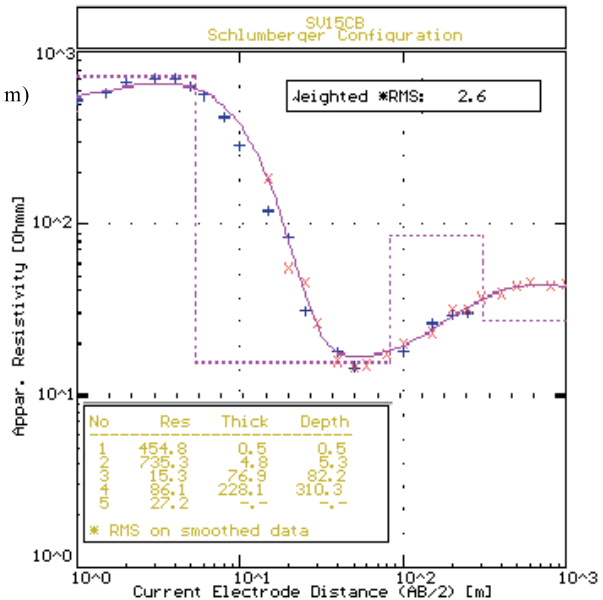


Figura I.15: SEV SV15CB, no povoado de Cana Brava.

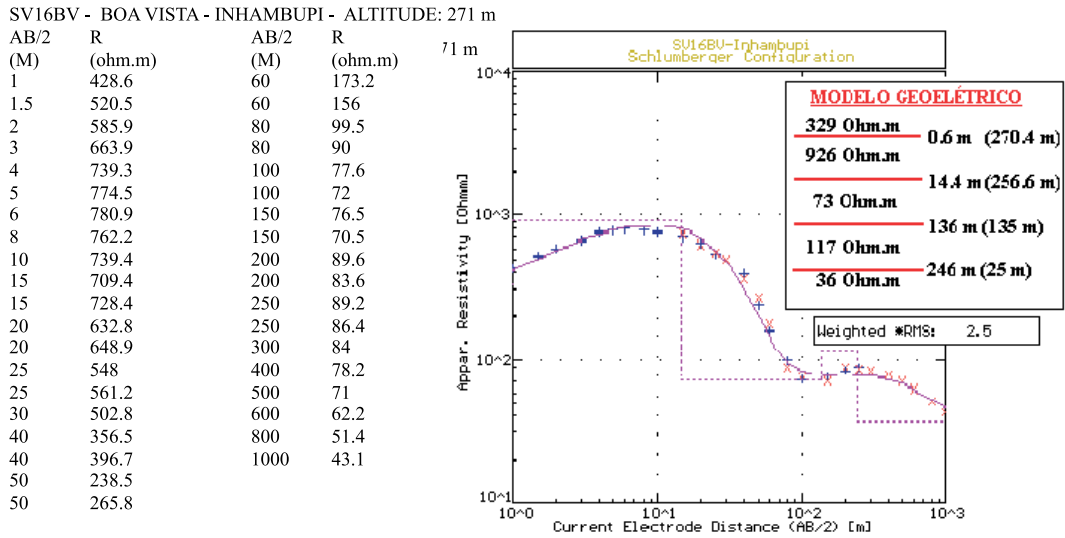


Figura I.16: SEV SV16BV, na localidade de Boa Vista, município de Inhambupe.

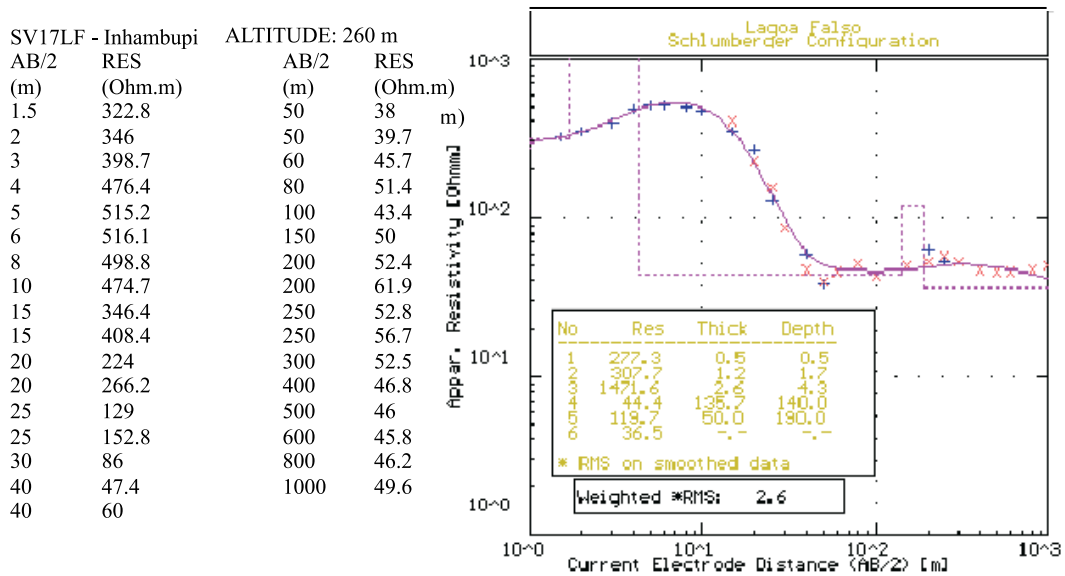


Figura I.17: SEV SV17LF, na localidade de Lagoa Falso (Colônia de assentamento do INCRA).

SV18PU - POVOADO UMBUZEIRO - Olindina

AB/2 (m)	R (Ohm.m)	AB/2 (m)	R (Ohm.m)
1	45.9	50	5.9
1.5	18.9	50	5.8
2	10.8	60	6.8
3	7.4	80	8.7
4	4.8	100	10.1
5	3.2	150	13.9
6	2.5	200	16.3
8	2	200	17.4
10	2.2	250	19.5
15	3	250	19.9
15	2.3	300	21.5
20	3	400	25.3
20	3.4	500	30.1
25	3.3	600	33.3
25	3.6	800	36.3
30	4.1	1000	40.6
40	4.9		
40	4.9		

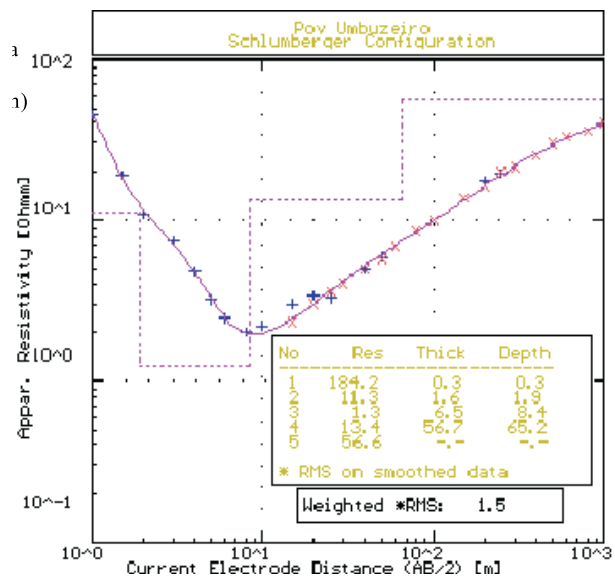
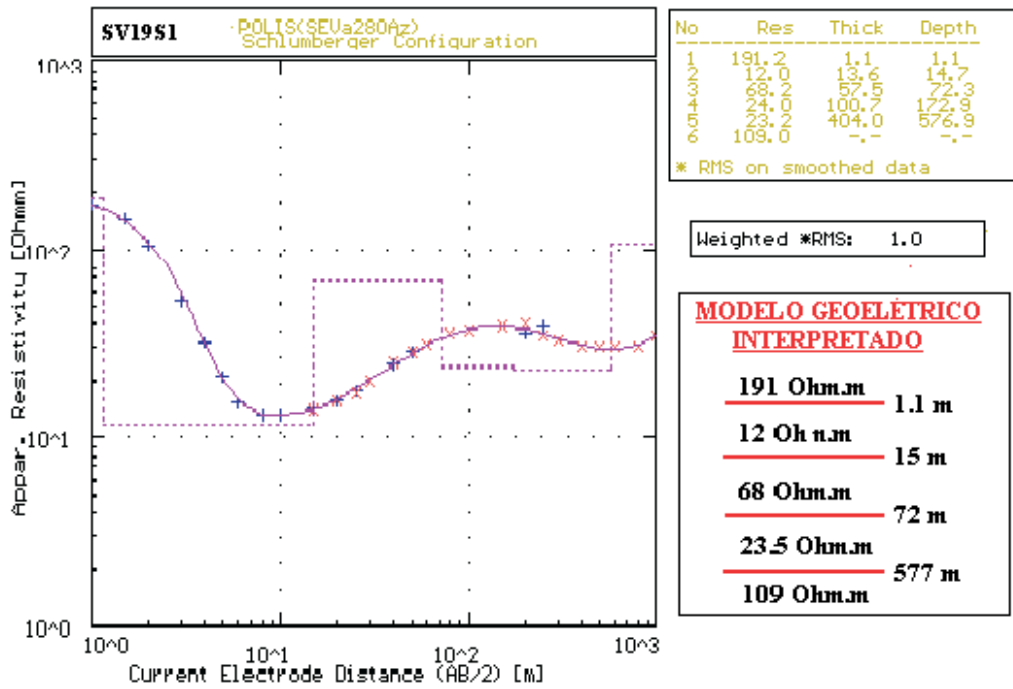


Figura I.18: SEV SV18PU, nas cercanias do povoado de Umbuzeiro.



ALTITUDE: 185 m

POÇO SEDE1-CRISÓPOLIS-SEV19(280Az)

AB/2 (m)	R (ohm.m)	AB/2 (m)	R (ohm.m)
1	175.6	50	28.9
1.5	145.3	50	28.3
2	104.9	60	30.8
3	53.3	80	35.8
4	31.8	100	37.6
5	21.6	150	39.3
6	15.7	200	40.6
8	13.3	200	36.5
10	13.4	250	39.5
15	14.6	250	35.3
15	14.3	300	33
20	16.1	400	30.5
20	15.9	500	30.1
25	17.9	600	30.6
25	17.6	800	30.4
30	20.4	1000	35.5
40	25.3		
40	24.4		

Figura I.19: SEV SV19S1, nas cercanias da cidade de Crisópolis.

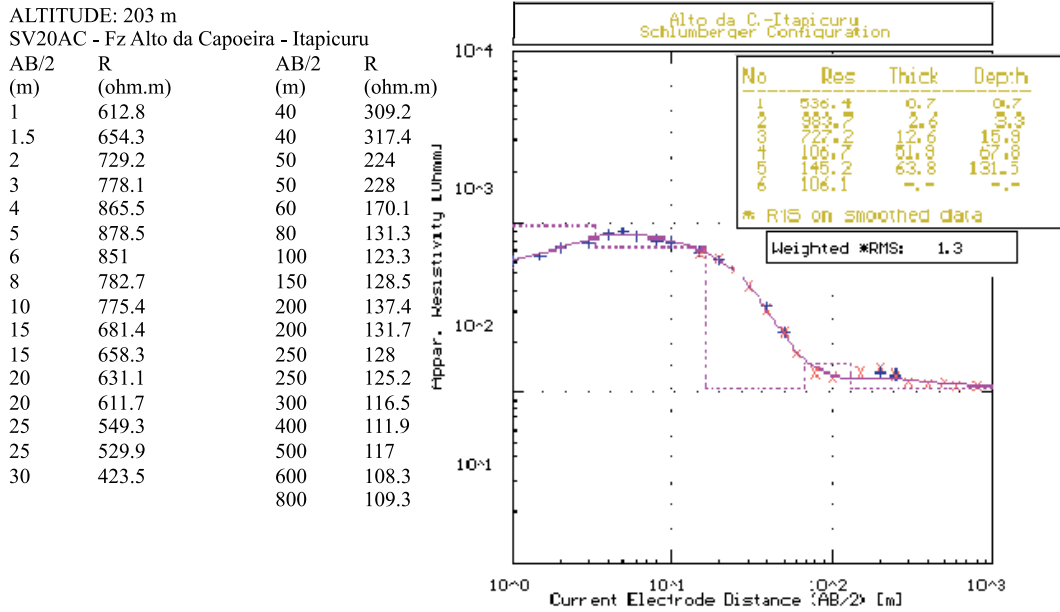


Figura I.20: SEV SV20AC - ao longo da estrada para Rio Real, na localidade de Alto da Capoeira.

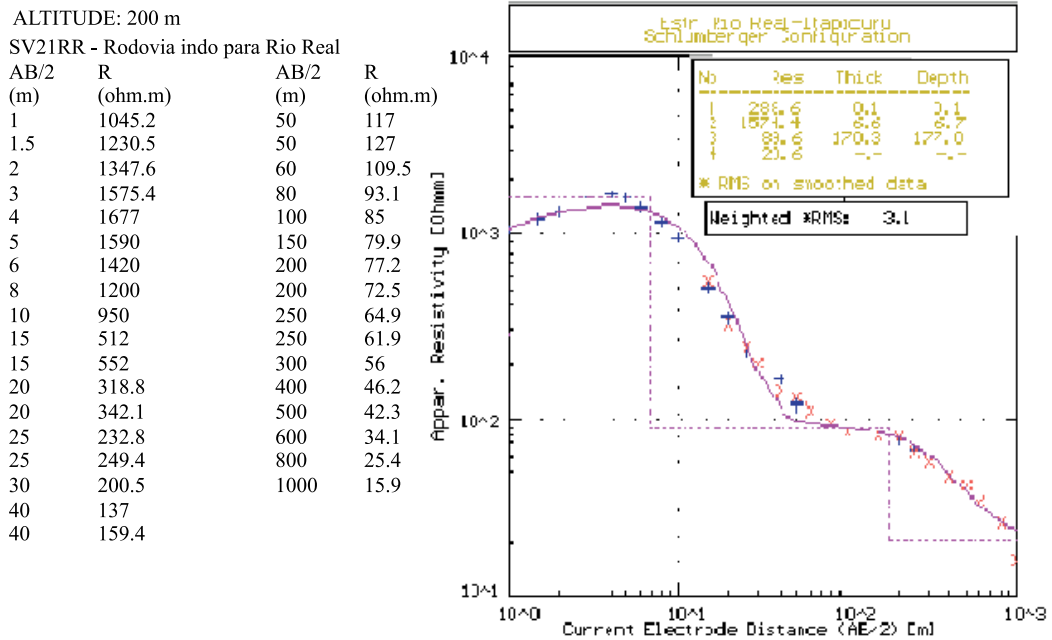


Figura I.21: SEV SV21RR - na estrada para Rio Real.

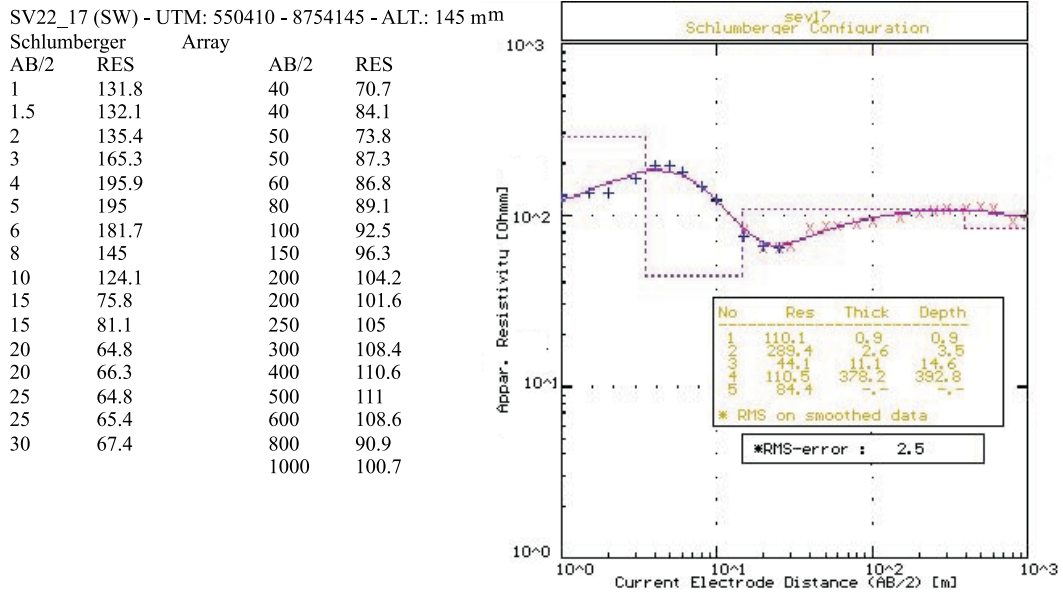


Figura I.22: SEV SV22_17PG - na folha de Cipó.

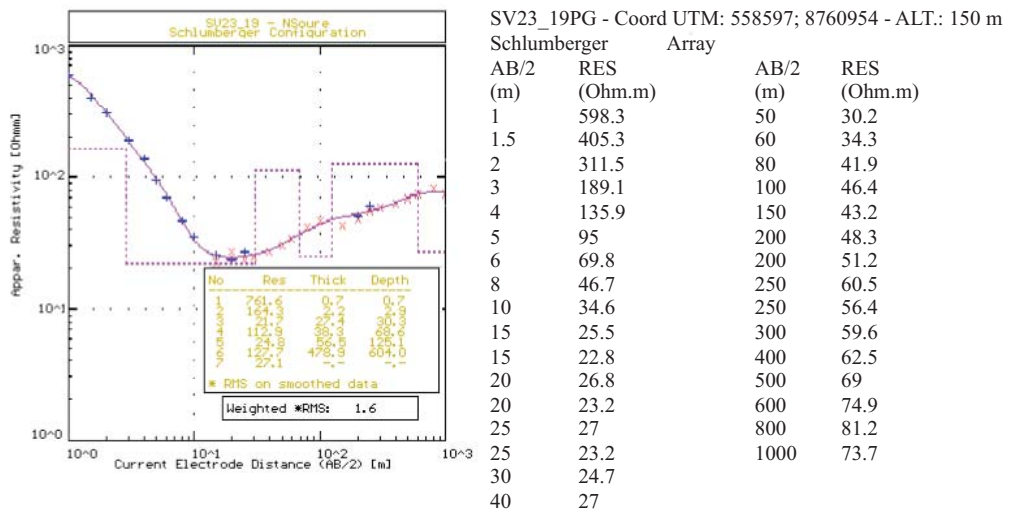
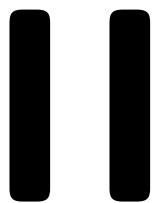


Figura I.23: SEV SV23_19PG - próxima à margem direita do rio Itapicurú.



Dados de localização das SEV's e dos poços perfilados

Poço ou SEV	Coordenadas			OBS
	x	y	z(m)	
SV1IN	573.345	8.705.958	268	*
SV2SM2	555.203	8.743.578	246	
PçSMII	554.088	8.743.680	248	
SV3BS	559.268	8.789.614	244	*
SV4MC	593.581	8.766.936	260	
PçMC	594.692	8.766.942	258	
SV5PF	563.152	8.729.052	240	*
SV6Qlst	590.510	8.765.824	310	*
SV7B2	583.937	8.736.284	196	
PçBII	583.936	8.736.280	200	
SV8FA	556.701	8.774.722	134	
SV9IC	567.133	8.770.001	227	
SV10RT	575.380	8.755.377	210	
SV11FR	591.649	8.766.915	305	
SV12CB	588.683	8.751.433	200	
SV13FS	574.766	8.742.361	200	
SV14L	570.071	8.740.760	158	
SV15CB	577.137	8.734.159	220	
SV16BV	577.196	8.715.019	271	
SV17LF	568.907	8.721.277	260	
SV18PU	560.377	8.735.366	200	
SV19S1	591.575	8.727.122	185	
SV20AC	594.803	8.748.537	203	
SV21RR	602.426	8.742.781	199	
SV22_17PG	550.410	8.754.145	145	
SV23_19PG	558.597	8.760.954	150	

Tabela II.1: Tabela de localização de poços e SEV's. O símbolo * na coluna de observações (OBS) indica que há um poço com perfilagem e uma SEV com os mesmos dados de localização.