

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS E
TROPICAIS**

CLÁUDIO ANTONIO LEAL

**GEOFÍSICA APLICADA NA AVALIAÇÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E MEIO AMBIENTE DA
ZONA COSTEIRA DO CAMPO PETROLÍFERO DE
FAZENDA ALEGRE, NORTE CAPIXABA – ESPÍRITO
SANTO**

FORTALEZA
2007

CLÁUDIO ANTONIO LEAL

**GEOFÍSICA APLICADA NA AVALIAÇÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E MEIO AMBIENTE DA
ZONA COSTEIRA DO CAMPO PETROLÍFERO DE
FAZENDA ALEGRE, NORTE CAPIXABA – ESPÍRITO
SANTO**

Dissertação apresentada ao Curso de pós-graduação em ciências marinhas e tropicais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre

FORTALEZA
2007

"Diante de Deus todos somos igualmente sábios e igualmente tolos."

Albert Einstein...

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais, Celso e Carmen (*in memorian*), por todo o esforço e carinho com que ergueram a base de minha vida profissional e pessoal, o que me levam a aprimorar cada vez mais meus conhecimentos.

À minha tia Dandam (*in memorian*), pelo imenso carinho e devoção na minha formação pessoal.

À minha esposa, Cristina, pelo apoio, presença e paciência durante a execução deste trabalho.

Aos meus filhos, Lucas, Daniel e Anna Elisa, que são sempre fonte de inspiração.

Ao meu amigo e orientador Mariano Castelo Branco, pela competência, paciência, apoio e solidariedade com que conduziu a orientação deste trabalho.

Ao amigo Luiz Parente, pelas conversas, críticas e sugestões que muito contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas Luciano Cunha, Mauro Lisboa, Tercyo Pinéo, Rodrigo Vellardo, Daniel Caldo, José Carlos Batista, Márcio Mendes e Carlos Eduardo, por muito colaborarem com este trabalho de pesquisa.

Aos membros da banca, que, com suas críticas construtivas, ajudaram a melhorar e enriquecer esta dissertação.

À Petrobras, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Instituto de Ciências do Mar, por ter me acolhido em seu Programa de Pós-Graduação, e ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Ceará.

Aos demais colegas e amigos que me incentivaram e apoiaram para que este fosse um trabalho de sucesso.

Ainda, agradeço, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo avaliar as potencialidades dos recursos hídricos subterrâneos da zona costeira do Campo Petrolífero de Fazenda Alegre, situado na região setentrional do Espírito Santo, utilizando técnicas de geofísica integrada aos aspectos hidrogeológicos, visando à sua utilização futura no processo de recuperação suplementar de petróleo (injeção de vapor) no referido campo.

O Campo de Fazenda Alegre (FAL) é o maior produtor terrestre de petróleo do Espírito Santo, com produção média de 20.000 bbl/d. Localiza-se no município de Jaguaré e situa-se, geologicamente, na porção noroeste do Paleocanyon de Fazenda Cedro, na bacia do Espírito Santo, distando 40 km da cidade de São Mateus. Este campo foi descoberto a partir da perfuração do poço pioneiro 1-FAL-01-ES, em maio de 1996, cuja interpretação geológica foi baseada na sísmica 2D, e o seu desenvolvimento, foi iniciado no segundo semestre de 1998. Embora com reservas significativas, este campo possui óleo pesado e viscoso, dificultando sua produção.

Os resultados obtidos com as técnicas de investigação geofísicas integradas às descrições litológicas e dos testes de vazão de poços tubulares profundos realizados na área de estudo identificaram seis camadas geoeletricas, sendo que a 3ª e 5ª camadas apresentam-se como as mais promissoras no tocante ao potencial do manancial hídrico subterrâneo.

Como produto dos processamentos geofísicos e integração dos dados, foram propostas locações e construídos dois poços tubulares profundos (FAL-40 e FAL-42) na área de estudo, com profundidades médias de 180 metros, objetivando validar o modelo proposto e otimizar a produção de água subterrânea com um menor número de poços perfurados.

Os ensaios de bombeamento nestes poços obtiveram ótimos resultados e, de acordo com os estudos empreendidos, podem ser considerados de 110 m³/h , mantida constante por um período de 20 horas contínuas de bombeamento e 4

horas de recuperação, comprovando a expectativa do bom manancial hídrico subterrâneo.

A metodologia apresentada nesta pesquisa, em função dos bons resultados alcançados, permitirá, através do mapeamento das áreas circunvizinhas ao campo da FAL, identificar o potencial hídrico da região e sua real disponibilidade.

A evolução do estudo hidrogeológico da área possibilitará a exploração racional da reserva hídrica subterrânea existente, contribuindo também para o desenvolvimento sustentável da região através da disponibilidade de informações dadas às diversas entidades gestoras dos recursos hídricos, propiciando o planejamento, acompanhamento e preservação dos recursos hídricos e o uso múltiplo destes recursos pela sociedade local.

Palavras-chaves: Sondagem Elétrica Vertical; Mapeamentos de Aquíferos; Água Produzida; Reserva Hídrica Subterrânea.

ABSTRACT

The overall objective of the research was the evaluation of Fazenda Alegre oil and gas production field area groundwater resources, on the north of the Espírito Santo State coastal area. Geophysical techniques, integrated with hydro-geological analysis, were applied in order to find reliable sources of water for utilization during secondary recovery of petroleum (steam injection) processes. Field production without steam injection is difficult because of the high oil viscosity. Application of geophysical techniques investigation integrated with lithological analysis and pumping tests of deep water wells identified six geoelectric layers, being the 3rd and the 5th the most promising, regarding to the potential for groundwater production. From the results of geophysical analysis and data integration some deep water well sites were proposed. Two wells, denominated FAL-40 and FAL-42, were drilled down to 180 meters levels in order to verify the validation of the results of the proposed model for optimization of groundwater production with the least number of wells pumped. Pumping tests of these two wells presented excellent results being verified that it can be maintained a production of 110 m³/h during daily 20 hours continuous pumping periods, hence verifying the expected good groundwater aquifer system available. It was concluded that the application of the results of the hydrogeological study developed during the research can contribute to the rational exploration of the aquifer system and to the sustainable development of the region.

Key words: Electro-resistivity; Aquifer Mapping; Secondary; Produced Water; groundwater resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do empreendimento no contexto nacional.....	27
Figura 2 - Mapa do empreendimento no contexto estadual.....	28
Figura 3 - Limites do Campo de Fazenda Alegre (FAL).	29
Figura 4 - Campo de Fazenda Alegre – limite entre os Tabuleiros Costeiros e a Planície Litorânea.....	40
Figura 5 – Declives suaves – terraço Marinho Pleistocênico com exploração de areia.	43
Figura 6 - Solos na FAL e proximidades.	44
Figura 7 - Bacias Hidrográficas do Estado do Espírito Santo.	48
Figura 8 - Detalhe das Bacias Hidrográficas do Estado do Espírito Santo.	49
Figura 9 - Detalhe da drenagem na Fazenda Alegre.....	50
Figura 10 - Poros ou interstícios em sedimentos.	53
Figura 11 - Sedimento semi-impermeabilizado por calcita.	54
Figura 12 - Sedimento impermeabilizado por silte e argila.	54
Figura 13 - Poços tubulares captando água de aquífero livre e aquífero confinado.	55
Figura 14 - Número de poços por tipo de aquífero.	56
Figura 15 - Percentual de poços por tipo de aquífero.....	56
Figura 16 - Poços no norte do Espírito Santo por tipo de aquífero e poços cadastrados pela CPRM próximos a FAL.	57
Figura 17 - Distribuição dos poços em ambiente sedimentar classificados pela profundidade no norte do Estado.....	59
Figura 18 - Distribuição dos poços em ambiente cristalino classificados pela profundidade no norte do Estado.....	59
Figura 19 - Distribuição dos poços em ambiente misto classificados pela profundidade no norte do Estado.....	60
Figura 20 - Poços tubulares por intervalos de vazão em sedimento.	62
Figura 21 - Poços tubulares por intervalos de vazão em cristalino.....	62
Figura 22 - Poços tubulares por intervalos de vazão em ambiente misto.....	63
Figura 23 - Localização dos poços tubulares no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre (FAL).	66
Figura 24 - Poços tubulares no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre.	66
Figura 25 - Mapa geológico do Espírito Santo.	84
Figura 26 - Geologia dos sedimentos na parte norte do Estado do Espírito Santo e da área de FAL.....	85

Figura 27 - Bacia do Espírito Santo – Limites e principais estruturas geológicas na região de pesquisa.	89
Figura 28 - Estratigrafia da Bacia do Espírito Santo.....	92
Figura 29 - Legenda da estratigrafia da Bacia do Espírito Santo.....	93
Figura 30 - Corte geológico em um trecho na faixa continental da Bacia do Espírito Santo. Adaptado da apresentação “Revitalização de Lagoa Parda – Ampliação de injeção de água produzida”	93
Figura 31 - Técnica da Sondagem Elétrica Vertical.....	95
Figura 32 - Técnica do Caminhamento Elétrico.	95
Figura 33 - Relação entre o fluxo de corrente elétrica e superfícies equipotenciais a partir de uma fonte pontual.....	97
Figura 34 - Figuras ilustrativas para o arranjo Schlumberger, adotado neste trabalho, e a relação entre as linhas de corrente e as superfícies equipotenciais. A e B representam os eletrodos de injeção de corrente elétrica; M e N representam os eletrodos de medida da diferença de potencial. Notar que um conjunto “eletrorresistivímetro” fica caracterizado por um amperímetro (A) e por um voltímetro (V)	98
Figura 35 - Eletrorresistivímetro PER 500 constituído de fonte de 500W e receptor geração de corrente I e medida da diferença de potencial DV.....	99
Figura 36 - Mapa de posicionamento das SEVs no Campo de Fazenda Alegre.	101
Figura 37 - Roteiro seguido para processamento e interpretação pontual de uma Sondagem Elétrica Vertical típica da área de FAL.....	104
Figura 38 - Perfil litológico dos poços tubulares profundos FAL-56 e FAL-06.	104
Figura 39 - Centro da SEV FAL-06 onde se localiza o equipamento e posicionamento dos eletrodos.	105
Figura 40 - Centro da SEV FAL-05 e vista do equipamento de eletrorresistividade.	105
Figura 41 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-01.....	106
Figura 42 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-02.....	107
Figura 43 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-03.....	108
Figura 44 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-04.....	109
Figura 45 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-05.....	110
Figura 46 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-06.....	111
Figura 47 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-02_ALE.	112
Figura 48 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-03_ALE.	113
Figura 49 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-04_ALE.	114
Figura 50 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-05_ALE.	115
Figura 51 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-06_ALE.	116

Figura 52 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-07_ALE.	117
Figura 53 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-08_ALE.	118
Figura 54 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-09_ALE.	119
Figura 55 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-10_ALE.	120
Figura 56 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-12_ALE.	121
Figura 57 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-13_ALE.	122
Figura 58 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-14_ALE.	123
Figura 59 - Seção geométrica proveniente das interpretações e modelagem dos dados de eletroresistividade.....	124
Figura 60 - Mapa de iso-valores de resistividade aparente estimada exibindo a variação da resistividade da quinta camada geométrica para toda a área de estudo.....	127
Figura 61 - Mapa de iso-valores exibindo a variação da espessura estimada da quinta camada geométrica para toda a área de estudo.	127
Figura 62 - Mapa de iso-valores exibindo a variação da profundidade estimada da 5ª camada geométrica para toda a área de estudo.....	128
Figura 63 - Figura 3D de variação da resistividade e profundidades estimadas da quinta camada.....	129
Figura 64 - Mapa de iso-valores de resistividade aparente estimada para a área de pesquisa.....	131
Figura 65 - Profundidades estimadas para a área de pesquisa e locações propostas em área considerada de melhor potencial hidrogeológico.	131
Figura 66 - Sonda de perfilagem.....	133
Figura 67 - Sistema de registro de uma unidade de perfilagem moderna	134
Figura 68 - A espessura da camada é bem superior ao espaçamento dos eletrodos..	136
Figura 69 - A espessura da camada é igual ao espaçamento dos eletrodos.....	136
Figura 70 - A espessura da camada é inferior ao espaçamentos dos eletrodos.....	137
Figura 71 - A resistividade da lama (R_m) é igual à resistividade da camada (R_o).....	138
Figura 72 - A resistividade da lama (R_m) é menor que a resistividade da camada (R_o).	139
Figura 73 - A resistividade da lama (R_m) é bem inferior à resistividade da camada (R_o).	139
Figura 74 - Distribuição radial de resistividade pelo "efeito de invasão".	140
Figura 75 - Modelo esquemático do Potencial Espontâneo.....	143
Figura 76 - "Efeito bateria" e potencial de membrana.	144
Figura 77 - Potencial de junção.....	145

Figura 78 - O potencial espontâneo é a soma dos potenciais de junção e de membrana.	146
Figura 79 - Correntes que geram o SP e deflexões correspondentes da curva em função da relação R_{mf} e R_w	147
Figura 80 - Ficha de perfilagem.	150
Figura 81 - Detalhe da faixa reservada para Raios Gama e SP.....	150
Figura 82 - Ficha de perfilagem geofísica.	151
Figura 83 - Faixa reservada para a resistividade e normal curta.....	151
Figura 84 - Poço FAL-42 construído e com equipamento de extração de água.	153
Figura 85 - Poço FAL-40 construído e com equipamento de extração de água.	153
Figura 86 - Detalhes construtivos e estratigrafia do poço FAL-40.	154
Figura 87 - Piezômetros construídos na área de pesquisa com caixa de proteção em alvenaria.....	155
Figura 88 - Variação do tempo de perfuração com a profundidade para o poço FAL-40.	155
Figura 89 - Descrição das amostras para o poço FAL-40.	156
Figura 90 - Descrição das amostras para o poço FAL-40.	157
Figura 91 - Descrição das amostras para o poço FAL-40.	158
Figura 92 - Dados processados de perfilagem geofísica de poço (últimas metragens do poço).	159
Figura 93 - Dados processados de perfilagem geofísica de poço.	160
Figura 94 - Dados processados de perfilagem geofísica de poço.	161
Figura 95 - Dados de perfilagem geofísica de poço integrado à geologia detalhada para a elaboração do perfil construtivo do poço FAL-40.....	162
Figura 96 - Acampamento no poço FAL-40.....	163
Figura 97 - Piezômetro do poço FAL-40.	163
Figura 98 - Água bombeada do poço FAL-40 durante o pré-teste de bombeamento. .	164
Figura 99 - Escoador de orifício circular durante a calibração no poço FAL-40.....	164
Figura 100 - Equipamento de orifício circular para medidas de vazão constante.	165
Figura 101 - Planilha eletrônica utilizada e controle on-line.....	166
Figura 102 - Coeficientes utilizados no cálculo da interferência dos poços mais próximos em operação.	172

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura média mensal (°C) para Linhares.....	31
Gráfico 2 - Temperatura média mensal (°C) para São Mateus.....	32
Gráfico 3 - Precipitação média mensal (mm) para a estação de Linhares.....	33
Gráfico 4 - Variação da precipitação média mensal (mm) com a temperatura média mensal (°C) para a estação de Linhares.....	33
Gráfico 5 - Precipitação média mensal (mm) para a estação de São Mateus.	34
Gráfico 6 - Variação da precipitação média mensal (mm) com a temperatura média mensal (°C) para a estação de São Mateus.....	34
Gráfico 7 - Evapotranspiração potencial média mensal (mm) para a estação de Linhares.....	35
Gráfico 8 - Evapotranspiração real média mensal (mm) para a estação de Linhares....	35
Gráfico 9 - Evapotranspiração potencial média mensal (mm) para a estação de São Mateus.....	36
Gráfico 10 - Evapotranspiração real média mensal (mm) para a estação de São Mateus.....	37
Gráfico 11 - Balanço hídrico para Linhares mostrando as curvas de P, ETP e ETR.	37
Gráfico 12 - Balanço hídrico para Linhares mostrando os períodos de déficit e excedente hídrico.	38
Gráfico 13 - Balanço Hídrico para São Mateus mostrando as curvas de P, ETP e ETR.	39
Gráfico 14 - Balanço Hídrico para Linhares mostrando os períodos de déficit e excedente hídrico.	39
Gráfico 15 - Poços por classificação de profundidade e tipo de aquífero.	58
Gráfico 16 - Percentual de poços classificados pela profundidade.....	59
Gráfico 17 - Poços por intervalo de vazão e tipo de aquífero.	61
Gráfico 18 - Variação na densidade demográfica do Estado e municípios considerados (2000 a 2006).	69
Gráfico 19 - Percentual de aumento da densidade demográfica no período de 2000 a 2006 para o Estado e municípios considerados.....	69
Gráfico 20 - Variação da taxa de crescimento populacional para os períodos 1991-2000 e 2000-2006 para o Estado e municípios considerados.....	70
Gráfico 21 - Variação percentual da taxa de crescimento para o período 1991-2000 a 2000-2006 para o Estado e municípios considerados.....	71
Gráfico 22 - Relação dos valores de produção agrícola dos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus com o total geral do Estado do Espírito Santo.	74

Gráfico 23 - Síntese do orçamento 2005 para o Estado.....	75
Gráfico 24 - Síntese do orçamento 2005 para Jaguaré.....	75
Gráfico 25 - Síntese do orçamento 2005 para Linhares.	75
Gráfico 26 - Síntese do orçamento 2005 para São Mateus.....	75
Gráfico 27 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação do Estado.	76
Gráfico 28 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação em Jaguaré.....	76
Gráfico 29 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação em Linhares.....	76
Gráfico 30 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação em São Mateus.....	76
Gráfico 31 - Percentual de tipos de abastecimento no Estado.	78
Gráfico 32 - Percentual de tipos de abastecimento em Jaguaré.	78
Gráfico 33 - Percentual de tipos de abastecimento em Linhares.....	78
Gráfico 34 - Percentual de tipos de abastecimento em São Mateus.	78
Gráfico 35 - Método analítico de Neuman para a determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero livre – piezômetro do poço FAL-40.....	167
Gráfico 36 - Método analítico de Neuman para a determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero livre — piezômetro do poço FAL-42.	168
Gráfico 37 - rebaixamento máximo disponível indicando a vazão máxima disponível utilizando as equações características para 1 hora e 5 anos.	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das estações meteorológicas utilizadas na caracterização climática da área de pesquisa	31
Tabela 2 - Poços do Banco de Dados da CPRM em cristalino, sedimento e ambiente misto.....	56
Tabela 3 - Classificação de poços com relação à profundidade de perfuração	56
Tabela 4 - Número de poços por classificação de profundidade e tipo de aquífero.....	58
Tabela 5 - Distribuição dos poços tubulares por intervalos de vazão e tipos de aquíferos	61
Tabela 6 - Principais características dos poços na FAL e proximidades	63
Tabela 7 - Principais características construtivas dos poços tubulares no interior e proximidades da Fazenda Alegre (FAL)	64
Tabela 8 - Características de produção dos poços no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre (FAL)	64
Tabela 9 - Aspectos qualitativos da água dos poços no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre (FAL)	65
Tabela 10 - Coordenadas dos poços tubulares no interior e proximidades da Fazenda Alegre.....	67
Tabela 11 - Densidades demográficas para o Estado e municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus, variações numéricas e percentuais no período de 2000 a 2006	69
Tabela 12 - Taxas de crescimento populacional para os períodos 1991-2000 e 2000-2006 e variações numéricas e percentuais para o Estado e municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus	70
Tabela 13 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Estado do Espírito Santo.....	72
Tabela 14 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Município de Jaguaré	72
Tabela 15 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Município de Linhares.....	73
Tabela 16 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Município de São Mateus	73
Tabela 17 - Percentual do valor da produção agrícola, por atividade, dos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus em relação ao total geral do Estado do Espírito Santo.....	73

Tabela 18 - Síntese do orçamento para o Estado do Espírito Santo e municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus.....	74
Tabela 19 - Tipos de Impostos e valores arrecadados no Estado e municípios considerados.....	76
Tabela 20 - Tipos de abastecimento por número de domicílios no Estado e municípios considerados.....	77
Tabela 21 - Números de leitos do SUS no Estado e nos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus, por especialidade médica.....	80
Tabela 22 - Sondagens elétricas verticais realizadas na região de pesquisa.....	100
Tabela 23 - Coordenadas UTM e ordem de perfuração indicada para novos poços na área de pesquisa.....	130
Tabela 24 - Principais tipos de perfis geofísicos utilizados na prospecção de água subterrânea.....	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Af	Área Plana de Acumulação Fluvial
ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
Atm	Planícies Costeiras
bbl/d	Barris por Dia
CBL	Perfil de Cimentação de Poços
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental
EJ	Potencial de Junção
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Agricultura e Pecuária
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
FAL	Fazenda Alegre
GR	Raios Gama
I2	Planícies de Acumulação
I3	Terraços Fluviais
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo
K	Condutividade Hidráulica
MeV	Milhões de Elétrons – Volts
ND	Nível Dinâmico
NE	Nível Estático
NFAL	Norte de Fazenda Alegre
R_a	Resistividade Aparente
ρ_a	Resistividade Aparente
RDM	Rebaixamento Máximo Disponível
R_m	Resistividade do Fluido de Perfuração
R_{mc}	Resistividade do Reboco
R_{mf}	Resistividade do Filtrado
R_o	Resistividade da Zona Virgem
R_w	Resistividade da Formação
R_{x0}	Resistividade da Zona Lavada
S	Coeficiente de Armazenamento

SEAMA	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SP	Potencial Espontâneo
SWi	Rebaixamento para um tempo qualquer
Sy	Coefficiente de Produção Específica
T	Transmissibilidade
T1	Rampas Modeladas
V _{sh}	Volume de Argila

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.	LOCALIZAÇÃO E ACESSO	27
4.	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	30
4.1.	CLIMA	30
4.1.1.	Temperatura Média	31
4.1.2.	Precipitação Média Mensal.....	32
4.1.3.	Média Mensal Evapotranspiração Potencial (ETP) (mm) e Real (ETR) (mm).....	35
4.1.4.	Déficits (mm) e Excessos (mm) Hídricos	37
4.2.	RELEVO, GEOMORFOLOGIA E VEGETAÇÃO.....	40
4.3.	SOLOS.....	44
4.4.	RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS	46
4.5.	RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	51
4.6.	ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS	68
5.	GEOLOGIA E ARCABOUÇO ESTRUTURAL NO CONTEXTO DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO	81
5.1.	GEOLOGIA	81
5.2.	ARCABOUÇO ESTRUTURAL E A BACIA DO ESPÍRITO SANTO.....	88
6.	APLICAÇÃO DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS	94
6.1.	O método geofísico da eletrorresistividade.....	94
6.1.1.	Introdução	94
6.1.2.	Metodologia utilizada.....	99
6.1.3.	Processamento e interpretação dos dados.....	101
6.1.4.	Processamentos visando à seleção de áreas com potencial hidrogeológico.....	126
6.1.5.	Resultados	129
6.2.	Perfilagens geofísicas em poços	132
6.2.1.	Introdução	132
6.2.2.	Tipos de perfis e a unidade de perfilagem.....	132
6.2.3.	Possíveis problemas na perfilagem.....	135
6.2.4.	Gama Natural.....	140
6.2.5.	Resistividade.....	142
6.2.6.	Potencial espontâneo (SP).....	143
6.2.7.	Interpretação qualitativa e quantitativa de perfis geofísicos.....	148

7.	Construção de Poços Tubulares e Caracterização Hidrodinâmica do Sistema Aquífero.....	152
7.1.	Introdução	152
7.2.	Construção e características técnicas dos poços de produção e piezômetros.....	152
7.2.1.	Perfilagem elétrica para completação dos poços.....	158
7.2.2.	Testes de produção e de aquífero	163
7.2.3.	Regimes de bombeamento para os poços FAL-40 e FAL-42	168
7.3.	RESULTADOS	173
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	176
	REFERÊNCIAS	180

1. INTRODUÇÃO

As atividades de exploração e produção petrolífera na bacia do Espírito Santo desenvolvem-se ao longo de cinco décadas. A região que abarca a maior concentração de produção *Onshore* de hidrocarbonetos situa-se na parte setentrional terrestre da Bacia, próxima à faixa costeira, e abrange os Municípios de São Mateus, Linhares, Jaguaré e Conceição da Barra.

A Companhia de Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) vem atuando majoritariamente nesta bacia desde o início das atividades exploratórias, sendo que, a partir da década de 90 (1994), com o advento da quebra do monopólio estatal e a criação da Agência Nacional de Petróleo (ANP), outras empresas foram habilitadas a participar desse novo cenário de exploração e produção de petróleo no Brasil.

O Campo de Fazenda Alegre (FAL), objeto desta dissertação, é o maior produtor terrestre do Espírito Santo (com produção média de 20.000 bbl/d), localiza-se no Município de Jaguaré e situa-se geologicamente na porção noroeste do *Paleocanyon* de Fazenda Cedro, na bacia do Espírito Santo, distando 40 km da cidade de São Mateus. Este Campo foi descoberto a partir da perfuração do poço pioneiro 1-FAL-01-ES, em maio de 1996, cuja interpretação geológica foi baseada na sísmica 2D, e o seu desenvolvimento foi iniciado no segundo semestre de 1998. Atualmente, toda a extensão é coberta pela sísmica 3D.

As características físico-químicas do óleo produzido (“óleo pesado”) nos arenitos produtores do Campo de Fazenda Alegre requerem um volume considerável de água na sua exploração, através da técnica de injeção de vapor.

Em decorrência da maturidade dos campos terrestres da Bacia do Espírito Santo, ou devido às características físico-químicas do óleo produzido (“óleo pesado”), a curva de produção entrou em declínio ao longo da década passada. Sendo assim, a Petrobras tem intensificado a identificação de novas

técnicas adequadas à recuperação suplementar do petróleo de alguns campos produtores na região norte capixaba. As técnicas de injeção de água e de vapor de água estão sendo implementadas como forma de otimizar a sua produção. O propósito de injetar água nos reservatórios de hidrocarbonetos é a recuperação suplementar desse recurso, uma vez que, ao longo do período de desenvolvimento da atividade de produção de um determinado campo de petróleo, os reservatórios apresentam queda de pressão, e os hidrocarbonetos tendem a perder mobilidade em direção aos poços produtores. Claramente, estes procedimentos representam um significativo incremento do uso de recursos hídricos nas suas atividades de produção.

Nas atividades de exploração e produção de óleo e gás são gerados resíduos e efluentes, dentre os quais se destacam as águas produzidas, que vêm junto com o petróleo e o gás, e que consistem de água de formação, água naturalmente presente na formação geológica do reservatório de petróleo e água de injeção, que injetada no reservatório para aumento da produção. Geralmente, os campos de petróleo no início da produção geram pequena quantidade de água, que aumenta com o decorrer do tempo, atingindo valores de 90%, quando o campo se encontra no seu estágio final de produção econômica (RAY; ENGELHARDAT, 1992).

O estudo integrado de dados hidrológicos e hidrogeológicos utilizando métodos diretos (dados fluviométricos, poços tubulares profundos, descrição de rochas e análises química) e indiretos (métodos geofísicos, perfilagem de poços e interpretação de aerofotos/imagem de satélite) possibilitam melhores resultados no que se refere à gestão de recursos hídricos e identificação de potenciais impactos na utilização destes recursos, principalmente os relacionados aos sistemas de aquíferos.

A ampla utilização dessas abordagens é perfeitamente compatível com o caráter multidisciplinar da ciência hidrogeológica. Feitosa e Manoel Filho, (1977) utilizaram a técnica integrada do conjunto de operações ou estudos que permitem a localização e caracterização de aquíferos em quantidade e qualidade adequadas ao fim pretendido.

Em virtude desse cenário, o estudo hidrogeológico integrado do potencial e disponibilidade hídrica superficial e subterrânea utilizando os métodos diretos e indiretos de investigação, já mencionados, associado aos aspectos qualitativos dos corpos de água, apresenta-se como a alternativa de viabilizar o planejamento do uso destas técnicas de produção no que se refere à utilização dos recursos hídricos da região, de uma forma racional e sustentada.

Esta dissertação tem como objetivo geral avaliar as potencialidades dos recursos hídricos subterrâneos no Campo Petrolífero de Fazenda Alegre (FAL), situado na região setentrional do Espírito Santo utilizando técnicas de geofísica integrada aos aspectos hidrogeológicos, visando à utilização no processo de recuperação suplementar de petróleo (injeção de vapor) no referido campo.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Definir áreas com potenciais mais favoráveis para exploração de aquíferos no Campo Petrolífero de Fazenda Alegre (FAL);
- Aplicar técnicas geofísicas para identificação de potenciais níveis produtores de água em subsuperfície;
- Avaliar a produtividade dos poços tubulares profundos visando ao uso industrial na recuperação suplementar do Campo Petrolífero de Fazenda Alegre (injeção de vapor);
- Atender às exigências legais dos órgãos ambientais e/ou das agências reguladoras, dentre elas: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (Seama), Agência Nacional de Águas (ANA) e Agência Nacional do Petróleo (ANP);
- Otimizar a perfuração de poços tubulares, levando em consideração o diagnóstico de aquíferos mais profundos e com maior potencial hídrico;
- Auxiliar o diagnóstico e monitoramento das águas subterrâneas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo integrado de dados hidrológicos e hidrogeológicos utilizando métodos diretos (vazões de rios, poços tubulares, descrição de rochas, análises químicas) e indiretos (métodos geofísicos, interpretação de aerofotos/imagem de satélite) possibilita melhores resultados no que se refere à gestão de recursos hídricos. A ampla utilização destas abordagens é perfeitamente compatível com o caráter multidisciplinar da ciência hidrogeológica.

O método de eletrorresistividade consiste de medidas de impedância com subsequente interpretação em termos de propriedade elétrica da estruturação geológica em subsuperfície, baseado na resposta de cada material ao fluxo de uma corrente elétrica (WARD, 1990). Quando uma corrente é introduzida no solo através de dois eletrodos, esta produz uma diferença de potencial que é medida por um segundo par de eletrodos. O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade aparente do solo e do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo a profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (ORELLANA, 1972).

Os minerais de argila, por outro lado, conduzem a corrente elétrica tanto eletronicamente (no fluído), como através da dupla camada na interface mineral/eletrólito. Assim, a presença de argilo-minerais altera significativamente a resposta dos ensaios geofísicos, normalmente, por diminuição do valor da resistividade elétrica (BRAGA, 2001).

Feitosa e Manoel Filho (1977) utilizaram a técnica integrada do conjunto de operações ou estudos que permite a localização e caracterização de aquíferos em quantidade e qualidade adequadas ao fim pretendido.

Custódio e Llamas (1976) adotaram uma classificação para diferentes tipos de estudos utilizados na hidrologia com ênfase na exploração dos aquíferos

dividido-a em três grandes grupos de estudos: 1) estudos preliminares ou de reconhecimento; 2) estudos gerais e 3) estudos detalhados.

Segundo Santos (1997, p. 81)

[...] do ponto de vista hidrogeológico a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto o aspecto quantitativo. O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes químicos das águas subterrâneas procurando estabelecer uma relação com o meio físico. A qualidade da água é definida por sua composição e pelo conhecimento dos efeitos que podem causar os seus constituintes. O conjunto de todos os elementos que a compõem permite estabelecer padrões de qualidade da água, classificando-a, assim, de acordo com seus limites estudados e seu uso para o consumo humano, agrícola, industrial, etc. [...].

A implantação da gestão da demanda em aquíferos subterrâneos tem sido difícil e, em muitos casos, extremamente cara, particularmente nos países em desenvolvimento. A questão principal está em como reduzir os efeitos negativos da retirada excessiva de água sem impor taxas desnecessárias e reprimir uso inadequado das valiosas reservas subterrâneas (ROSEGRANT, 1997).

Para atingir uma exploração racional dos aquíferos subterrâneos, Salati, Lemos e Salati (2002) argumentam que podemos usar os mesmos instrumentos empregados para a gestão das águas superficiais:

- controles baseados na quantidade de água extraída (licenciamento de poços) e outorga de uma cota anual de extração;
- cobrança de água extraída;
- possibilidade de vender parte da cota para outros usuários.

Com essas e outras preocupações, o governo brasileiro promulgou a Lei Federal N^o 9.433, de 08 de janeiro de 1997, a qual institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Recursos Hídricos.

A lei tem os objetivos de:

- natureza econômica: dar ao usuário a indicação de valor econômico para a água, através da cobrança;
- natureza financeira: obter recursos para financiamentos de planos de recursos hídricos;
- natureza de gestão: incentivar a racionalização do uso da água.

Complementarmente, foi promulgada a lei federal N^o 9.984, de 17 de julho de 2000, a qual dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal encarregada da implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e da coordenação do Sistema Nacional de Recursos Hídricos (PRESTELO, 2006).

3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de pesquisa localiza-se no Município de Jaguaré e situa-se geologicamente na porção noroeste do Paleocanyon de Fazenda Cedro, na Bacia do Espírito Santo, distando 14 km da Estação Petrolífera de Fazenda Cedro e 40 km da cidade de São Mateus (Figura 1).

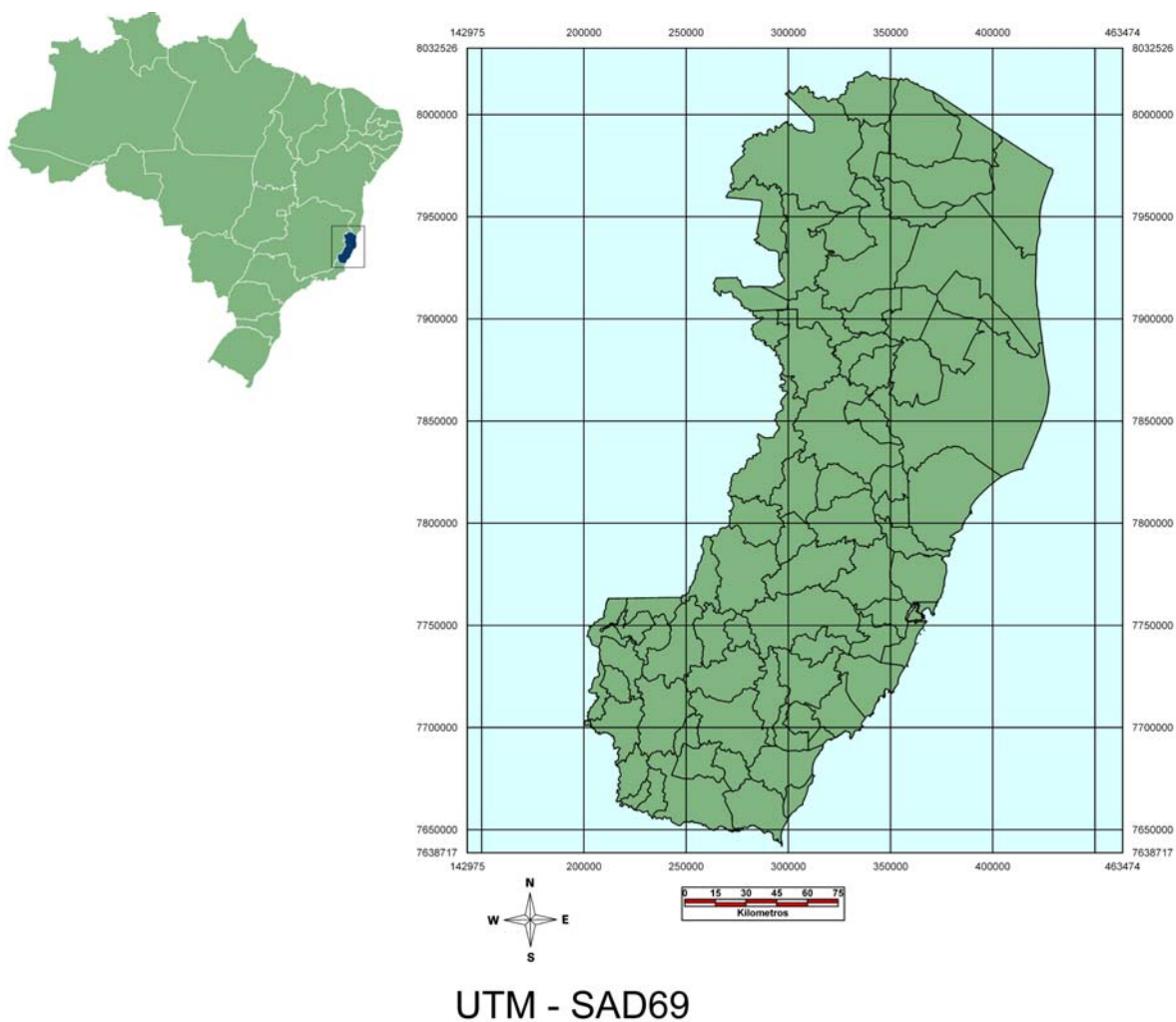


Figura 1 - Mapa de localização do empreendimento no contexto nacional.

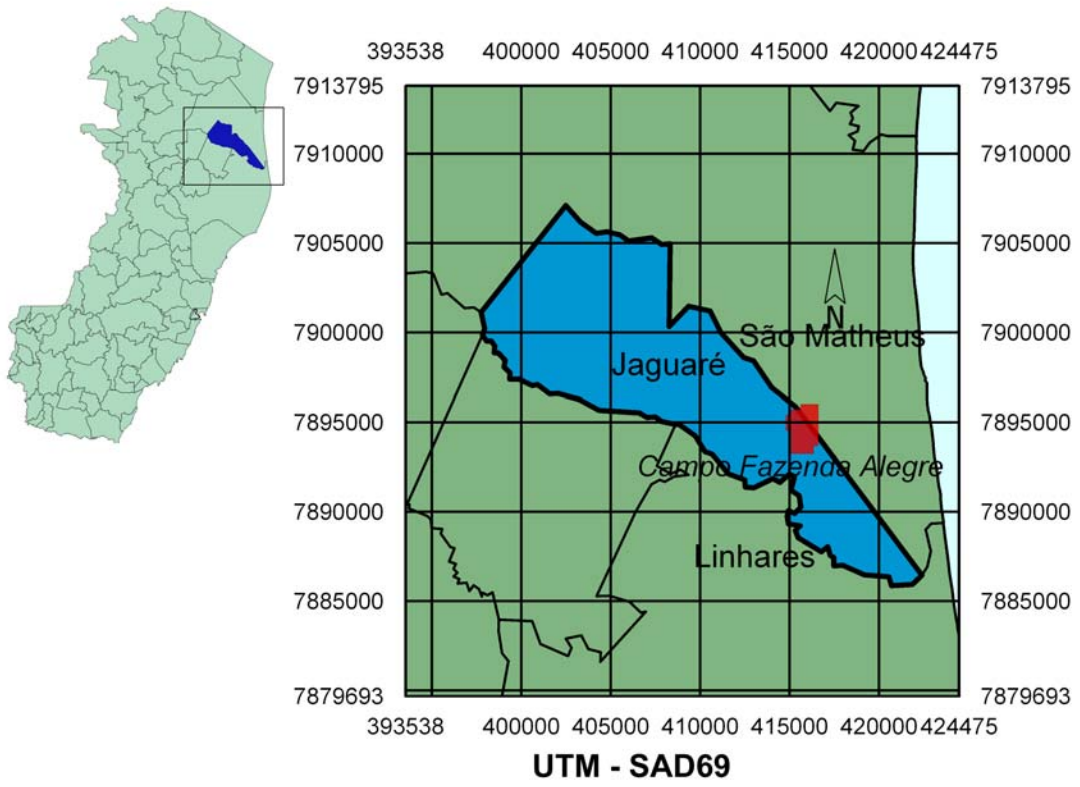


Figura 2 - Mapa do empreendimento no contexto estadual.

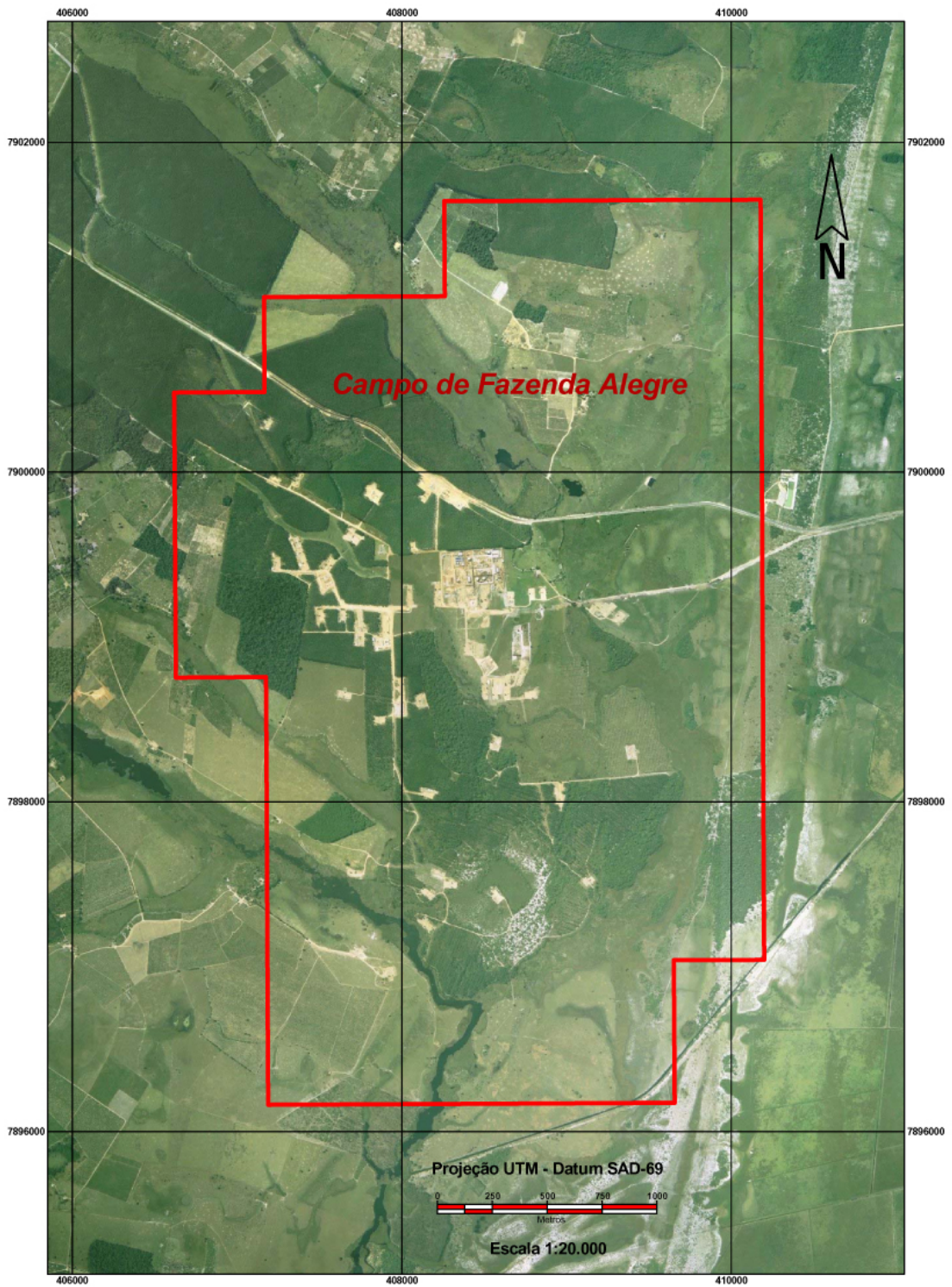


Figura 3 - Limites do Campo de Fazenda Alegre (FAL).

4. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

4.1. CLIMA

O clima predominante no norte do Estado do Espírito Santo é caracterizado como tropical úmido, apresentando a média das temperaturas anuais variando em torno de 23°C. Os índices pluviométricos anuais variam em torno de 1.400 mm.

Em relação às pressões atmosféricas, o litoral do Estado do Espírito Santo, onde se localiza a área de pesquisa, apresenta valores medianos, longe de extremos. Por esta razão, a região pode ser considerada meteorologicamente calma (livre de tufões e furacões, característicos de outras áreas do planeta).

No litoral Sudeste do Brasil, assim como no litoral Sul, há maior constância em relação à precipitação, isto é, na sua distribuição ao longo do ano, e uma maior variação da temperatura no mesmo período faz com que este segundo elemento climático tenha uma maior importância para a definição, pelos habitantes destas regiões, das estações do ano. Daí, os meses de maio a setembro serem considerados os “meses de inverno” (tempo mais frio), enquanto os restantes são considerados os meses da estação quente, “o verão” (TRANSMAR, 2002).

A região Sudeste do país apresenta ainda, a respeito da precipitação, um regime de chuvas tipicamente tropical com um máximo de ocorrência durante o verão e um mínimo durante o inverno.

Para a caracterização climática da região da área de pesquisa (FAL) foram utilizadas as informações de duas estações meteorológicas do Banco de Dados Climáticos do Brasil (EMBRAPA; 2007) nas sedes dos municípios de São Mateus e Linhares (Tabela 1), sendo adotados também os valores de evapotranspiração potencial e real e ainda os valores de déficit e excessos hídricos ali calculados. As séries históricas utilizadas foram de 21 anos para Linhares (1970 a 1990) e 20 anos para São Mateus (1971 a 1990).

São apresentados, a seguir, os valores relativos à temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$), precipitação média mensal (mm), evapotranspiração potencial médio mensal (mm), evapotranspiração real média mensal (mm), déficits (mm) e excessos hídricos (mm), para as duas estações.

Tabela 1 - Características das estações meteorológicas utilizadas na caracterização climática da área de pesquisa

Estação	Município	UF	Coordenadas		Altitude
			UTM N (m)	UTM E (m)	
Linhares	Linhares	ES	7854556,57	387648,91	28 m
São Mateus	São Mateus	ES	7932146,06	410375,54	25 m

4.1.1. Temperatura Média

Para a estação de Linhares, a maior temperatura média corresponde a $26,20^{\circ}\text{C}$ (fevereiro), enquanto a menor a $20,70^{\circ}\text{C}$ (julho) (Gráfico 1).

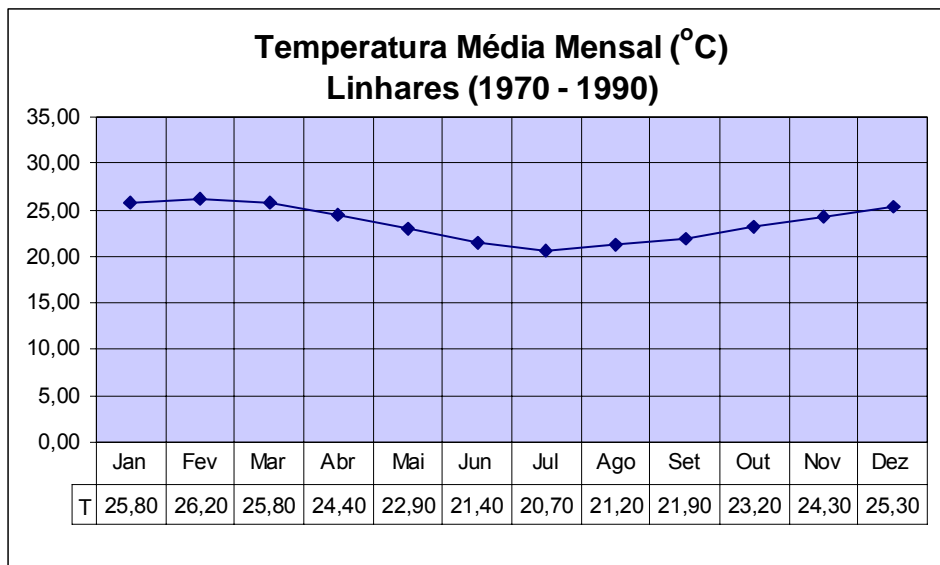


Gráfico 1 - Temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$) para Linhares.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

Para a estação de São Mateus, a maior temperatura média corresponde a 26,20°C, também no mês de fevereiro, enquanto a menor, da mesma forma que para Linhares, no mês de julho corresponde a 21,10 °C (Gráfico 2).

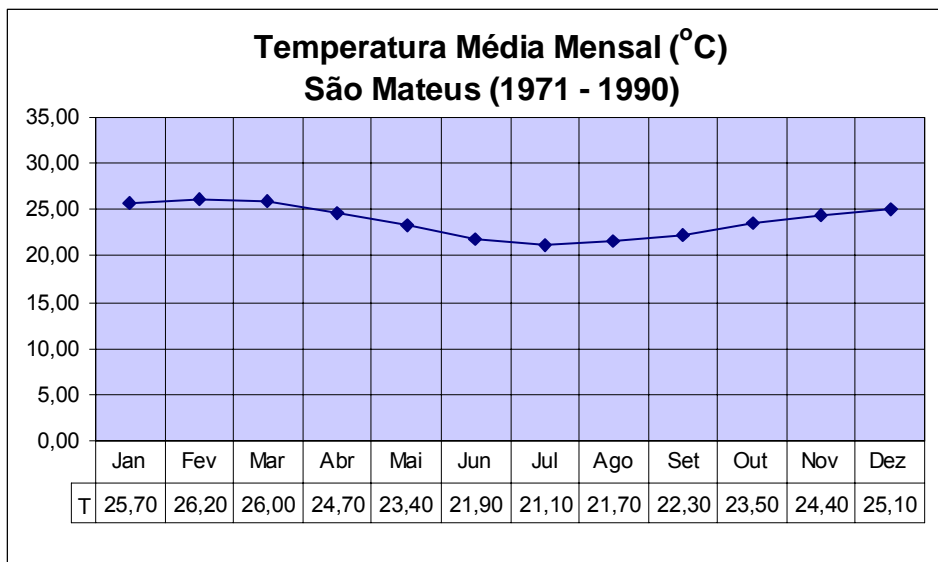


Gráfico 2 - Temperatura média mensal (°C) para São Mateus.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

4.1.2. Precipitação Média Mensal

Para a estação de Linhares, a maior precipitação média corresponde a 190 mm, no mês de dezembro, enquanto a menor, 35 mm, no mês de junho (Gráfico 3).

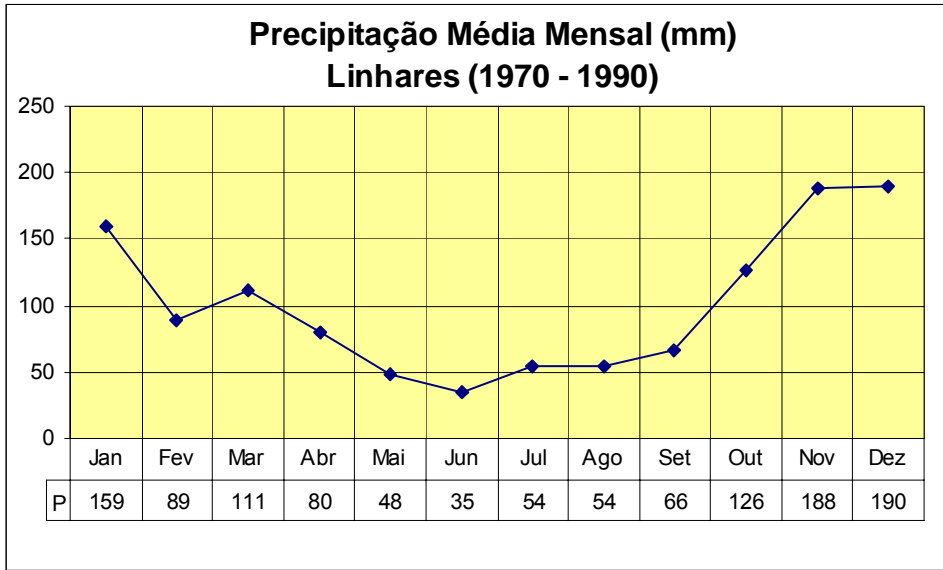


Gráfico 3 - Precipitação média mensal (mm) para a estação de Linhares.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

O Gráfico 4 mostra as distribuições das precipitações médias mensais (mm) e das temperaturas médias mensais (°C) para a mesma estação. Verifica-se coincidência das maiores precipitações com os períodos mais quentes.

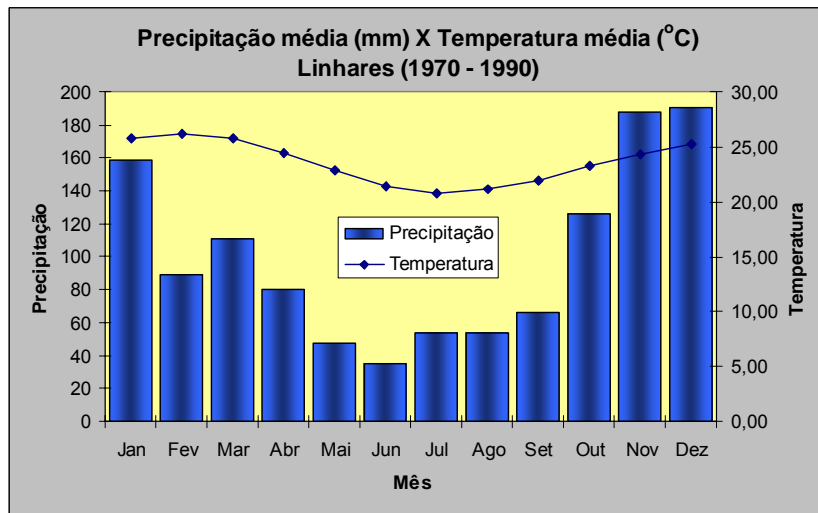


Gráfico 4 - Variação da precipitação média mensal (mm) com a temperatura média mensal (°C) para a estação de Linhares.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

Para a estação de São Mateus, a maior precipitação média corresponde a 164 mm no mês de novembro, enquanto a menor, no mês de junho, a 47 mm (Gráfico 5).

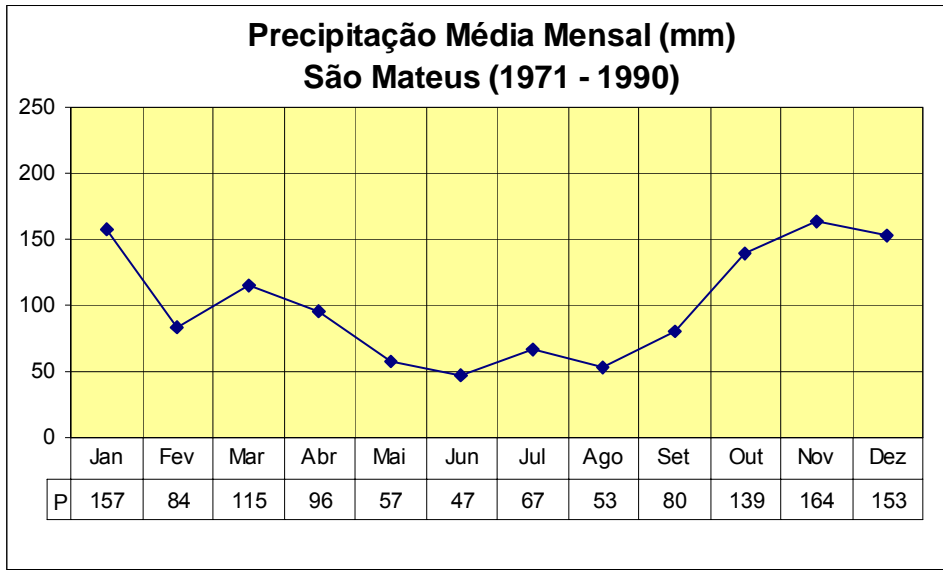


Gráfico 5 - Precipitação média mensal (mm) para a estação de São Mateus.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

O Gráfico 6 mostra as distribuições das precipitações médias mensais (mm) e das temperaturas médias mensais (°C) para a mesma estação, em que se verifica, também, a coincidência das maiores precipitações com os períodos mais quentes.

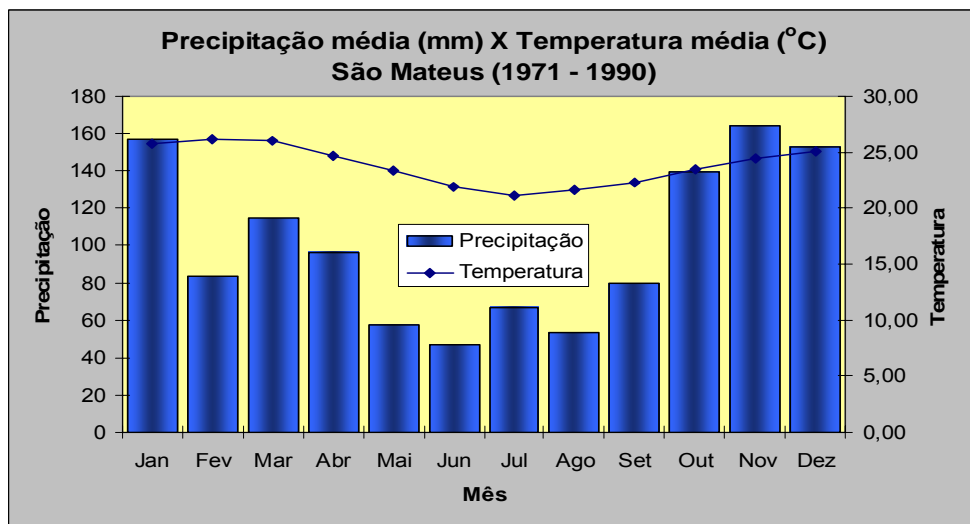


Gráfico 6 - Variação da precipitação média mensal (mm) com a temperatura média mensal (°C) para a estação de São Mateus.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

4.1.3. Média Mensal Evapotranspiração Potencial (ETP) (mm) e Real (ETR) (mm)

Para a estação de Linhares, a maior ETP média corresponde a 139 mm no mês de janeiro, enquanto a menor, a 63 mm (mês de julho) (Gráfico 7).

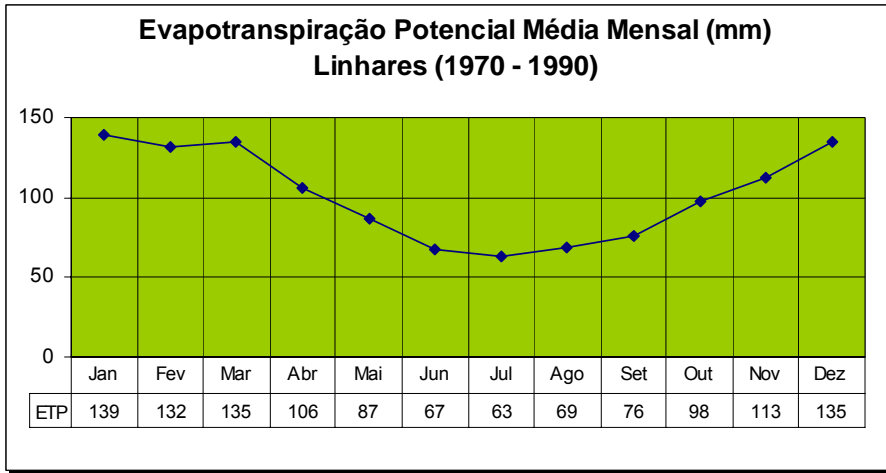


Gráfico 7 - Evapotranspiração potencial média mensal (mm) para a estação de Linhares.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

O Gráfico 8 mostra a distribuição das médias mensais de ETR (mm), com valor máximo de 139 mm, em janeiro, e mínimo de 42 mm, em junho.

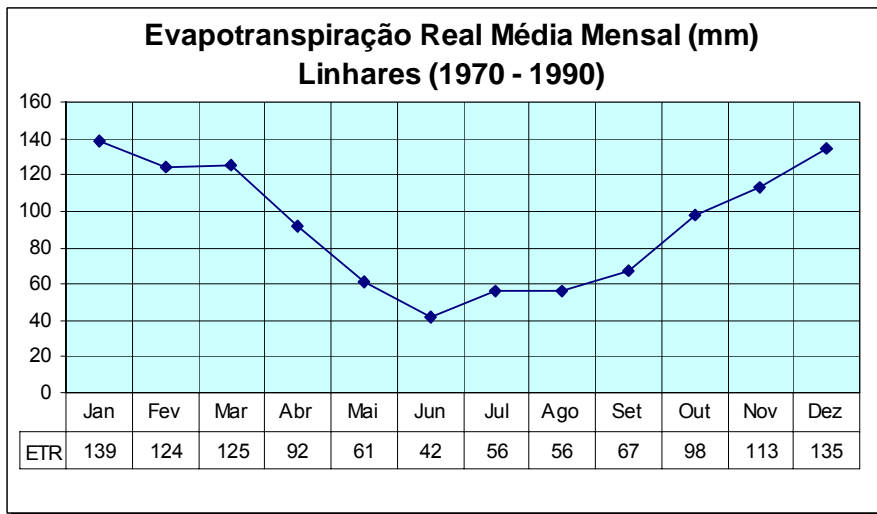


Gráfico 8 - Evapotranspiração real média mensal (mm) para a estação de Linhares.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

Para a estação de São Mateus a maior ETP média corresponde a 138 mm (mês de março), enquanto a menor a 66 mm no mês de julho (Gráfico 9).

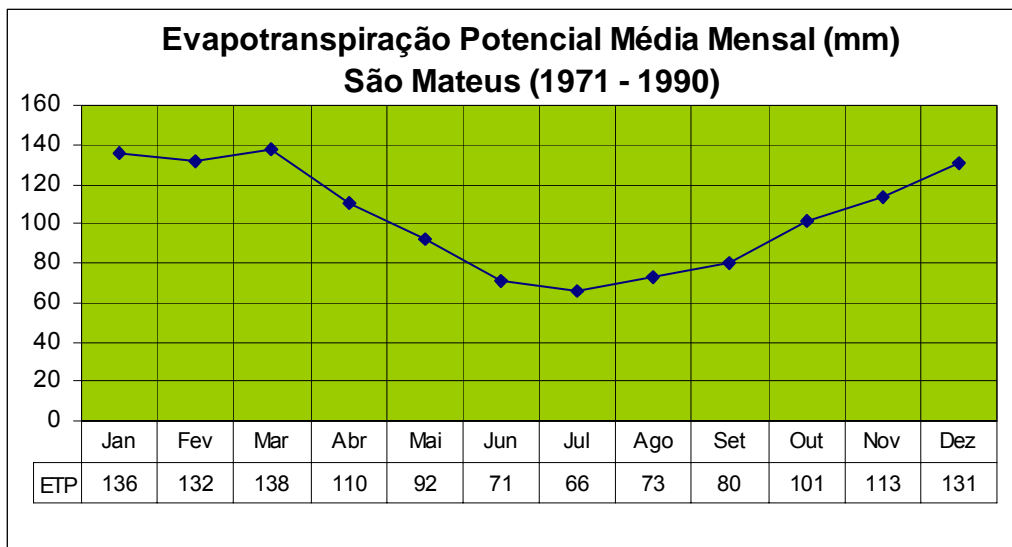


Gráfico 9 - Evapotranspiração potencial média mensal (mm) para a estação de São Mateus.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

O Gráfico 10 mostra a distribuição das médias mensais de ETR (mm), com valor máximo de 136 mm, em janeiro, e mínimo de 53 mm, em junho.

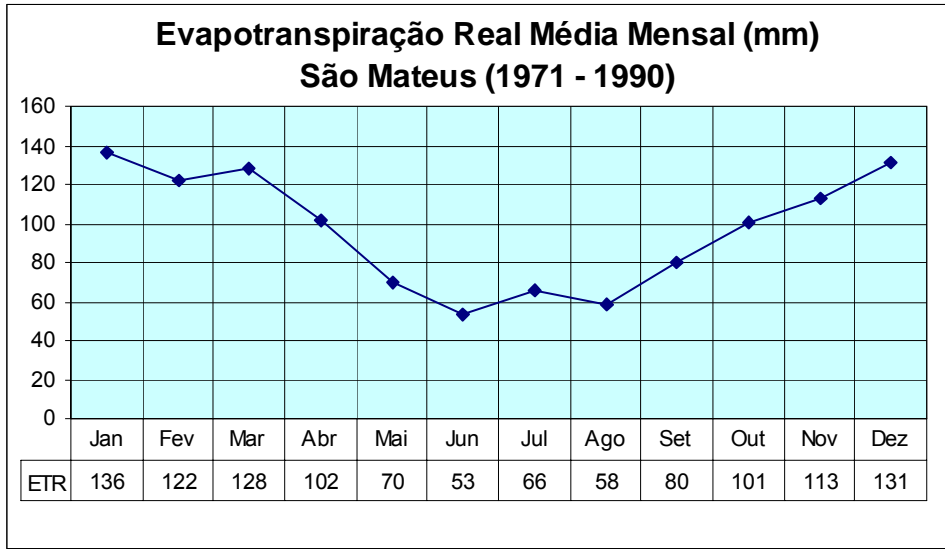


Gráfico 10 - Evapotranspiração real média mensal (mm) para a estação de São Mateus.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

4.1.4. Déficits (mm) e Excessos (mm) Hídricos

Os Gráficos 11 e 12 mostram o balanço hídrico para a estação de Linhares, em que pode ser verificado, principalmente, no período de novembro a janeiro com excedente hídrico, com máximo no mês de dezembro (55 mm), e o período de fevereiro a setembro com déficit hídrico com máximo negativo no mês de maio (-27 mm).

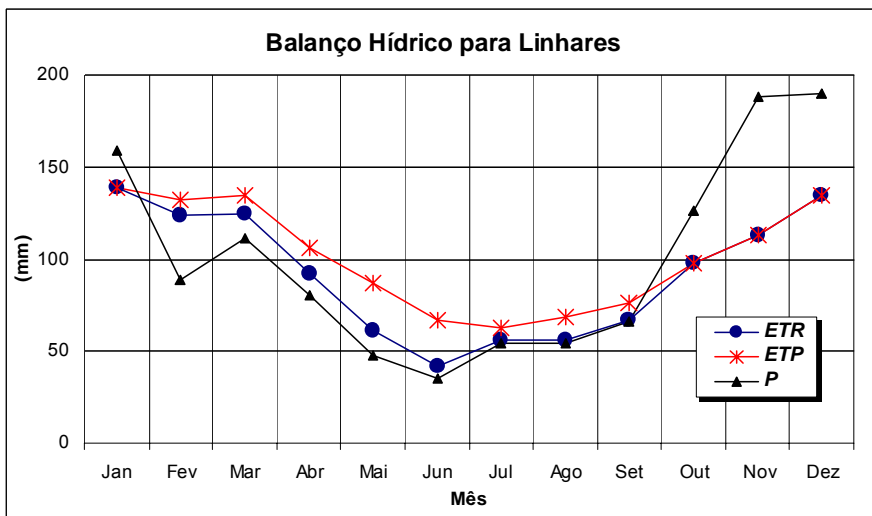


Gráfico 11 - Balanço hídrico para Linhares mostrando as curvas de P, ETP e ETR.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

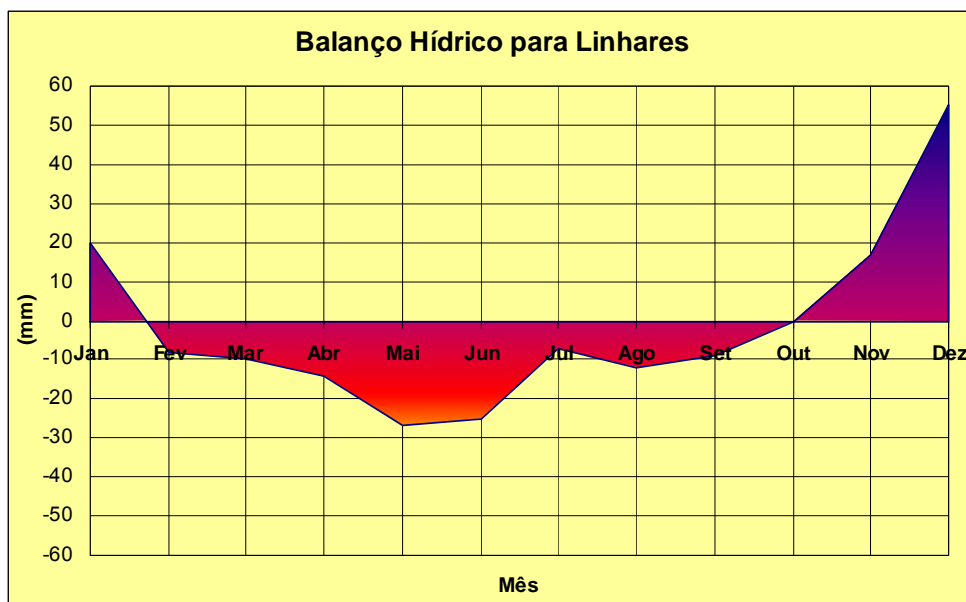


Gráfico 12 - Balanço hídrico para Linhares mostrando os períodos de déficit e excedente hídrico.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil (2007).

Os Gráficos 13 e 14 mostram o balanço hídrico para a estação de São Mateus, em que pode ser verificado, principalmente, o período de novembro a janeiro com excedente hídrico (coincidente com a estação de Linhares), com máximo no mês de dezembro (22 mm), e o período de fevereiro a setembro com déficit hídrico com máximo negativo no mês de maio (-23 mm).

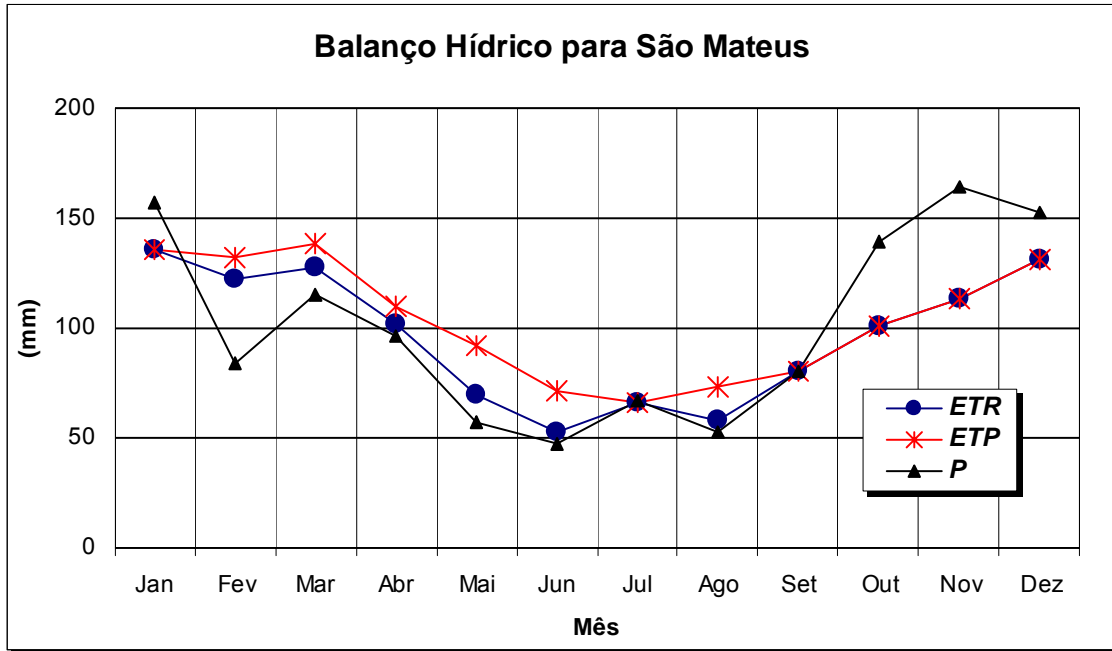


Gráfico 13 - Balanço Hídrico para São Mateus mostrando as curvas de P, ETP e ETR.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

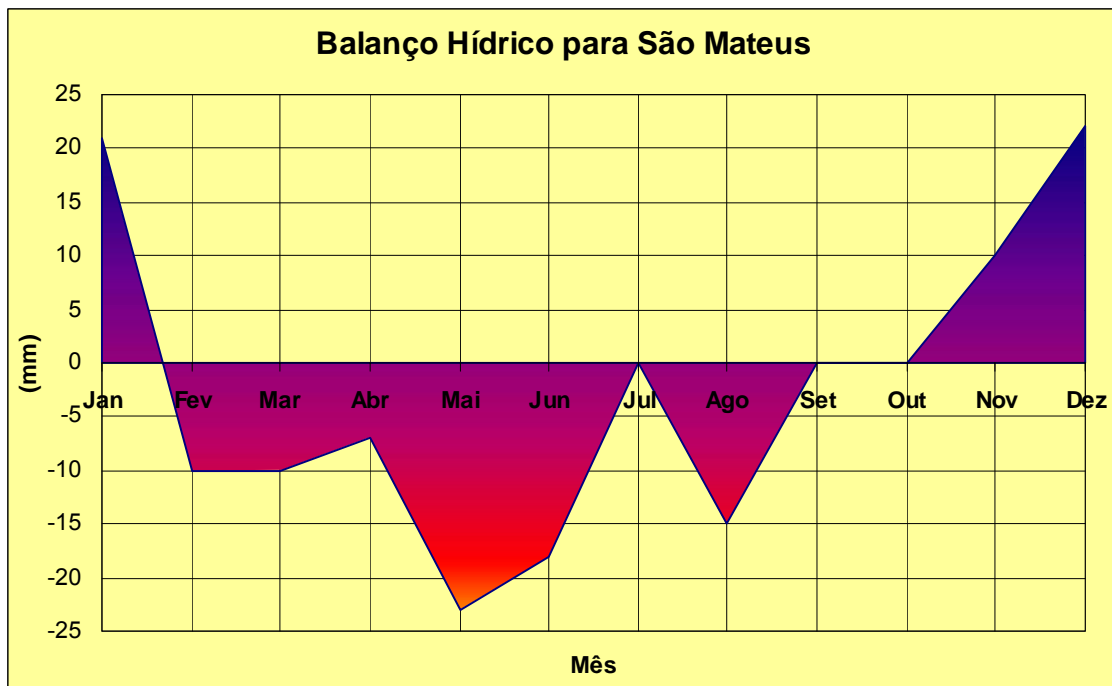


Gráfico 14 - Balanço Hídrico para Linhares mostrando os períodos de déficit e excedente hídrico.

Fonte: Banco de Dados Climáticos do Brasil.

O resultado do balanço hídrico calculado para a região de pesquisa (FAL) mostra, então, que os meses principais para recarga dos aquíferos locais são

aqueles coincidentes com os denominados “meses da estação quente”, correspondendo ao período com início em outubro e fim em janeiro. A inexistência de dados de monitoramento dos níveis estáticos dos aquíferos da região impossibilita uma análise do tempo de resposta a estas chuvas na elevação (recarga) dos níveis localizados de água subterrânea.

4.2. RELEVO, GEOMORFOLOGIA E VEGETAÇÃO

As feições geomorfológicas da parte emersa da Bacia do Espírito Santo fazem parte do “Domínio dos Depósitos Sedimentares” (TRANSMAR, 2002), e se caracterizam pela ocorrência de sedimentos da Formação Barreiras e de ambientes de planícies litorâneas, depositados sobre o embasamento cristalino durante a Era Cenozóica. Duas unidades geomorfológicas são características: os Tabuleiros Costeiros e as Planícies Litorâneas, dispostas em uma faixa de direção norte-sul, ocupando as costas norte do Espírito Santo e do extremo sul da Bahia (Figura 4).



Figura 4 - Campo de Fazenda Alegre – limite entre os Tabuleiros Costeiros e a Planície Litorânea.

Os Tabuleiros Costeiros estão posicionados entre as Planícies Costeiras e as Chãs Pré-Litorâneas (essas últimas modeladas sobre as rochas cristalinas) e

ocupa uma faixa com largura variável entre 20 e 120 km, apresentando altitudes entre 10 e 100 m.

Eles se caracterizam por dominância de feições aplainadas que representam a superfície de deposição dos sedimentos da Formação Barreiras no Terciário Superior e estão parcialmente conservadas, embora submetidas à dissecação fluvial com diferentes níveis de aprofundamento dos vales, que variam desde 6 a 8 m até 45 a 60 m.

Esses vales são largos e de fundo chato, preenchidos por aluviões, onde os cursos d'água divagam formando meandros. Eles separam interflúvios de topos tabulares e marginalmente escarpados, o que caracteriza a feição do tipo tabuleiro (TRANSMAR, 2002).

A passagem dos tabuleiros para as planícies, isto é, das áreas de dissecação para as de deposição, algumas vezes é suave e transicional, e outras vezes são bruscas e marcadas por uma linha de paleofalésias de pequeno desnível. Quando os tabuleiros chegam ao mar, são limitados por falésias vivas, solapadas na base por ondas.

As Planícies Litorâneas ocorrem ao longo de toda a costa, entre o oceano e os Tabuleiros Costeiros, e englobam modelados marinhos, lagunares, fluviais e, mais restritamente, eólicos, que retratam diversas fases de evolução geomorfológica durante o Quaternário, resultantes de flutuações do nível do mar relacionadas a períodos glaciais e interglaciais (TRANSMAR, 2002).

Segundo o Mapa de Avaliação do Relevo (IBGE, 1987), as classes encontradas na área da FAL são as T1 e I2, sendo a classe I3 ainda encontrada nas proximidades.

- **Classe T1**

Balanço morfogênese/pedogênese em equilíbrio. Predomínio dos processos de ablação em consequência do escoamento superficial com fraca densidade (1), caracterizando um estágio de transição.

Rampas modeladas em forma de lombas inclinadas para o mar local mergulhando sob as áreas deltaicas com algumas dezenas de depressões circulares e inclinação muito fraca (2° a 5°), seccionadas por vales largos, profundos e colmatados.

A grande umidade da faixa litorânea favorece o desenvolvimento da Floresta Ombrófila Densa, atualmente preservada em algumas áreas.

- **Classe I2**

Predomínio da morfogênese. Atuação dos processos marinhos e fluvio-marinhos, considerados com intensidade moderada (2), favorecendo a instabilidade.

Na área de “Domínio dos Depósitos Sedimentares”, ocorrem nela duas grandes unidades geomorfológicas distintas: Tabuleiros Costeiros e Planície Litorânea.

A área caracteriza-se pelas feições aplainadas dos tabuleiros, desenvolvidas sobre os sedimentos da Formação Barreiras. Em seu limite leste, onde se localiza o campo de Fazenda Alegre, ela transaciona para a planície através de formas convexas com declividades suaves. A altitude máxima dela é próxima de 30 m, estando o campo em cota intermediária entre essa e a da planície.

Em continuidade para leste, ocorre a planície, que inicia com uma área baixa ao longo do Riozinho, constituindo um modelado fluvio-paludal. Esta é seguida por um terraço arenoso marinho pleistocênico, disposto em uma faixa norte-sul, onde não são bem evidentes as estruturas de cordões litorâneos. Nela,

novamente as cotas têm elevação, com altitudes da ordem de 7 a 10 m (Figura 5).



Figura 5 - Declives suaves – terraço Marinho Pleistocênico com exploração de areia.

As planícies de acumulação e terraços marinhos e fluvio-marinhos, localmente em contato com falésias, contêm restingas e cordões, dunas, marcas de antigos canais e meandros, lagunas e áreas deprimidas com ocorrência de manguezais. Possuem ainda sedimentos contínuos inconsolidados de textura arenosa, areno-argilosa e argilo-arenosa, sustentando vegetação marinha arbórea arbustiva e herbácea.

- **Classe I3**

Predomínio da morfogênese. Atuação dos processos fluviais de intensidade forte (3), apoiando a instabilidade.

Várzeas e terraços fluviais, fluviolacustres e complexos fluviocoluviais, apresentando declividade fraca (0° a 2°). Formações superficiais de textura arenosa, areno-argilosa e argilosa, além de coluviões de textura variável, incluindo localmente seixos e blocos.

Predomínio da vegetação fluvial herbácea, localmente representada por associações de cultivo de pastagens. Contém solos adequados para cultivos temporários, porém com problemas de inundação.

4.3. SOLOS

Na área de FAL, podem ser encontrados os solos do tipo Podzólico Amarelo Álico e distrófico (PAad3), Podzólico Hidromórfico Álico (HPa1) e Areias Quartzosas Marinhas Hidromórficas e não Hidromórficas (AMa1), sendo que o primeiro se destaca por se mostrar presente em quase toda a área de pesquisa. Nas proximidades, ainda pode ser encontrado o solo do tipo Areias Quartzosas Marinhas álicas (AMa2) (Figura 6).

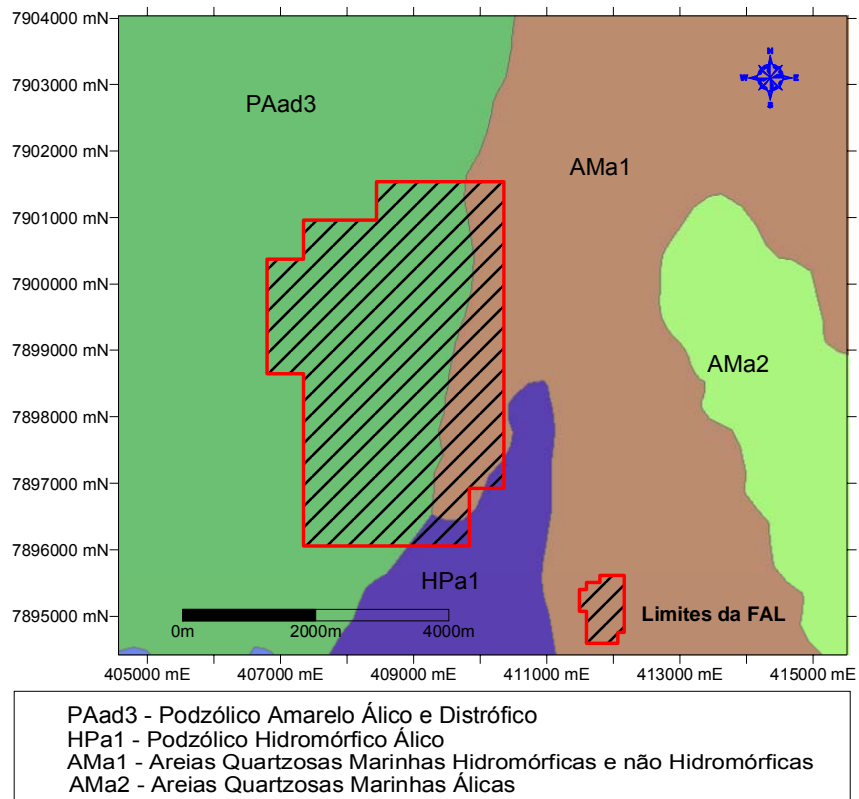


Figura 6 - Solos na FAL e proximidades.

Fonte: Banco de dados do lema (2007).

Segundo relatório de estudo de impacto ambiental de empreendimento localizado na região (TRANSMAR, 2002), por se tratar de sedimentos com diferentes composições, verifica-se que, na região, existe uma forte inter-relação entre o material de origem e o tipo de solo.

Na área de tabuleiros, predominam solos com horizonte B textural, Podzólico Amarelo.

Na planície quaternária, devido à presença de água muito superficial e de áreas alagadas, ocorrem solos sem horizonte B. Nas áreas de sedimentos arenosos marinhos, ocorrem Areia Quartzosa Marinha Álica, Areia Quartzosa Marinha Hidromórfica e não Hidromórfica e Podzólico Hidromórfico.

Os Podzólicos Amarelos são solos superficialmente arenosos, de cor clara e apresentam horizonte B textural, acompanhado por uma diminuição nos teores de areia total, ocorrendo diferença textural abrupta a cerca de 25 a 30 cm de profundidade.

São solos que apresentam baixíssima fertilidade natural, alto grau de distrofismo, baixo pH e baixíssima capacidade de troca catiônica em todo seu perfil, exigindo correção do pH e da concentração de nutrientes para sua utilização econômica.

As areias quartzosas marinhas ocorrem nas áreas dos terraços arenosos marinhos holocênicos e pleistocênicos, ocupando, portanto, extensas áreas na região. São solos que apresentam seqüência de horizontes A sobre C, com variação de cor expressiva apenas entre esses dois horizontes, apresentando textura arenosa, excessivamente drenados, com permeabilidade rápida em todo o perfil, consistência solta e geralmente com horizonte A fraco ou moderado.

Os solos hidromórficos são desenvolvidos em áreas com nível hidrostático próximas à superfície e em áreas alagadas, pelo menos em certas épocas do ano. Este fato é evidenciado pela acumulação de matéria orgânica na

superfície ou por cores acinzentadas nos horizontes de sub-superfície, indicando ambiente redutor.

Os Podzólicos-Hidromórficos são solos que apresentam horizonte B podzol ou spódico, caracterizando-se pela acumulação iluvial de matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio, por translocação a partir do horizonte superficial. São formados a partir de material essencialmente arenoso, apresentam fraco gradiente textural entre A e B e cor escura cinzenta em B e A fraca a moderada.

Os compostos iluviados agem como cimentantes, imprimindo certo grau de dureza a B, chegando a torná-lo muito impermeável.

As Areias Quartzosas Hidromórficas ocorrem nas áreas de cotas mais baixas dos depósitos arenosos marinhos e áreas arenosas lagunares, onde a presença constante de água promoveu o hidromorfismo, gerando horizonte A com elevados teores de matéria orgânica, geralmente húmico ou pouco húmico sobre horizonte C arenoso.

4.4. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS

A área de pesquisa está localizada, segundo o mapa de bacias hidrográficas do Instituto Jones dos Santos Neves (2007), na bacia hidrográfica do Rio Doce (Figura 7), a qual, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), está situada na região sudeste, compreendendo uma área de drenagem de cerca de 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante, ao Estado do Espírito Santo.

No Estado do Espírito Santo, esta bacia limita-se, ao norte, com a bacia do rio São Mateus, ao leste, com o Oceano Atlântico e, ao sul, com as bacias dos rios Riacho, Reis Magos, Santa Maria da Vitória e Itapemirim.

Ainda segundo a ANA, o rio Piranga é considerado o principal formador do rio Doce, que recebe este nome quando do encontro do rio Piranga com o rio do Carmo. O rio Piranga nasce nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, limites oeste e sul da bacia, no município de Ressaquinha, em Minas Gerais, e o rio do Carmo nasce no município de Ouro Preto.

Suas águas percorrem cerca de 853 km desde a nascente até o oceano Atlântico, no povoado de Regência, no Estado do Espírito Santo.

Segundo o mapa de bacias hidrográficas da parte norte do Estado do Espírito Santo do Instituto Estadual do Meio Ambiente (IEMA), a área de pesquisa está localizada nas bacias do rio Doce (cerca de 75% da sua área) e do Quaternário (cerca de 25% de sua área) (Figura 7).

Na área de Fazenda Alegre (FAL) e, ainda segundo o IEMA, podem ser encontradas as seguintes principais drenagens (Figura 8):

- Riacho Riozinho – ocorre na parte nordeste da FAL e deságua no riacho palmito;
- Riacho Palmito – com direção NW-SE, corta todas as porções centro-norte e centro-leste, flexionando para a direção SE-NW na porção sudeste da FAL, desaguardo no córrego água limpa ao sul da área;
- Córrego Água Limpa – com direção NW-SE até a porção sul da FAL onde apresenta uma flexão para SW recebe as águas do riacho palmito e córrego mosquito;
- Córrego Mosquito – corta a área de NW para SE na porção sudoeste da área e deságua no córrego Água Limpa.

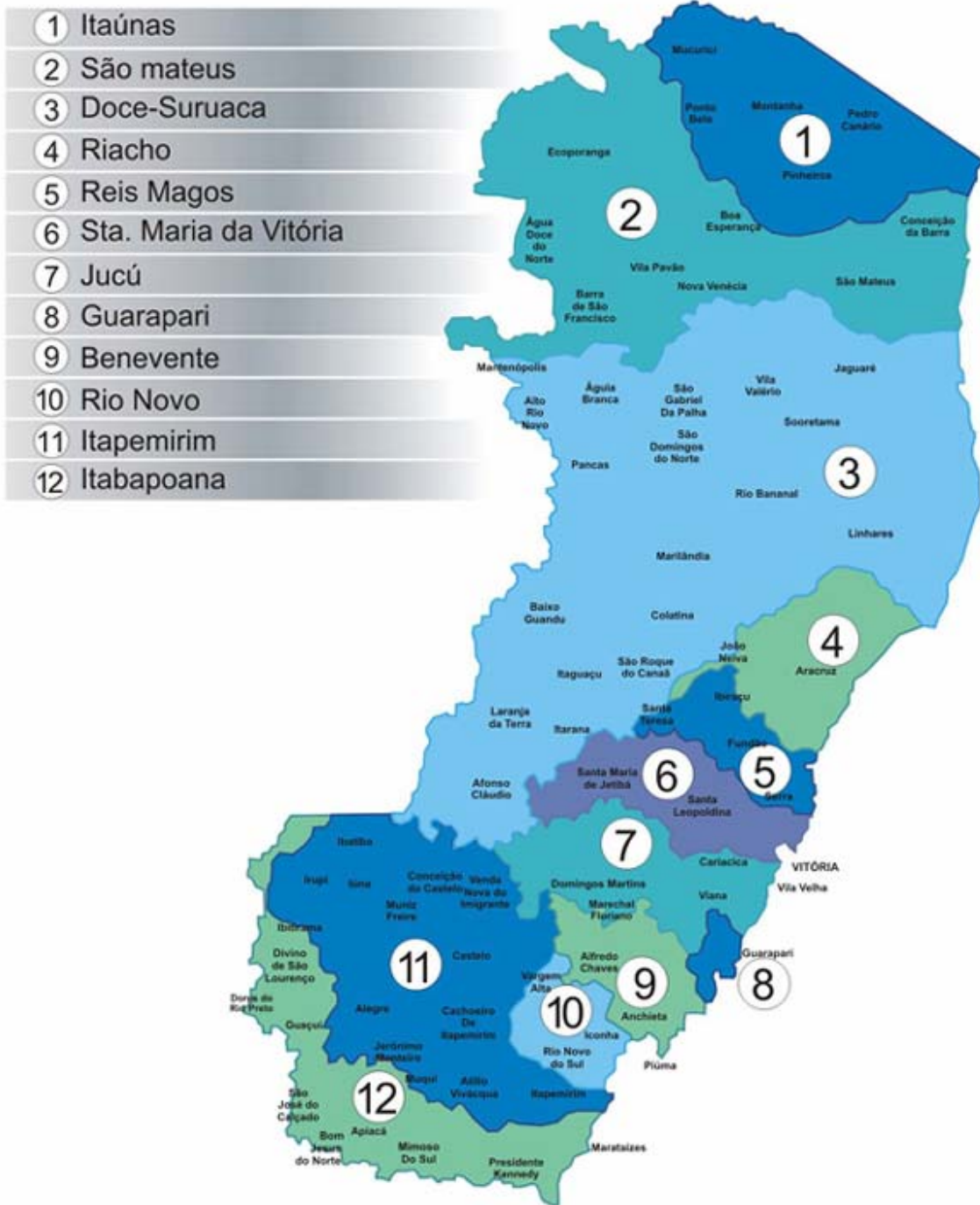


Figura 7 - Bacias Hidrográficas do Estado do Espírito Santo.
Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

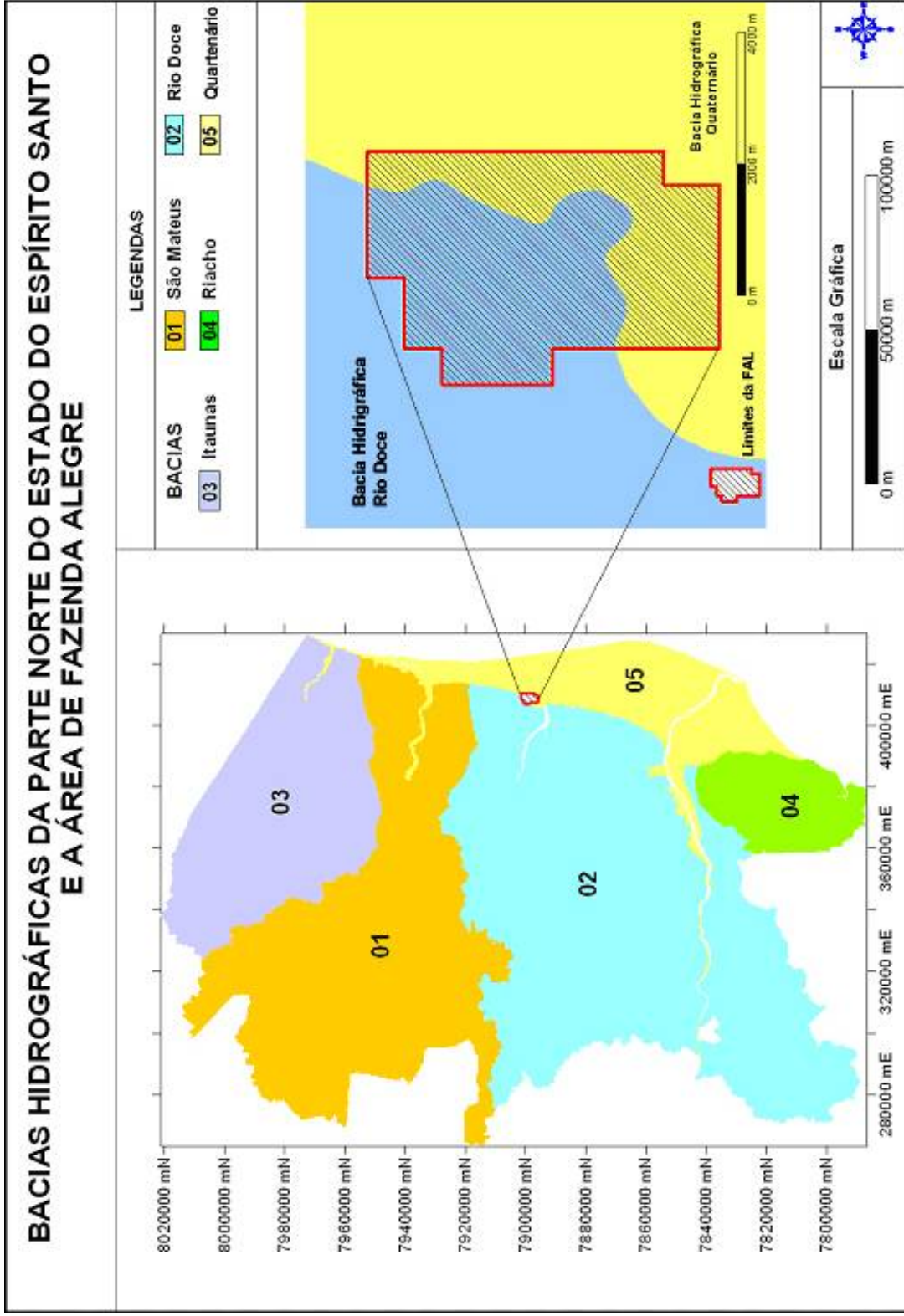


Figura 8 - Detalhe das Bacias Hidrográficas do Estado do Espírito Santo.

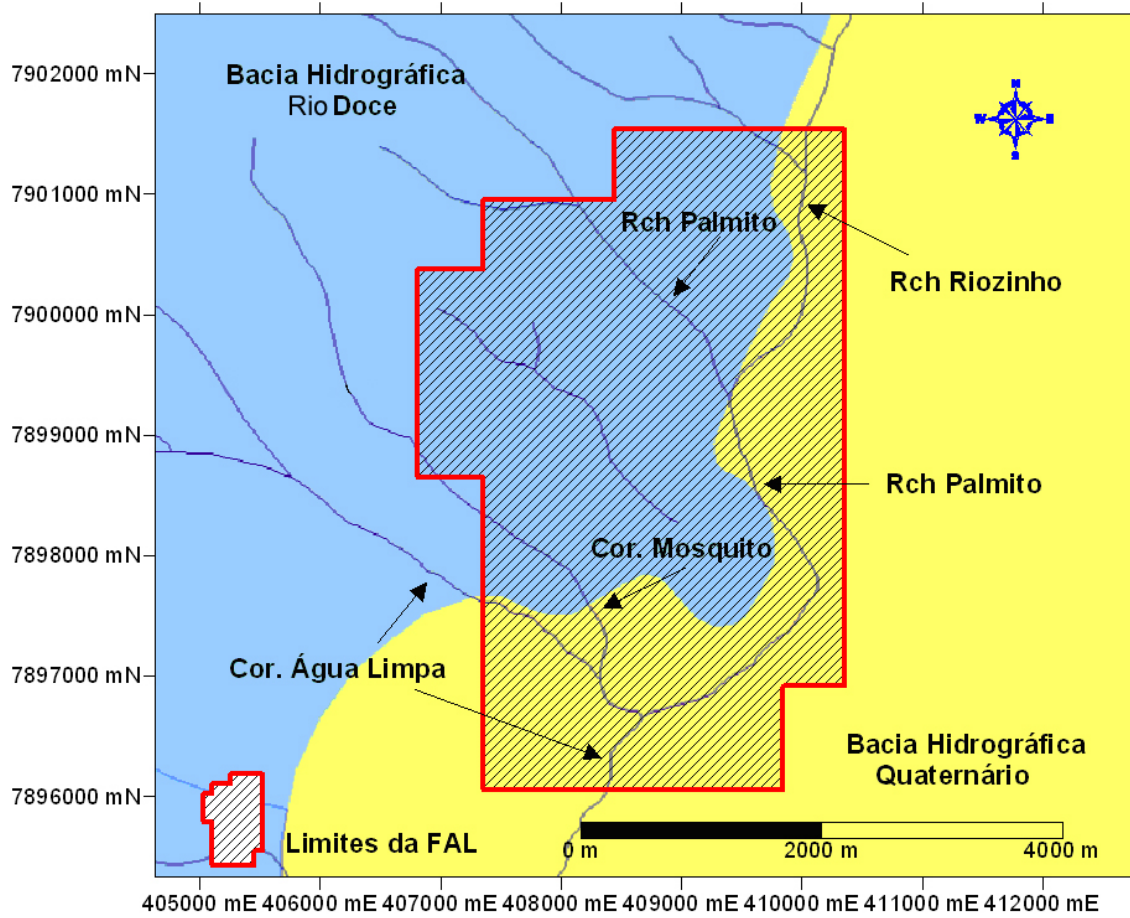


Figura 9 - Detalhe da drenagem na Fazenda Alegre.

Fonte: Banco de dados do lema (2007).

4.5. RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

O “Projeto Hidrogeologia do Centro de Minas Gerais e Norte do Estado do Espírito Santo” (COSTA, 1980) é reportado como sendo um dos primeiros estudos visando especificamente ao conhecimento hidrogeológico do Estado do Espírito Santo, sendo executado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil – em convênio com o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM).

Outra importante intervenção, para entendimento das disponibilidades dos recursos hídricos subterrâneos, ocorreu na parte norte do Estado ao final do ano de 1999, através do cadastramento de poços tubulares pela CPRM. Este trabalho gerou um banco de dados cujo grande mérito é o conhecimento da localização dessas obras em campo e do resgate das informações existentes no que diz respeito às suas características construtivas e de exploração.

Vale ressaltar que a grande maioria dos poços cadastrados não possui registradas todas as informações necessárias para uma análise conclusiva e real do verdadeiro potencial daquela região. Entretanto, é possível, através do processamento daquelas informações, ter uma boa visão geral da potencialidade das áreas de cristalino e de sedimento e da situação das obras naquele período.

O banco de dados de poços, portanto, se caracteriza, embora com uma defasagem de mais de sete anos, como a referência mais precisa e atual disponível de forma organizada para entendimento das características hidrogeológicas da parte norte do Estado, merecendo ser atualizado de forma a permitir uma definição de política de gestão voltada às águas subterrâneas.

A geologia da parte norte é constituída por rochas do embasamento cristalino e por sedimentos de idades mais recentes.

Nas primeiras, a ocorrência de água subterrânea está condicionada à existência de fraturas, que devem apresentar particularidades que implicam na

maior ou menor capacidade de armazenamento de água, tais como abertura, rugosidade das paredes e preenchimento.

A abertura é a medida de separação média entre as paredes de uma fratura, sendo de importância fundamental para as questões de infiltração e armazenamento de água.

A rugosidade das paredes pode ser definida como a distância entre duas linhas paralelas à linha média e que tangencia a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda, e depende da origem da fratura e da granulometria, mineralogia e alteração da rocha. A rugosidade de uma fratura influencia diretamente a condutividade hidráulica, podendo acarretar perdas elevadas de carga quando a água tende a circular acompanhando o relevo da parede da fratura.

Com relação ao preenchimento, as fraturas podem apresentar-se parcial ou totalmente preenchidas por fragmentos da própria rocha, por detritos de origem superficial que podem penetrar em meio aquoso decantando no interior da fratura, por recristalização de sais ou por ascensão de soluções hidrotermais mineralizantes. É lógico que quanto mais material existente preenchendo a fratura, piores as condições de armazenamento e fluxo da água no meio.

Podem ser citados, ainda, como principais características de sistemas de fraturas para água subterrânea, o tamanho das fraturas, o espaçamento, a interconexão, o mergulho e a cobertura de solo.

Depósitos armazenadores de água subterrânea desse tipo são definidos como “aqüíferos descontínuos”.

As rochas sedimentares, por sua vez, são caracterizadas por uma fase sólida, constituída por grãos de natureza petrográfica, forma e dimensões muito variadas e que apresentam espaços vazios de pequenas dimensões, definidos como poros ou interstícios (Figura 10), que são ocupados por líquidos ou gases: água, ar ou vapor de água.

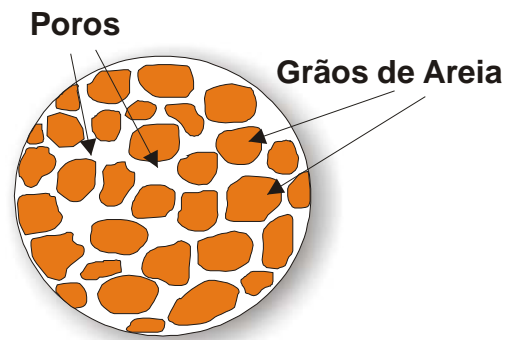


Figura 10 - Poros ou interstícios em sedimentos.

Fonte: Adaptado de Leite (2000).

Segundo Leite (2000), a maior ou menor potencialidade desse tipo de aquífero depende, principalmente, do percentual de vazios da matriz da rocha (porosidade total) e da conectividade entre eles (permeabilidade). Muitas vezes esses poros podem ser preenchidos por material ("cimentação") que diminui o volume de vazios (Figura 11) e algumas vezes por material fino que podem tornar a rocha totalmente impermeável (Figura 12).

Considerados em conjunto, os arenitos são, sem dúvida, os melhores aquíferos, fornecendo mais água que todos os demais aquíferos reunidos, em função de, além da sua larga distribuição, das suas boas características de armazenamento e permeabilidade. Outros aquíferos sedimentares importantes são as areias e os cascalhos.

Por originarem-se principalmente de materiais oriundos de outras rochas, as características dos aquíferos sedimentares dependem principalmente do tipo da rocha matriz, do modo de transporte, da distância da fonte ao ambiente de deposição e do ambiente de sedimentação.

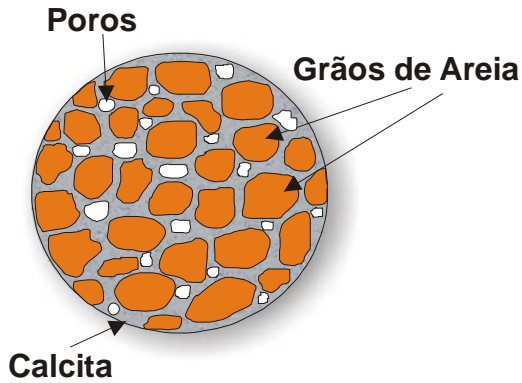


Figura 11 - Sedimento semi-impermeabilizado por calcita.

Fonte: Adaptado de Leite (2000).

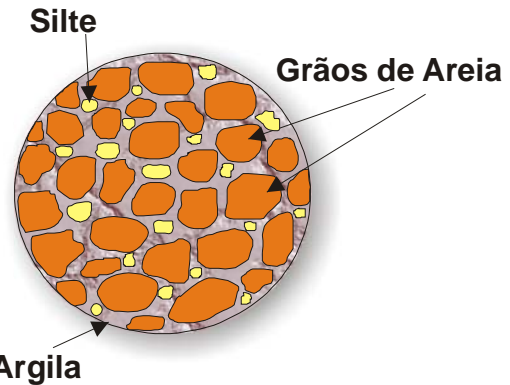


Figura 12 - Sedimento impermeabilizado por silte e argila.

Fonte: Adaptado de Leite (2000)

Os aquíferos contínuos podem ainda ser classificados em função da pressão a que está submetida à água, em freáticos ou livres, confinados e semiconfinados (Figura 13).

Nos aquíferos do tipo livre, a forma da superfície superior da zona de saturação, ou do aquífero, é denominada de superfície do lençol (*water table*). Depende da topografia do terreno, em parte, tendendo, em geral, a acompanhar a conformação da superfície do solo.

Na superfície do lençol, a água nos poros do aquífero se encontra sob pressão atmosférica como se estivesse em um reservatório ao ar livre, e nessas condições o aquífero é denominado de lençol de superfície livre, lençol freático ou aquífero livre. A pressão hidráulica em determinado ponto do lençol freático é igual a sua profundidade, medida da superfície livre até o ponto em questão, podendo ser expressa pela coluna de água, ou pressão hidrostática, em metros.

Quando um aquífero se encontra entre duas camadas impermeáveis ele se encontra confinado. Pelo fato de a camada confinante superior ser impermeável, a água se encontra sob uma pressão maior que a pressão atmosférica, sendo o aquífero denominado de aquífero confinado ou água subterrânea confinada.

Quando um poço é perfurado através da camada superior confinante atingindo o aquífero, a altura da água no poço representa a pressão a que se encontra submetida à água no aquífero (um poço é dito artesiano ou jorrante quando a pressão se encontra, localmente, acima da superfície do solo). A pressão hidrostática em determinado ponto do aquífero expressa em metros de água; é igual à distância vertical desse ponto àquele nível.

Quando um aquífero se encontra entre duas camadas totalmente impermeáveis, ele está confinado. Quando uma das camadas, entretanto, não é totalmente impermeável, se diz que o aquífero é semi-confinado.

Para identificação dos poços tubulares cadastrados em ambiente cristalino (meio descontínuo) e sedimentar (meio contínuo) foi considerada a informação, do banco de poços da CPRM, de “porosidade”, que naquele banco consta como “fraturado” (cristalino), “granular” (meio contínuo) e “granular/fraturado” (misto de meio descontínuo e contínuo). Dessa forma, 79 poços não possuem esse tipo de informação, 181 foram encontrados em meio descontínuo, 527 em meio contínuo e 12 em ambiente misto (Tabela 2, Figuras 14 e 15)

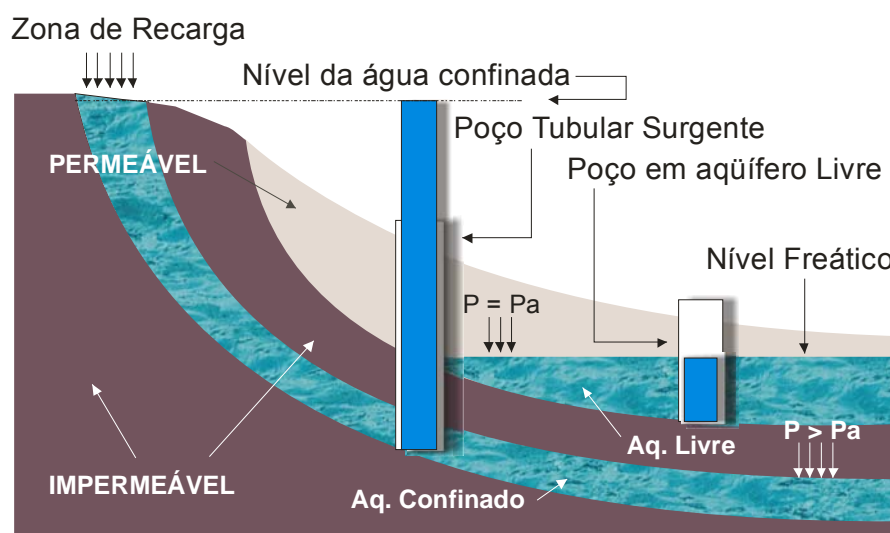


Figura 13 - Poços tubulares captando água de aquífero livre e aquífero confinado.

Tabela 2 - Poços do Banco de Dados da CPRM em cristalino, sedimento e ambiente misto

Tipo de Aquífero / Meio	Número de Poços
Sedimento/Contínuo	527
Cristalino/Descontínuo	181
Cristalino – Sedimento/Misto	12
Sem Informação	79
Total	799

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000)

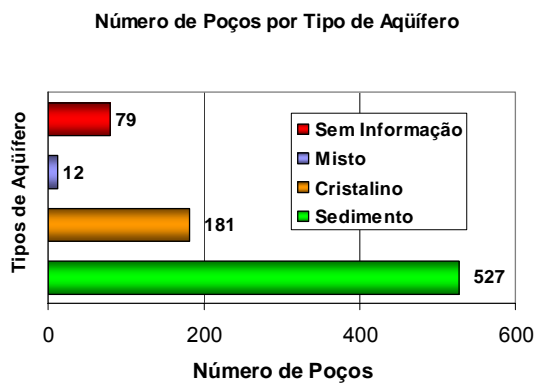


Figura 14 - Número de poços por tipo de aquífero.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

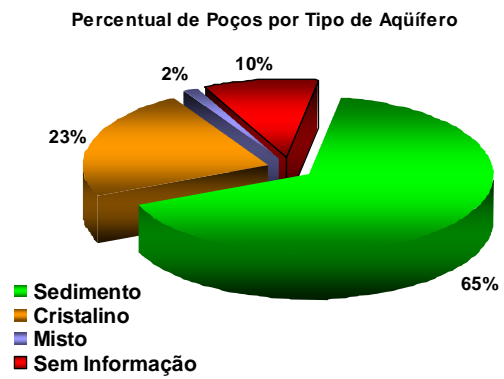


Figura 15 - Percentual de poços por tipo de aquífero.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

Com relação à profundidade, não existe uma padronização universal de caracterização de poços como rasos, medianamente profundo ou profundo. Neste caso, será utilizada a classificação da Tabela 3, visto que já é utilizada por pelo menos uma secretaria de Estado, no caso a Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, para efeito de licenciamento de obras dessa natureza.

Tabela 3 - Classificação de poços com relação à profundidade de perfuração

Profundidade	Classificação do Poço
Até 20 m	Poço raso
De 20 m até 50 m	Poço medianamente profundo
Acima de 50 m	Poço profundo

A Figura 16 mostra a distribuição dos poços tubulares por tipo de aquífero na porção norte do Estado e os poços cadastrados pela CPRM, na época, próximos à área de Fazenda Alegre (FAL).

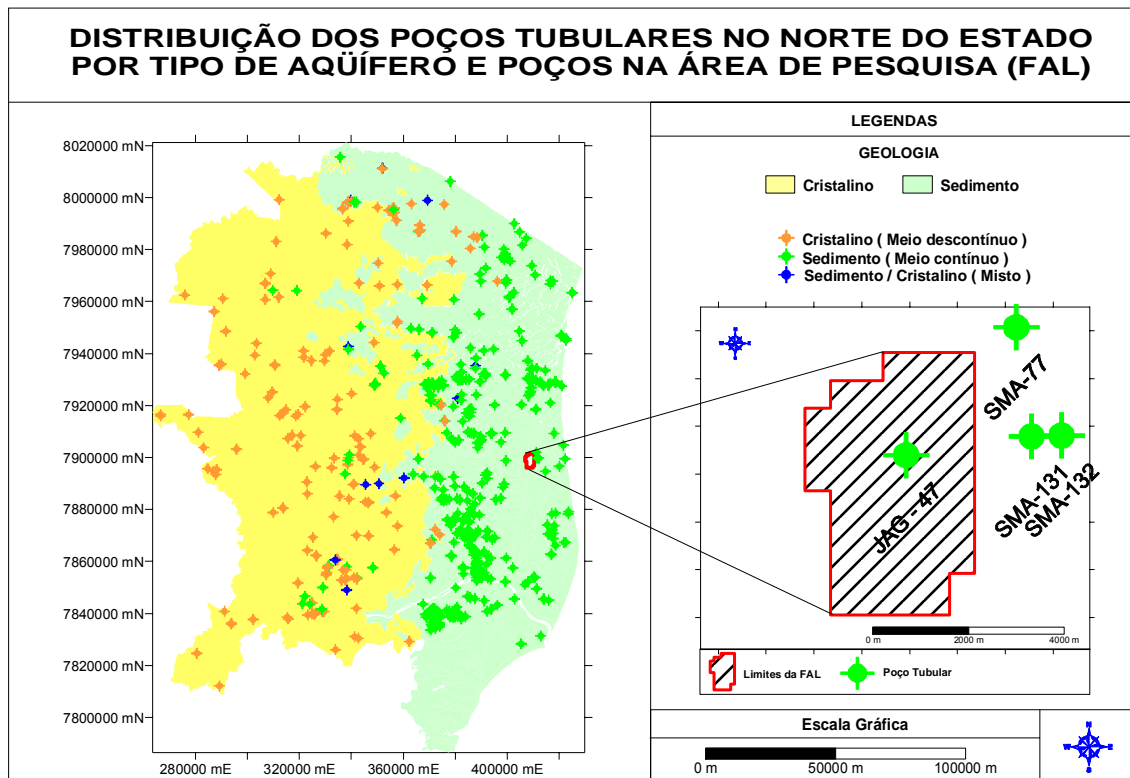


Figura 16 - Poços no norte do Espírito Santo por tipo de aquífero e poços cadastrados pela CPRM próximos a FAL.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

A análise do banco de dados da CPRM resulta, portanto, na observação de que os poços em meio contínuo (sedimentos) têm suas profundidades variando de 4,72 m até 175 m os poços em meio descontínuo (cristalino) variam de 30 m a 150 m enquanto aqueles considerados mistos apresentam variação de 60 m a 110 m.

Utilizando a classificação proposta na Tabela 3, observa-se a seguinte situação, para os poços na porção norte do Estado, apresentada na Tabela 4 e Gráfico 15. Vale ressaltar que o número de poços com a informação “porosidade” não coincide com o número de poços com a informação “profundidade”, pelo fato de que nem todos esses primeiros têm o campo “profundidade” informado.

Esta observação é válida para todas as interpretações baseadas em campos do banco de dados de poços da CPRM.

Tabela 4 - Número de poços por classificação de profundidade e tipo de aquífero

Tipo de aquífero	Classificação do Poço			Total
	Tubular raso	Medianamente profundo	Tubular profundo	
Contínuo	46	65	378	489
Descontínuo	0	7	160	167
Misto	0	0	12	12
Total	46	72	550	668

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

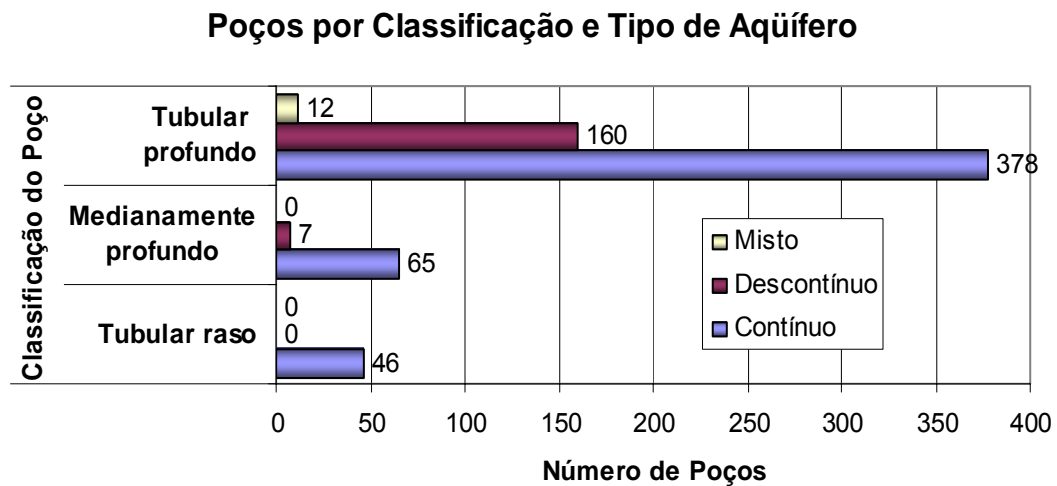


Gráfico 15 - Poços por classificação de profundidade e tipo de aquífero.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

Verifica-se, portanto, que a grande maioria dos poços se enquadra como poços tubulares profundos (550 poços ou 82% do total), seguidos dos medianamente profundos (72 poços ou 11% do total) e dos tubulares rasos (46 poços ou 7% do total) (Gráfico 16). Como seria de se esperar, a grande maioria dos classificados como tipo tubular profundo estão no domínio das rochas sedimentar, onde a captação de água pode chegar a maiores profundidades, por conta das maiores espessuras e profundidades das unidades aquíferas (o poço cadastrado de maior profundidade – 175 m – se encontra neste domínio).

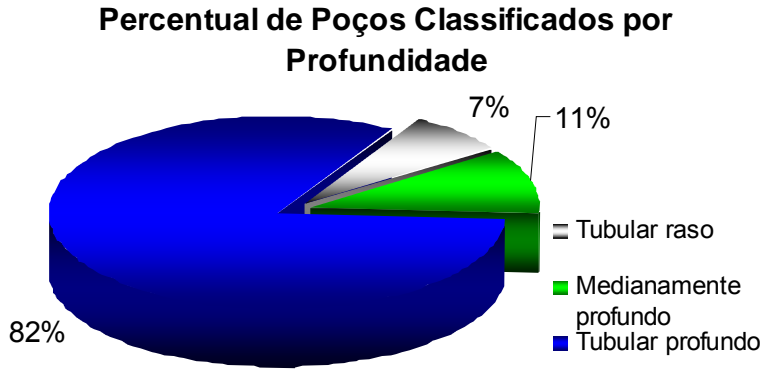


Gráfico 16 - Percentual de poços classificados pela profundidade.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

As Figuras 17, 18 e 19 mostram a distribuição, na parte norte do Estado, dos poços classificados para cada domínio hidrogeológico – sedimentar, cristalino e misto.

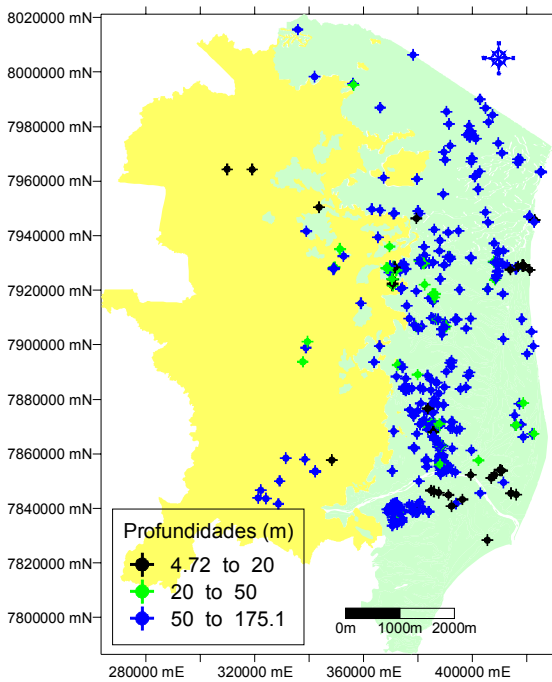


Figura 17 - Distribuição dos poços em ambiente sedimentar classificados pela profundidade no norte do Estado.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

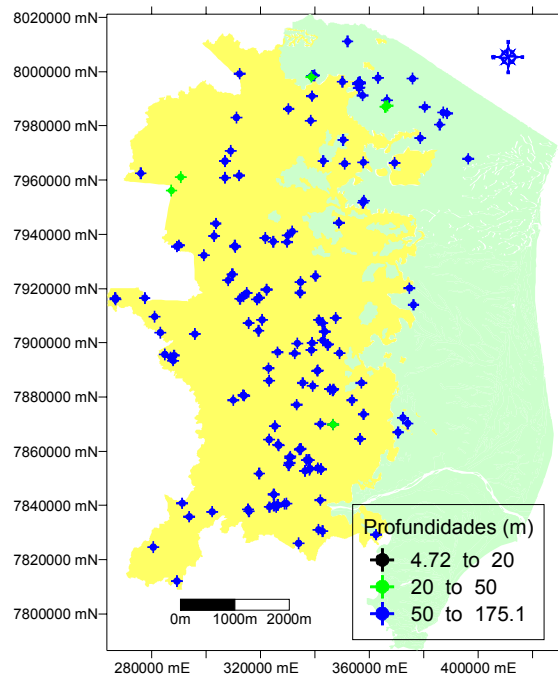


Figura 18 - Distribuição dos poços em ambiente cristalino classificados pela profundidade no norte do Estado.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

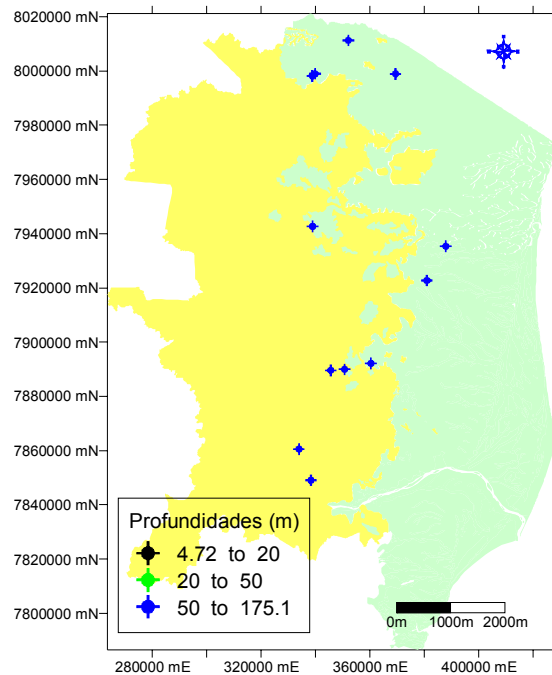


Figura 19 - Distribuição dos poços em ambiente misto classificados pela profundidade no norte do Estado.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

A análise das vazões dos poços cadastrados mostra variações de 0,068 m³/h a 70 m³/h, para o ambiente sedimentar; de 0,5 m³/h a 30 m³/h, para o ambiente cristalino, e de 0,684 m³/h a 23,29 m³/h, para o ambiente misto. São encontrados ainda 2 poços secos nos sedimentos e 8 poços secos no ambiente cristalino.

A distribuição dos poços por intervalos de vazão é mostrada na Tabela 5, Gráfico 17 e nas Figuras 20 e 21, em que se verifica que aqueles com maiores vazões em todos os intervalos se encontram no ambiente sedimentar, comprovando sua maior vocação hidrogeológica. A maior vazão cadastrada (70 m³/h) se encontra nesse domínio e se trata do poço também com maior profundidade (175 m), localizado na Fazenda Santa Terezinha – BR 101 – km 111, no município de Linhares e explora água a partir, segundo o cadastro, da Formação Barreiras.

Os meios descontínuos e mistos não apresentam, segundo o cadastro, nenhum poço tubular com vazões superiores a 30 m³/h.

Tabela 5 - Distribuição dos poços tubulares por intervalos de vazão e tipos de aquíferos

Tipo de aquífero	Vazão de Teste (m ³ /h)				Total
	≥ 0 - < 10	≥ 10 - < 30	≥ 30 a < 60	≥ 60 a < 90	
Contínuo	100	69	25	5	199
Descontínuo	89	40	0	0	129
Misto	4	4	0	0	8
Total	193	113	25	5	336

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

Poços por Intervalo de Vazão e Tipo de Aquífero

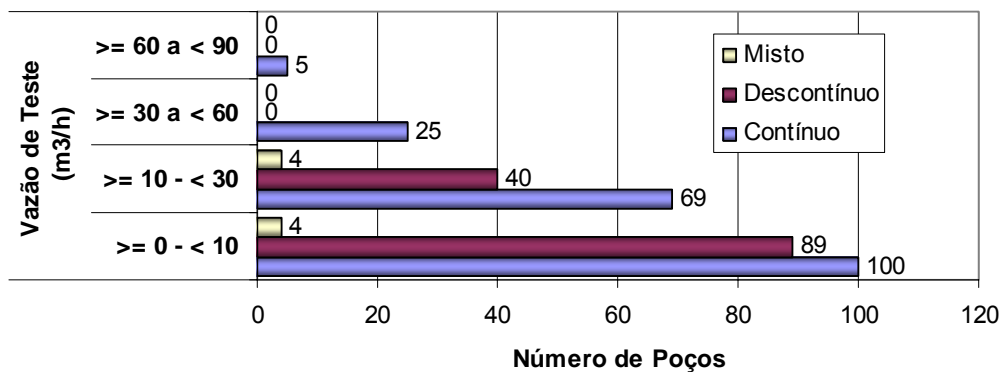


Gráfico 17 - Poços por intervalo de vazão e tipo de aquífero.

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000).

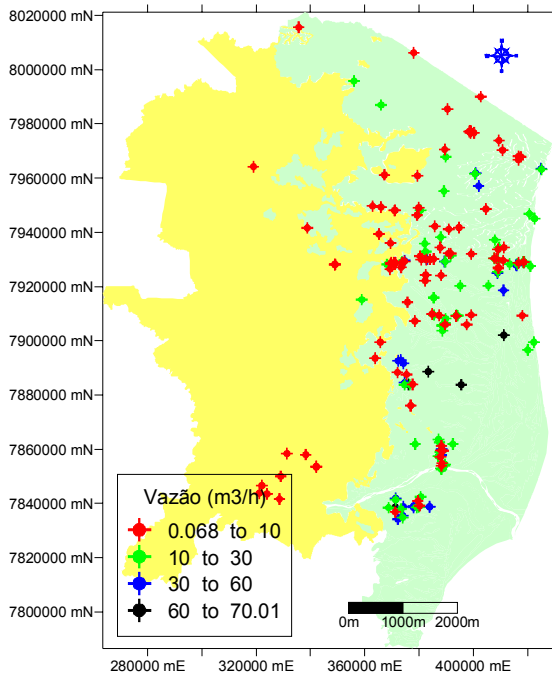


Figura 20 - Poços tubulares por intervalos de vazão em sedimento.

Fonte: Banco de Poços -CPRM (2000)

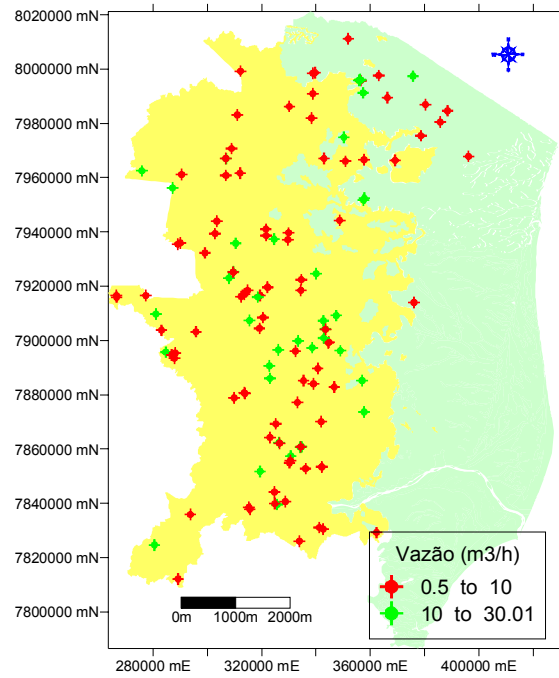


Figura 21 - Poços tubulares por intervalos de vazão em cristalino.

Fonte: Banco de Poços -CPRM (2000)

As principais características do poço dentro dos limites de Fazenda Alegre (FAL), JAG-47, e dos outros três nas suas proximidades, SMA-77, SMA-131 e SMA-132, segundo o banco de dados de poços da CPRM em 2000 (Figura 22) são mostradas na Tabela 6. O cadastro da CPRM, vale ressaltar, não apresentou as informações sobre vazões de teste, com exceção para o poço SMA-77 (60 m³/h), nem as vazões estimadas para os seus respectivos regimes de bombeamento.

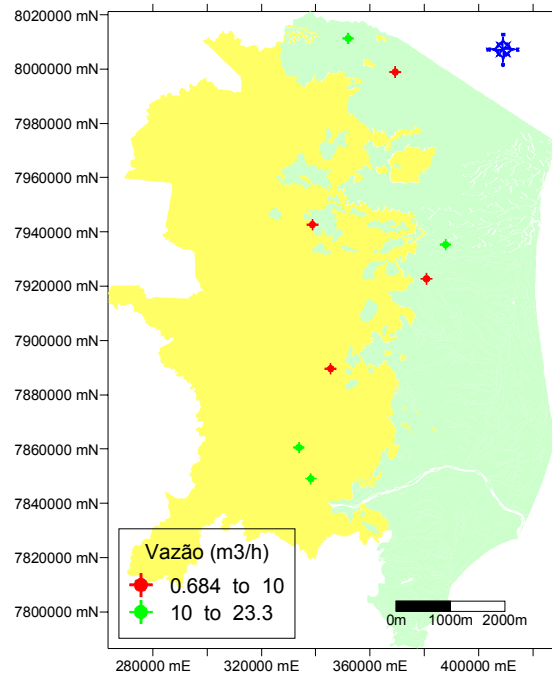


Figura 22 - Poços tubulares por intervalos de vazão em ambiente misto.

Fonte: Banco de Poços -CPRM (2000)

Tabela 6 - Principais características dos poços na FAL e proximidades

Código do Poço	UTM N	UTM E	Profundidade (m)	NE (m)	Cloretos (mg/l de Cl)
SMA 77*	411227	7902069	112	Si***	Si***
SMA 131*	411546	7899789	Si	Jorrante	6,56
SMA 132*	412175	7899804	Si	Jorrante	6,38
JAG 47**	408926	7899395	96	Si***	Si***

*SMA = São Mateus **JAG = Jaguaré ***Si = Sem informação

Fonte: Banco de dados de poços, CPRM (2000)

O relatório intitulado “Estudos Hidrogeológicos dos Aqüíferos das Formações Barreiras e Rio Doce da Região Norte do Estado do Espírito Santo”, contratado pela Petrobras em 2003, cita a existência de quatro poços tubulares no interior de FAL e dois outros poços ao norte daquela fazenda. As suas localizações e principais características são apresentadas na Figura 23 e nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Principais características construtivas dos poços tubulares no interior e proximidades da Fazenda Alegre (FAL)

Nome do Poço	Nome do Campo	Finalidade do Poço	UTM N	UTM E	Profundidade (m)	Extensão de Filtros (m)
FAL-01	Fazenda Alegre	Injeção de vapor	7902650	408725	116	44
FAL-5D	Fazenda Alegre	Injeção de vapor	7898949	407747	100	40
FAL-06	Fazenda Alegre	Injeção de vapor	7897449	408149	120	48
FAL-56	Fazenda Alegre	Injeção de vapor	7898985	407750	120	40
NFAL-01	Norte de Fazenda Alegre	Injeção de vapor	7898924	408411	128	44
NFAL-04	Norte de Fazenda Alegre	Injeção de vapor	7904355	407920	120	40

Fonte: Petrobras (2003).

Tabela 8 - Características de produção dos poços no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre (FAL)

Nome do Poço	Vazão de Teste (l/h)	Vazão de Teste (m ³ /h)	NE (m)	ND (m)	Vazão ótima explotável	Prof de instalação da Bomba (m)
FAL-01	26400	26,4	2	8	30m ³ /h p/ ND=11 m	44
FAL-5D	15000	15	12,5	56	10m ³ /h p/ ND=30,64 m 15m ³ /h p/ ND=55,3 m	73
FAL-06	26000	26	0	7	10m ³ /h p/ ND=3,52 m 15m ³ /h p/ ND=5,41 m	25
FAL-56	22600	22,6	9	49	20m ³ /h p/ ND=43,92 m	60
NFAL-01	34000	34	2,5	5,5	15m ³ /h p/ ND=3,86 m	25
NFAL-04	15000	15	8	18	15m ³ /h P/ nd=14,43 m 20m ³ /h p/ ND=16,49 m	53

Fonte: Petrobras (2003).

Tabela 9 - Aspectos qualitativos da água dos poços no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre (FAL)

Nome do Poço	Análise de cloretos (mg/l de Cl)	Análise de ferro total (mg/l de Fe)
FAL-01	18,40	1,69
FAL-5D	Não disponível	Não disponível
FAL-06	48,00	0,41
FAL-56	31,00	0,98
NFAL-01	20,40	4,10
NFAL-04	243,00	3,23

Fonte: Petrobras (2003).

O banco de dados da Petrobras 2003 mostra nove poços tubulares, com as suas finalidades, inclusive os dois novos poços construídos durante esta pesquisa. Entretanto, não estão disponibilizados os seus dados construtivo-técnicos nem as informações sobre a qualidade das suas águas. Todos eles têm a função de geração de vapor móvel. As suas localizações são mostradas na Figura 24 e suas coordenadas apresentadas na Tabela 10.

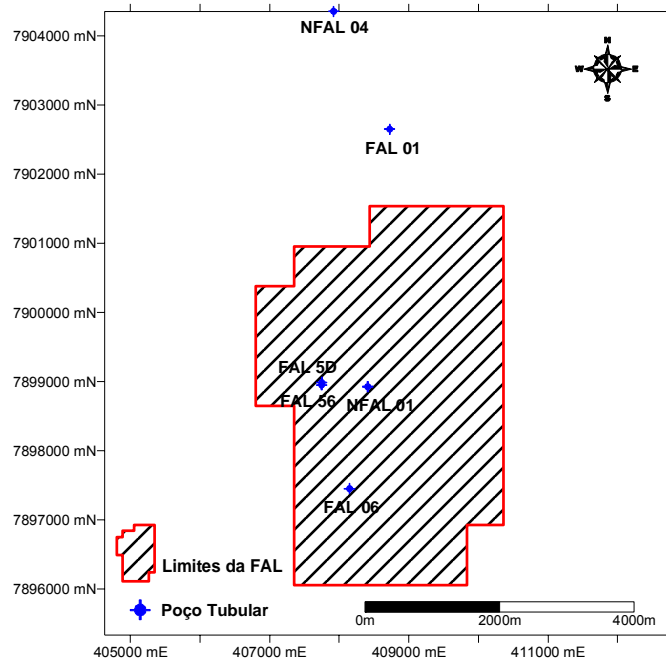


Figura 23 - Localização dos poços tubulares no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre (FAL).

Fonte: Petrobras (2003).

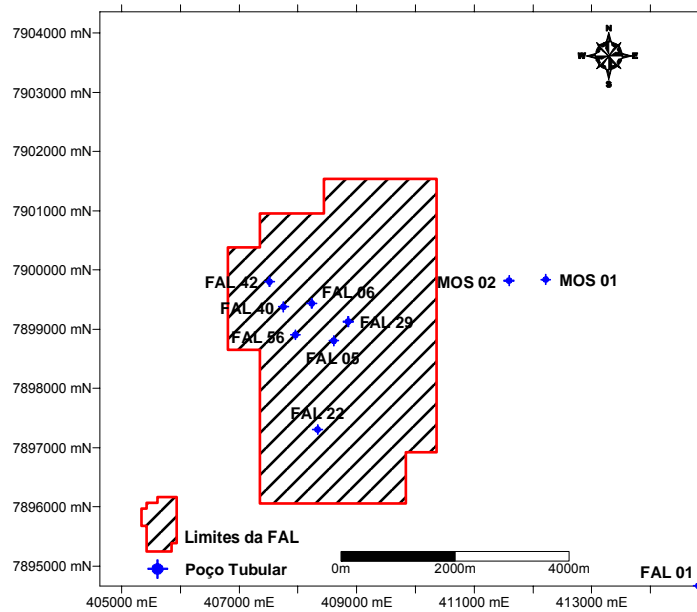


Figura 24 - Poços tubulares no interior e nas proximidades da Fazenda Alegre.

Fonte: Petrobras (2003).

Tabela 10 - Coordenadas dos poços tubulares no interior e proximidades da Fazenda Alegre

POÇO TUBULAR	UTM E	UTM N	CAMPO PRODUTOR	USO	HIDROMETRO
FAL-01	414815	7894663,22	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	SIM
FAL-22	408336	7897302,61	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	NAO
FAL-05	408611	7898804,28	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel / Sondas / Estação FAL	SIM
FAL-56	407957	7898902,47	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	SIM
FAL-29	408855	7899126,12	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	NAO
FAL-40	407753	7899375,83	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	SIM
FAL-06	408236	7899433,37	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	SIM
FAL-42	407516	7899799,27	Fazenda Alegre	Geração de vapor móvel	SIM
MOS-02	411593	7899817,83	Campo de Mosquito	Geração de vapor móvel	NAO
MOS-01	412219	7899836,91	Campo de Mosquito	Geração de vapor móvel	NAO

Fonte: Petrobras (2003).

A análise conjunta das três fontes de informação – banco de dados de poços da CPRM, em 2000, Petrobras (2003) e Petrobras, 2005 – mostra, portanto, que na região norte do Estado do Espírito Santo a maior profundidade registrada foi de 175 m (CPRM, 2000) e a maior vazão foi de 70 m³/h (CPRM, 2000). Na área de pesquisa (FAL), a maior profundidade foi de 128 m (Petrobras, 2003) e a maior vazão foi de 30 m³/h (Petrobras, 2003), não considerando os dois poços construídos durante esta pesquisa.

4.6. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

Neste capítulo, são apresentados os principais índices socioeconômicos considerados como indicadores de desenvolvimento para o Estado do Espírito Santo, como um todo, para os municípios de Jaguaré e São Mateus e, ainda para o município de Linhares. Os dois primeiros estão diretamente associados à área de pesquisa da Fazenda Alegre (FAL), enquanto o último foi considerado pela sua importância na região, além da também proximidade da FAL.

Linhares, em 2004, ocupava a oitava colocação dentre os 78 municípios do Estado na participação do PIB estadual com 2,94%, enquanto São Mateus ocupava a décima primeira posição com 1,5% de participação e Jaguaré a décima quarta com uma participação de 0,74%. Enquanto Linhares e Jaguaré aumentaram sua participação desde 1999, participando o primeiro com 2,33% e o segundo com 0,40%, o município de São Mateus passou de 2,20% em 1999 para 1,50% em 2004.

Os dados são disponibilizados pelo Instituto Jones dos Santos Neves através do denominado Indicadores de Desenvolvimento do Espírito Santo (INDDDES), que apresentam indicadores básicos de demografia, finanças públicas, produção agrícola, ocupação e renda, dentre outros. A versão consultada foi a edição de maio de 2007.

- **Demografia**

Os dados apresentados na Tabela 11 e no Gráfico 18 mostram as densidades demográficas (hab/km²) para o Estado e os municípios considerados, verificando-se que, apesar de numericamente inferior à variação no Estado, o município de São Mateus apresentou a maior variação percentual no período, de 13,73% contra 9,35% para Linhares, 9,49% para Jaguaré e, inclusive, contra 11,77% para todo o Estado (Gráfico 19).

Tabela 11 - Densidades demográficas para o Estado e municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus, variações numéricas e percentuais no período de 2000 a 2006

Localidade	ÁREA km ²	Densidade Demográfica (hab/Km ²)		Variação no período (hab/km ²)	Variação percentual no período
		2000	2006		
ES	4184,00	67,10	75,00	7,90	11,77%
Jaguaré	662,00	29,50	32,30	2,80	9,49%
Linhares	3506,00	32,10	35,10	3,00	9,35%
São Mateus	2346,00	38,60	43,90	5,30	13,73%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

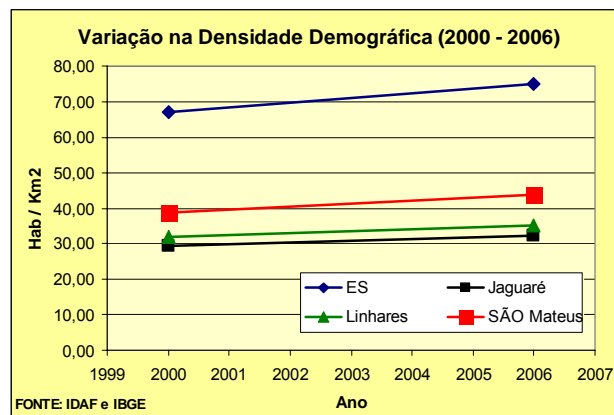


Gráfico 18 - Variação na densidade demográfica do Estado e municípios considerados (2000 a 2006).

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

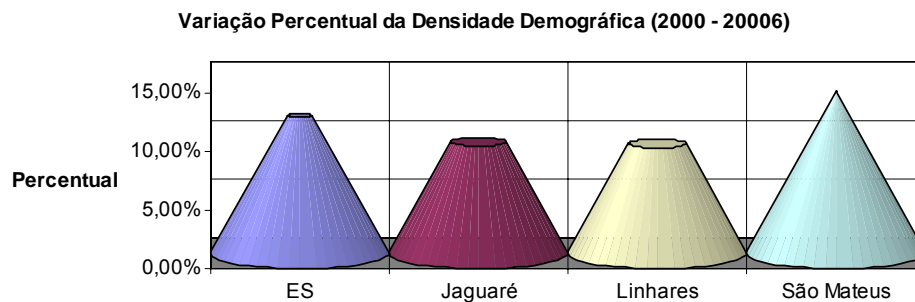


Gráfico 19 - Percentual de aumento da densidade demográfica no período de 2000 a 2006 para o Estado e municípios considerados.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

Na Tabela 12, são mostradas as taxas de crescimento para os períodos de 1991 – 2000 e 2000 – 2006. Pode se notar que todos os três municípios acompanharam a tendência geral do Estado de queda na taxa de crescimento

com destaque para o município de Linhares que apresentou uma queda percentual de 10,84% contra quedas negativas de 3,96% para São Mateus e, da menor entre todas, de 1,31% para Jaguaré (Gráficos 20 e 21).

Tabela 12 - Taxas de crescimento populacional para os períodos 1991-2000 e 2000-2006 e variações numéricas e percentuais para o Estado e municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus

	Taxa de Crescimento		Variação no período	Variação percentual no período
	1991 - 2000	2000 - 2006		
ES	1,96	1,88	-0,08	-4,08%
Jaguaré	1,53	1,51	-0,02	-1,31%
Linhares	1,66	1,48	-0,18	-10,84%
São Mateus	2,27	2,18	-0,09	-3,96%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

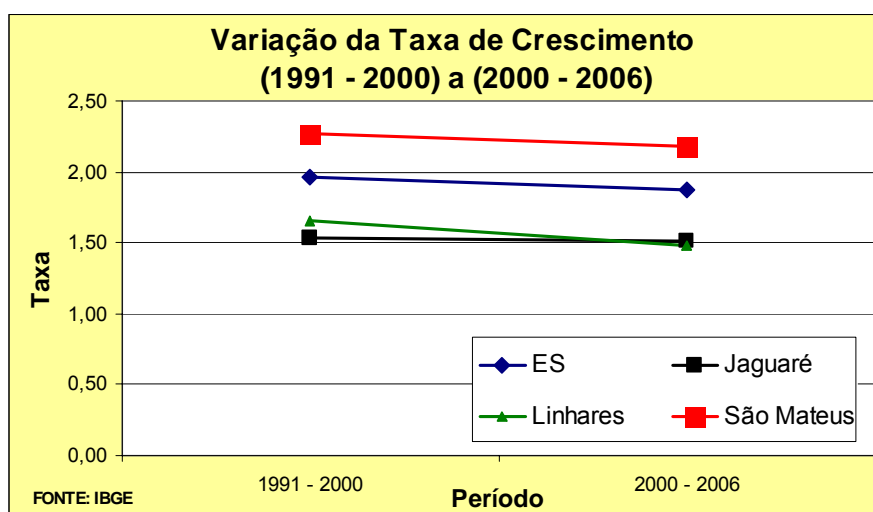


Gráfico 20 - Variação da taxa de crescimento populacional para os períodos 1991-2000 e 2000-2006 para o Estado e municípios considerados.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

**Variação Percentual da Taxa de Crescimento no Período
(1991 - 2000) a (2000 - 2006)**

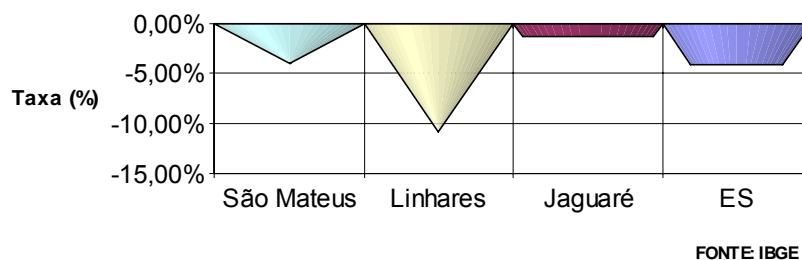


Gráfico 21 - Variação percentual da taxa de crescimento para o período 1991-2000 a 2000-2006 para o Estado e municípios considerados.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

- **Agricultura**

A seguir, são apresentados os valores, em mil reais, da produção agrícola para o Estado do Espírito Santo e para os municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus (Tabelas 13, 14, 15 e 16), em que se verifica a pequena expressão destes em relação ao cômputo geral, com a exceção do município de Linhares, em relação à atividade de extração vegetal, com um percentual de 15,73% em relação ao geral total do Estado (Tabela 13 e Gráfico 22).

Dentre as lavouras permanentes no Estado, destaca-se, em termos de produção em 2005, o mamão (629.236 toneladas), o café beneficiado (532.435 toneladas) e a banana (180.207 toneladas). No município de Jaguaré destacam-se o café beneficiado (32.400 toneladas) e o mamão (20.000 toneladas) seguidos do coco da Bahia (5.120.000 frutos), o maracujá (4.500 toneladas), a laranja (1.200 toneladas), pimenta do reino (589 toneladas), a banana (300 toneladas), a borracha (látex coagulado) (255 toneladas) e o palmito (48 toneladas). No município de Linhares destaca-se o mamão (60.192 toneladas), o café beneficiado (15.504 toneladas), o cacau em amêndoa (10.824 toneladas), o maracujá (8.000 toneladas), o limão (5.600 toneladas) e o coco da Bahia (5.200 toneladas). O município de São Mateus apresenta maiores destaques com o coco da Bahia (76.000 toneladas), o mamão (22.500

toneladas), o café beneficiado (18.644 toneladas) e o maracujá (3.500 toneladas).

Tabela 13 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Estado do Espírito Santo

VALOR DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM MOEDA CORRENTE				
ATIVIDADE	Estado do Espírito Santo			
	Ano de 2000		Ano de 2005	
	R\$ 1.000,00	%	R\$ 1.000,00	%
Lavoura Permanente	R\$ 1.125.675,00	77,95%	R\$ 1.958.983,00	75,10%
Lavoura Temporária	R\$ 182.452,00	12,63%	R\$ 385.635,00	14,78%
Extração Vegetal	R\$ 1.703,00	0,12%	R\$ 1.678,00	0,06%
Silvicultura	R\$ 134.299,00	9,30%	R\$ 262.134,00	10,05%
Total	R\$ 1.444.129,00	100,00%	R\$ 2.608.430,00	100,00%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

Tabela 14 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Município de Jaguaré

VALOR DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM MOEDA CORRENTE				
ATIVIDADE	Município de Jaguaré			
	Ano de 2000		Ano de 2005	
	R\$ 1.000,00	%	R\$ 1.000,00	%
Lavoura Permanente	R\$ 37.394,00	88,36%	R\$ 95.033,00	85,27%
Lavoura Temporária	R\$ 1.049,00	2,48%	R\$ 299,00	0,27%
Extração Vegetal	R\$ 177,00	0,42%	R\$ 24,00	0,02%
Silvicultura	R\$ 3.698,00	8,74%	R\$ 16.100,00	14,45%
Total	R\$ 42.318,00	100,00%	R\$ 111.456,00	100,00%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

Tabela 15 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Município de Linhares

VALOR DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM MOEDA CORRENTE				
ATIVIDADE	Município de Linhares			
	Ano de 2000		Ano de 2005	
	R\$ 1.000,00	%	R\$ 1.000,00	%
Lavoura Permanente	R\$ 67.063,00	81,22%	R\$ 134.947,00	77,02%
Lavoura Temporária	R\$ 7.444,00	9,02%	R\$ 31.496,00	17,98%
Extração Vegetal	R\$ 53,00	0,06%	R\$ 264,00	0,15%
Silvicultura	R\$ 8.010,00	9,70%	R\$ 8.493,00	4,85%
Total	R\$ 82.570,00	100,00%	R\$ 175.200,00	100,00%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

Tabela 16 - Valores da produção agrícola para os anos de 2000 e 2005 para o Município de São Mateus

VALOR DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM MOEDA CORRENTE				
ATIVIDADE	Município de São Mateus			
	Ano de 2000		Ano de 2005	
	R\$ 1.000,00	%	R\$ 1.000,00	%
Lavoura Permanente	R\$ 46.038,00	44,27%	R\$ 92.008,00	63,14%
Lavoura Temporária	R\$ 3.454,00	3,32%	R\$ 15.444,00	10,60%
Extração Vegetal	R\$ 343,00	0,33%	R\$ 81,00	0,06%
Silvicultura	R\$ 54.155,00	52,08%	R\$ 38.192,00	26,21%
Total	R\$ 103.990,00	100,00%	R\$ 145.725,00	100,00%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

Tabela 17 - Percentual do valor da produção agrícola, por atividade, dos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus em relação ao total geral do Estado do Espírito Santo

Percentual em relação ao Estado em 2005			
ATIVIDADE	Jagaré	Linhares	São Mateus
Lavoura Permanente	4,85%	6,89%	4,70%
Lavoura Temporária	0,08%	8,17%	4,00%
Extração Vegetal	1,43%	15,73%	4,83%
Silvicultura	6,14%	3,24%	3,24%

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

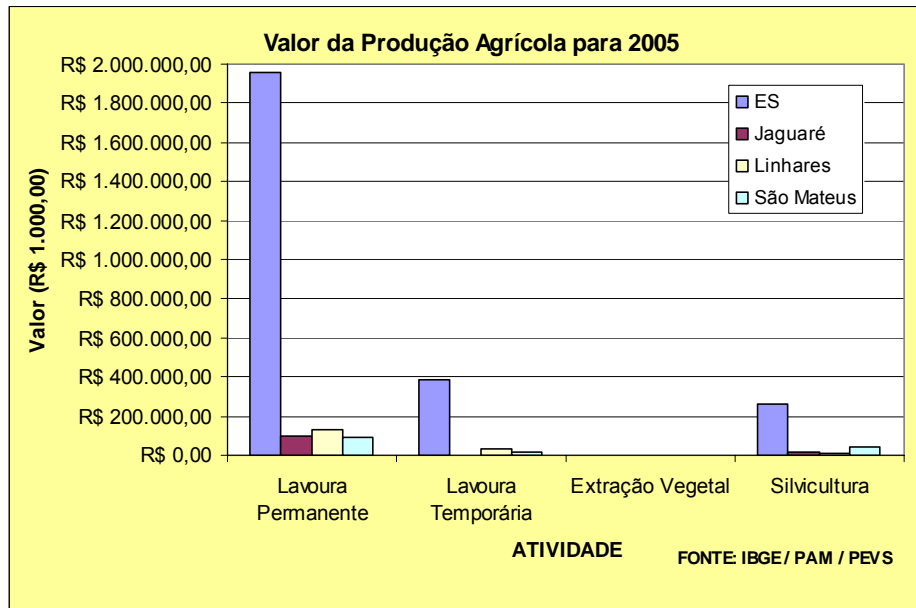


Gráfico 22 - Relação dos valores de produção agrícola dos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus com o total geral do Estado do Espírito Santo.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

- **Finanças Públicas**

A Tabela 18 e os Gráficos 23, 24, 25 e 26 mostram as receitas, despesas e o balanço para o ano de 2005 para o Estado e os municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus. Os resultados mostram balanços negativos de R\$ 2.913.943,00 e de R\$ 6.230.535,00 para Jaguaré e Linhares, respectivamente. O Estado e São Mateus apresentaram balanço positivo nesse período de R\$ 224.986.948,00 e de R\$ 1.034.789,00 respectivamente.

Tabela 18 - Síntese do orçamento para o Estado do Espírito Santo e municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus.

Localização	Receita*	Despesa	Receita - Despesa
ES	R\$ 3.361.336.216,00	R\$ 3.136.349.268,00	R\$ 224.986.948,00
Jaguaré	R\$ 41.173.728,00	R\$ 44.087.671,00	-R\$ 2.913.943,00
Linhares	R\$ 147.652.368,00	R\$ 153.882.903,00	-R\$ 6.230.535,00
São Mateus	R\$ 96.041.386,00	R\$ 95.006.597,00	R\$ 1.034.789,00

*Exclusive valores deduzidos para formação do FUNDEF

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

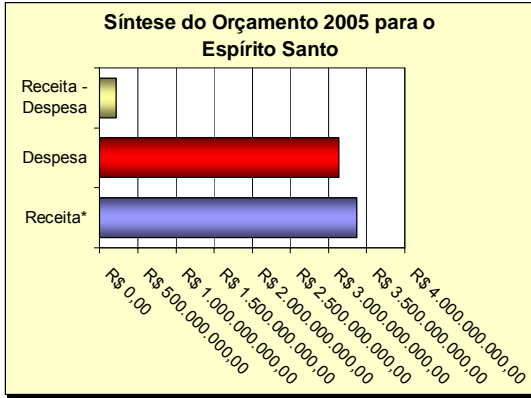


Gráfico 23 - Síntese do orçamento 2005 para o Estado.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

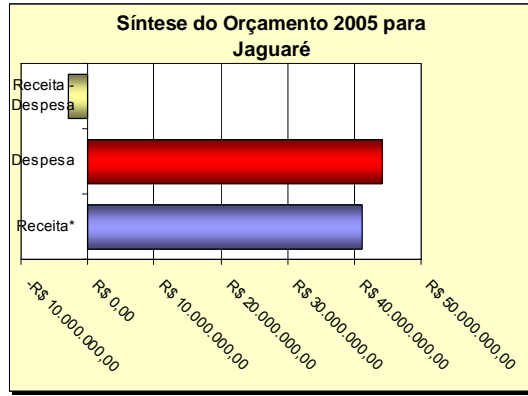


Gráfico 24 - Síntese do orçamento 2005 para Jaguaré

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

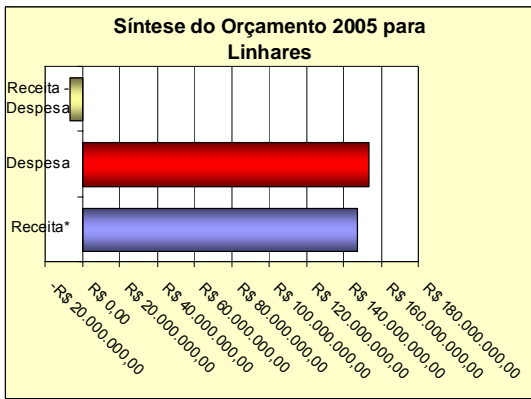


Gráfico 25 - Síntese do orçamento 2005 para Linhares.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

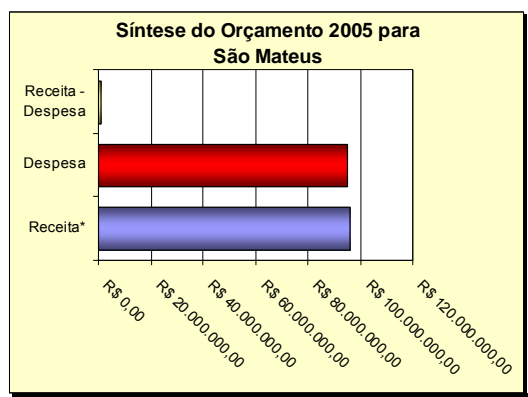


Gráfico 26 - Síntese do orçamento 2005 para São Mateus.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

A Tabela 19 mostra os tipos de impostos e valores arrecadados em 2005, no Estado e nos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus. Observa-se claramente a importância do ISS em todas as arrecadações com destaque para o município de Jaguaré, onde esse imposto representa quase 90% dos valores arrecadados (Gráfico 28).

Os Gráficos 27, 28, 29 e 30 mostram as representações dos tipos de impostos de forma percentual.

Tabela 19 - Tipos de Impostos e valores arrecadados no Estado e municípios considerados

Tipo de Imposto	ES	Jaguaré	Linhares	São Mateus
	Valor			
IPTU	R\$ 64.381.721,00	R\$ 49.292,00	R\$ 1.426.021,00	R\$ 482.026,00
ISS	R\$ 329.096.651,00	R\$ 4.017.839,00	R\$ 11.551.819,00	R\$ 7.632.272,00
ITBI	R\$ 31.747.507,00	R\$ 70.228,00	R\$ 891.317,00	R\$ 464.645,00
Outros	R\$ 43.941.063,00	R\$ 343.354,00	R\$ 2.301.892,00	R\$ 781.379,00
Total	R\$ 469.166.942,00	R\$ 4.480.713,00	R\$ 16.171.049,00	R\$ 9.360.322,00

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

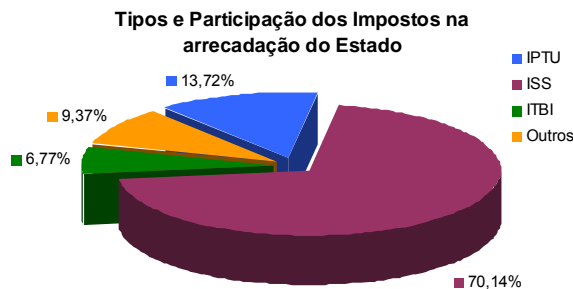


Gráfico 27 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação do Estado.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

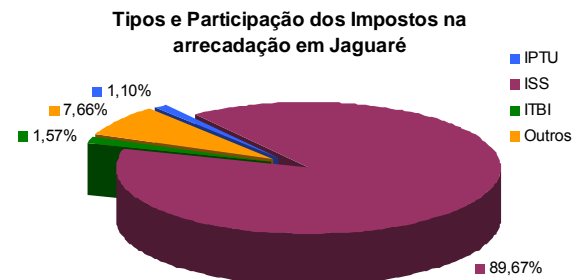


Gráfico 28 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação em Jaguaré.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

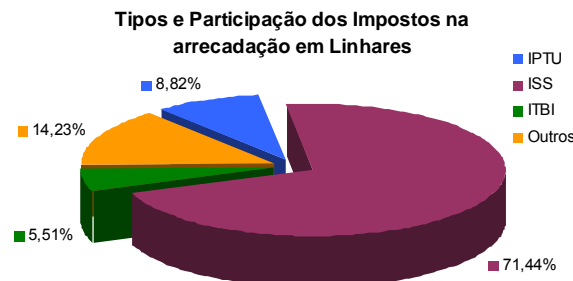


Gráfico 29 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação em Linhares.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

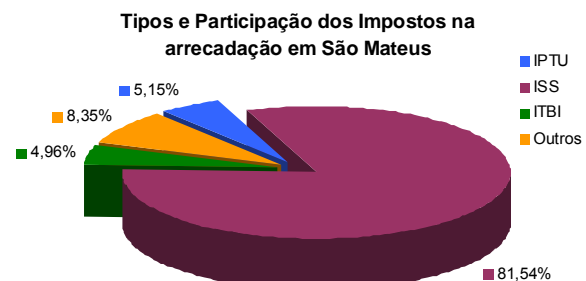


Gráfico 30 - Tipos e participação dos impostos na arrecadação em São Mateus.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

- **Saneamento**

A Tabela 20 mostra o número de domicílios no Estado e nos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus onde o abastecimento se dá por rede geral de distribuição de água, por poços ou fontes na propriedade e por outros.

Observa-se uma significativa quantidade de residências atendidas com água subterrânea no Estado do Espírito Santo (150.789 domicílios), correspondendo a cerca de 18% do total.

Os municípios de Linhares e São Mateus acompanham essa média com 17% e 19% respectivamente, enquanto Jaguaré ultrapassa bem esse percentual com 38% de suas residências sendo atendidas com água de subsuperfície (Gráficos 31, 32, 33 e 34)

Tabela 20 - Tipos de abastecimento por número de domicílios no Estado e municípios considerados

Tipo de Abastecimento	Número de Domicílios			
	ES	Jaguaré	Linhares	São Mateus
Rede Geral	680685	2980	23547	18130
Poço ou nascente (na propriedade)	150789	1812	4842	4310
Outra	9368	33	567	741
Total	840842	4825	28956	23181

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

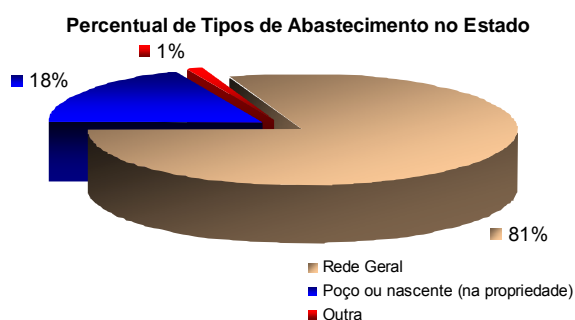


Gráfico 31 - Percentual de tipos de abastecimento no Estado.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

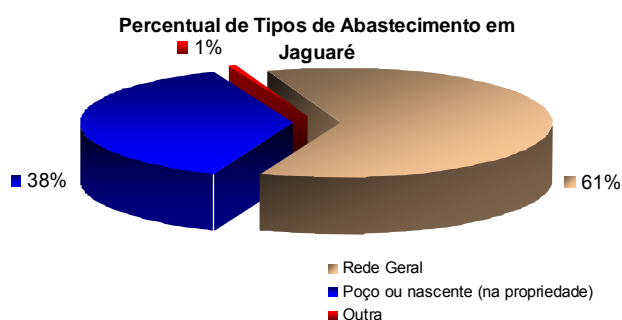


Gráfico 32 - Percentual de tipos de abastecimento em Jaguaré.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

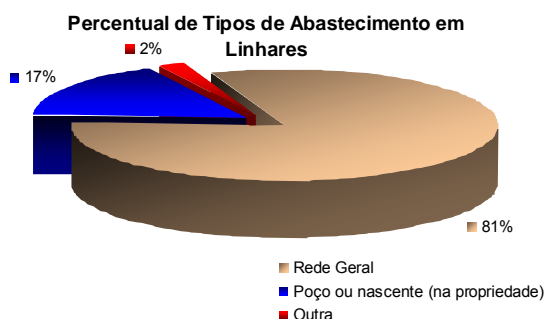


Gráfico 33 - Percentual de tipos de abastecimento em Linhares.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

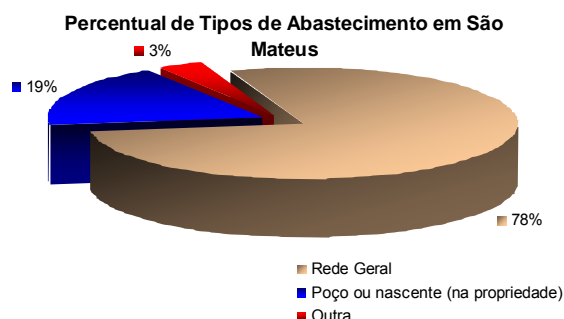


Gráfico 34 - Percentual de tipos de abastecimento em São Mateus.

Fonte: Instituto Jones dos Santos Neves (2007).

Com relação ao esgotamento sanitário, os dados mostram as seguintes situações, de acordo com o censo IBGE de 2000:

Para o município de Jaguaré, 32,3% das residências têm esgotamento do tipo fossa rudimentar, 13,4% do tipo fossa séptica, 45,3% com rede geral de esgoto ou pluvial, 1,3% tipo rio, lago ou mar, 0,3% tipo vala e 7,4% não possuem nenhum tipo de sistema de esgoto.

Para o município de Linhares, 35,5 % das residências tem esgotamento do tipo fossa rudimentar, 6,9% do tipo fossa séptica, 49,0% com rede geral de esgoto ou pluvial, 4,9% tipo rio, lago ou mar, 0,3% outro tipo de escoadouro, 1,2% tipo vala e 2,2% não possuem nenhum tipo de sistema de esgoto.

Para o município de São Mateus, 26,5% das residências têm esgotamento do tipo fossa rudimentar, 7,4% do tipo fossa séptica, 0,4% outro tipo de escoadouro, 55,9% com rede geral de esgoto ou pluvial, 2,1% tipo rio, lago ou mar, 2,7% tipo vala e 5% não possuem nenhum tipo de sistema de esgoto.

No computo geral, para o Estado do Espírito Santo, os dados mostram que 18,7% usam fossa rudimentar, 10,2% fossa séptica, 0,7% outro tipo de escoadouro, 56,8% usam a rede geral de esgoto ou pluvial, 6,4% usam rio, lago ou mar, 5,1% vala e 2,1% não usam nenhum sistema de esgotamento sanitário.

- **Saúde**

Na área da saúde os dados mostram uma taxa de mortalidade infantil de 15,4% para todo o Estado, enquanto para Jaguaré a taxa é de 22,8%, para Linhares de 11,9% e para São Mateus de 12,5%.

O número de leitos por especialidade, em 2005, do Sistema Único de Saúde (SUS) em todo o Estado e nos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Números de leitos do SUS no Estado e nos municípios de Jaguaré, Linhares e São Mateus, por especialidade médica

Especialidade	Espírito Santo	Jaguaré	Linhares	São Mateus
Clínica médica	1.732	3	39	34
Cirurgia	1.364	5	24	34
Pediatria	976	3	20	34
Obstetrícia	827	8	26	15
Psiquiatria	651	-	-	-
UTI	93	-	6	6
UTIN	88	-	6	-
Isolamento	81	-	3	2
Unidade I. Neonatal	75	-	4	-
UTI Pediátrica	28	-	-	-
Unidade Intermediária	11	-	-	-
TOTAL	5.926	19	128	125

Fonte: Secretaria de Saúde do Espírito Santo (2005).

5. GEOLOGIA E ARCABOUÇO ESTRUTURAL NO CONTEXTO DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO

Neste capítulo serão discutidas as principais unidades geológicas regionais aflorantes, conforme o mapa geológico da parte norte do Estado do Espírito Santo, por estar aí localizada a área de pesquisa, de acordo com as informações de detalhe do lema. As principais estruturas da Bacia do Espírito Santo, de onde é extraído o petróleo da Fazenda Alegre, mais especificamente da Formação Urucutuca de idade neocretácica a terciária, também serão dissertadas.

5.1. GEOLOGIA

Com relação à Geologia e de acordo com o Mapa Geológico do Espírito Santo produzido pelo lema (Figura 25), o Estado pode ser dividido em duas grandes porções; uma a oeste, abrangendo a maior parte de seu território e ocupada por rochas de idades pré-cambrianas, e outra a leste, bem menor, ocupada por rochas sedimentares da Bacia do Espírito Santo, de idade terciária, sobrepostas pelos sedimentos terciário-quadernários da Formação Barreiras e quadernários das planícies litorâneas. A parte sedimentar avança mar adentro, pela plataforma continental, limitando-se a leste com o complexo vulcânico de Abrolhos.

As principais unidades geológicas regionais aflorantes, de acordo com o mapa geológico da parte norte do Estado do Espírito Santo e conforme as informações de detalhe do lema, são apresentadas na Figura 26, a qual mostra que a principal unidade aflorante na área de pesquisa é o Barreiras, sendo ainda encontradas ocorrências de depósitos flúvio-aguarens e marinhos além de unidades classificadas pelo lema como cordões litorâneos e alinhamentos de antigos cordões litorâneos.

A área continental da porção sedimentar do Estado do Espírito Santo limita-se a oeste com o embasamento cristalino e a leste com o Oceano Atlântico. Ao norte, estende-se muito além da fronteira com o Estado da Bahia e para o sul, estreita-se na região de Aracruz, ocupando pequenas áreas ao longo da costa.

O embasamento cristalino consiste numa associação de rochas ígneas e metamórficas de alto grau pertencentes aos Complexos Paraíba do Sul, Montanha e Medina, sendo o primeiro composto por granulitos, gnaisses e migmatitos, com idade relacionada ao metamorfismo da orogênese brasileira, e os outros dois fazendo parte de um extensivo magmatismo do final dessa orogênese.

Segundo o “Plano de Manejo do Parque Estadual de Itaúnas – Encarte 04 – Meio Físico Rev. 01” (PETROBRAS; CEPEDMAR, 2007), o Grupo Barreiras é constituído litologicamente, na região, por arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, argilosos, finos a grosseiros, mal selecionados, com intercalações de argilitos vermelhos e variegados com espessuras decimétricas, podendo ainda ocorrer em alguns locais lentes de aproximadamente 2 m de espessura de conglomerado intraformacional, constituído de seixos arredondados de quartzo e quartzito de até 13 cm de diâmetro, envolvidos em matriz areno-argilosa vermelha, constituído de seixos arredondados de quartzo e quartzito de até 13 cm de diâmetro, envolvidos em matriz areno-argilosa vermelha.

A parte inferior da unidade geralmente é constituída por arenito vermelho fino a grosseiro, argiloso, mal selecionado, maciço e conglomerático na base. É comum encontrar-se na parte média da seqüência uma seção de argila variegada com infiltração de óxido de ferro, muitas vezes formando bolsões limoníticos, como visto em determinados afloramentos na área de estudo. A parte superior da unidade, constituída principalmente de arenitos argilosos, pode apresentar, por vezes, zonas silicificadas.

Outra forma de ocorrência dos sedimentos do Grupo Barreiras na região se refere aos sedimentos silicificados e limoníticos que ocorrem na linha de costa.

O ambiente de deposição desse grupo foi o continental, predominando o fluvial, do tipo anastomosante, com material sofrendo transporte curto e torrencial, proveniente das áreas elevadas de rochas cristalinas a oeste. As condições climáticas da época foram certamente de clima seco, do tipo semi-árido ou semi-úmido.

De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental da Estação da Fazenda Alegre – Terminal Norte Capixaba (março de 2002), normalmente na região oeste, no contato com as rochas cristalinas, a espessura desses sedimentos é pequena, tendendo a aumentar para leste, em direção ao mar, variando desde poucos metros até um máximo de 250 m, chegando a cerca de 70 m nas falésias junto ao mar.

A sedimentação da Formação Barreiras foi considerada de idade terciária miopliocênica, embora a literatura geológica cita também a existência de camadas quaternárias pleistocênicas em sua parte superior nas regiões da Bahia de Guanabara (RJ) e de Vitória (ES).

O Plano de Manejo do Parque Estadual de Itaúnas se refere à Formação Linhares (PETROBRAS; CEPENAR, 2007) como representando o quaternário costeiro da região norte do Espírito Santo, tendo sido definida por Piazza, Araújo e Bandeira Júnior, quando dos primeiros estudos da geologia da parte continental da bacia sedimentar do Espírito Santo por equipes da Petrobras.

De modo geral, os depósitos sedimentares holocênicos que se encontram distribuídos ao longo da costa e dos rios brasileiros vêm recebendo nomes informais como “aluviões quaternários”, “sedimentos de praia e rios” ou simplesmente “quaternário”; no entanto, os citados autores, ao estudarem esta região, encontraram os atributos indispensáveis ao caráter formacional do conjunto de estratos observados, como distribuição horizontal e vertical e características litológicas próprias e facilmente reconhecíveis. Desta forma foi proposta a denominação de Formação Linhares para caracterizar os depósitos sedimentares quaternários da bacia do Espírito Santo na região da foz dos rios Doce e São Mateus.

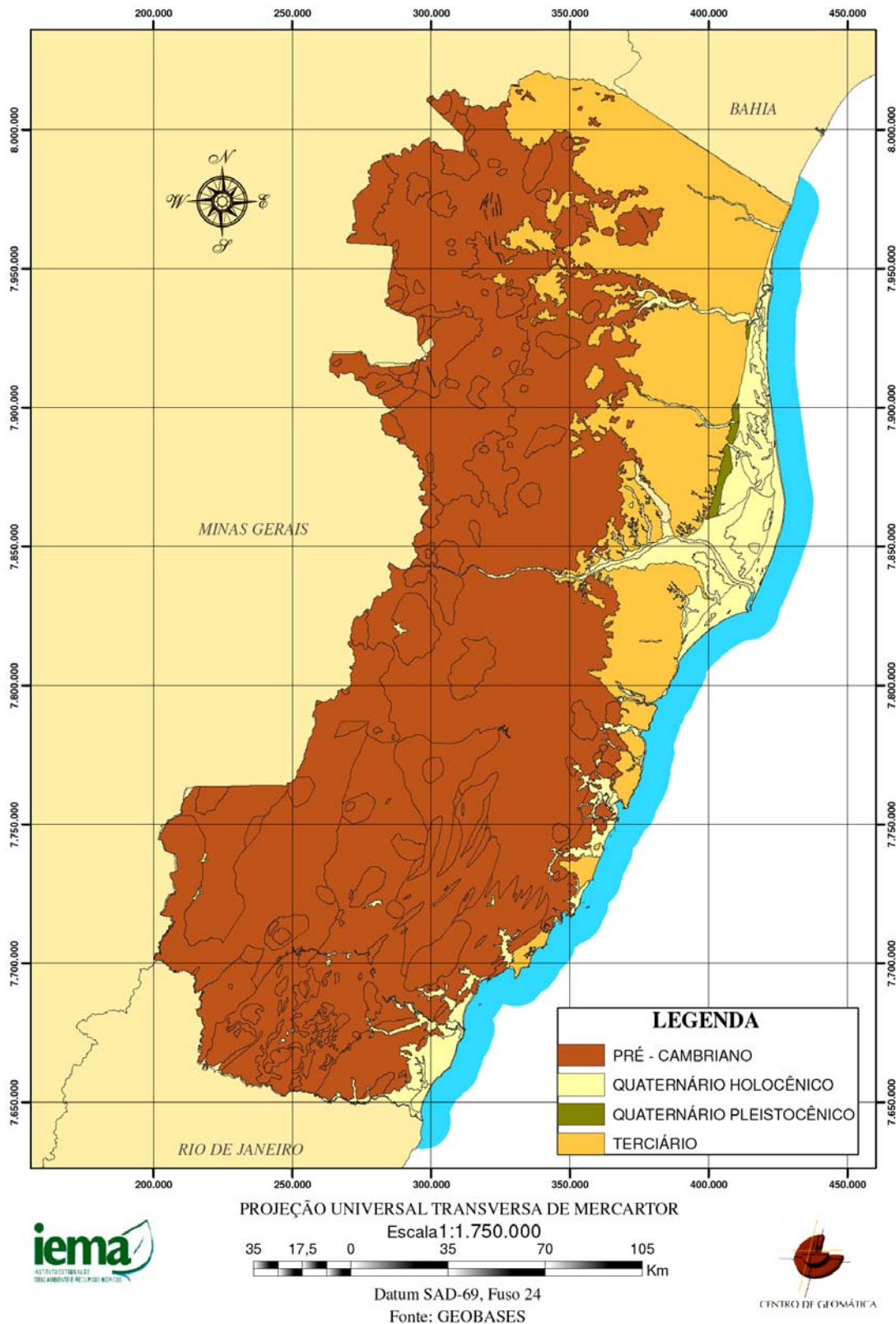


Figura 25 - Mapa geológico do Espírito Santo.

Fonte: IEMA (2007)

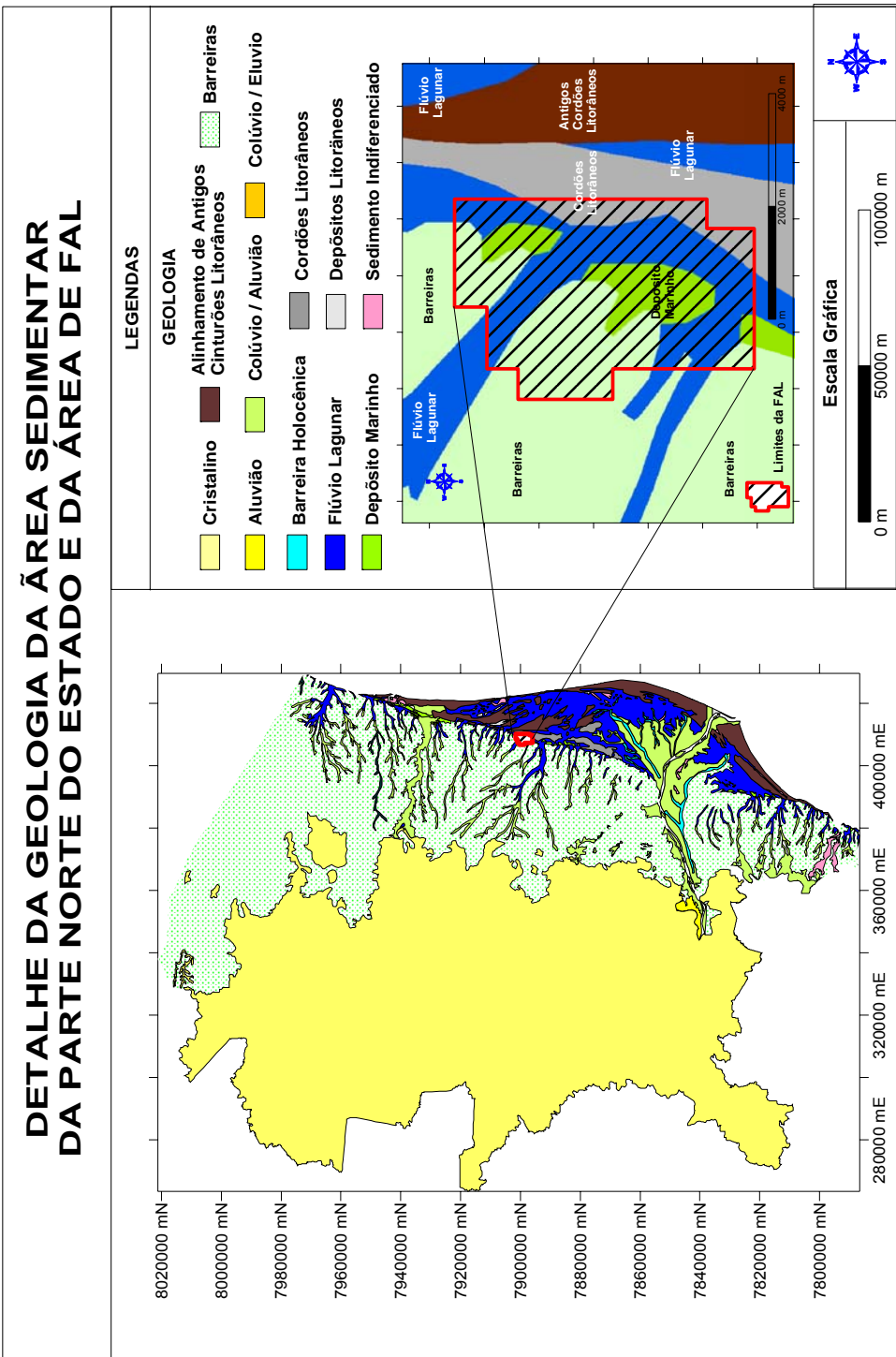


Figura 26 - Geologia dos sedimentos na parte norte do Estado do Espírito Santo e da área de FAL.
 Fonte: lema (2007).

A Formação Linhares distribui-se nas partes topograficamente mais baixas, compondo a planície deltáica do Rio Doce e preenchendo fundos de vales encaixados nas unidades mais antigas, notadamente do Grupo Barreiras. Distribui-se desde a região de Itaúnas, ao norte, até a região de Santa Cruz, ao Sul, ocupando na parte continental uma área de 2.550 km².

Na região norte do Estado, Piazza, Araújo e Bandeira Júnior distinguiram e mapearam individualmente as litofacies sedimentares superficiais que compõem a Formação Linhares, a saber: depósitos de planície de inundação, depósitos de brejos e pântanos, depósitos de mangue e depósitos arenosos, sendo estes últimos definidos pelos autores de cordões litorâneos.

Araújo e Bandeira Júnior (op.cit) empregaram o termo cordão litorâneo, o qual foi posteriormente adotado por Piazza, Bandeira Júnior, Petri e Suguio em 1975, para caracteriza a feição morfológica positiva alongada moldada sobre as areias da baixada litorânea. A eles intercalam-se depressões igualmente alongadas e paralelas que se sucedem periodicamente, produzindo uma superfície nitidamente ondulada.

Os depósitos arenosos litorâneos distribuem-se formando uma faixa praticamente contínua ao longo de toda a costa norte do Espírito Santo, a partir do delta do Rio Doce, assumindo, em alguns locais, larguras que ultrapassam 10 km, principalmente nas proximidades da foz do Rio Doce.

Na região, os depósitos arenosos da Formação Linhares distribuem-se ao longo de toda a costa, representando uma extensa e estreita faixa, de direção aproximada norte-Sul, que se encontra disposta paralela e junto à linha de costa. Esta continuidade somente é interrompida nos locais de desembocadura de rios, principalmente daqueles cursos d'água de médio e grande porte, e nesses locais, os depósitos de areia cedem lugar para que ocorram os Depósitos de Mangue.

Neste caso, os depósitos arenosos são interrompidos pelos depósitos de mangue que se formam às margens destes rios próximos a sua desembocadura, ficando estes cercados pelas areias.

Nas demais áreas, o contato dos Depósitos Arenosos ocorre a oeste com os Depósitos de Brejos e Pântanos.

Os Depósitos Arenosos são constituídos predominantemente por areias marinhas de praias, de composição quartzosa, contendo ainda uma contribuição de minerais pesados resultantes do retrabalhamento pelo mar da carga sedimentar carregada pelos principais rios da região, que, após seu aporte ao mar, são retrabalhados e depositados junto à linha de costa. De modo geral, se alinham em longos cordões distribuídos por quase toda a planície costeira atual.

Litologicamente, os depósitos arenosos são constituídos por areias quartzosas médias a grosseiras, mal selecionadas a conglomeráticas, com freqüentes grânulos e seixos de até 16 mm de diâmetro maior, com abundantes minerais escuros (ilmenita, magnetita, zircão e turmalina) concentrados em lâminas e leitos. Ocasionalmente, aparecem leitos de areias médias, com seleção regular e boa. Essas areias contêm, por vezes, pequena percentagem de plaquetas de mica.

De modo geral, em diversos pontos do litoral capixaba onde ocorrem os depósitos arenosos, é possível realizar uma subdivisão destes em depósitos pleistocênicos (mais antigos) e holocênicos (mais novos). Por vezes, esta divisão é perfeitamente visualizável até mesmo em fotografias aéreas. Dentre os vários argumentos que permitem a distinção dessas duas gerações de depósitos arenosos, destacam-se as idades radiocarbono superiores há 30.000 anos A.P. (Antes do Presente) para os depósitos posicionados mais internamente (pleistocênicos) e inferiores há 5.100 anos A.P. para os depósitos mais próximos à costa (holocênicos).

De modo geral, estas diferenças entre os depósitos arenosos se fazem observar através de mudanças topográficas, sendo os pleistocênicos levemente mais elevados que os holocênicos, além destes últimos se mostrarem menos coesos e adensados que os primeiros.

O fato de os depósitos pleistocênicos se apresentarem mais coesos lhes garante um melhor suporte geotécnico, tendo sido, em alguns locais, ocupados por plantios com eucalipto na região.

Segundo Suguio (1982), outro aspecto bastante característico nos Depósitos Marinhos Holocênicos do Espírito Santo e Rio de Janeiro, e que os difere dos Terraços Marinhos Pleistocênicos, refere-se à constante presença de tubos fósseis de *Callianassa* e conchas marinhas, enquanto nos pleistocênicos é reconhecida a ausência de conchas calcárias fossilizadas.

Ao longo de todo o litoral onde encontram-se estes dois depósitos, a separação entre ambos ocorre, de maneira freqüente, pela presença de zonas rebaixadas e pantanosas.

Depósitos fluvio-lagunares constituem a maior parte da planície costeira, caracterizando-se por uma zona pantanosa recoberta por depósitos turfosos que se sobrepõem a sedimentos predominantemente argilosos orgânicos da fase lagunar (lagunares) e zonas de depósitos de paleocanais, que mostram o deslocamento do curso do rio ou a existências de vários canais simultâneos durante o processo de evolução da planície (fluviais).

5.2. ARCABOUÇO ESTRUTURAL E A BACIA DO ESPÍRITO SANTO

A área de pesquisa se localiza, como citado anteriormente, na denominada Bacia do Espírito Santo, delimitada geologicamente pelo alto de Vitória ao Sul, Paleocanyon de Mucuri ao norte, embasamento cristalino a oeste e Complexo Vulcânico de Abrolhos a leste, abrangendo continente e plataforma continental.

Segundo o EIA-RIMA da Fazenda Alegre, anteriormente citado, distinguem-se no preenchimento desta bacia rochas ígneas e sedimentares, que podem ser organizadas em duas fases em função do estilo tectônico atuante durante a deposição: *rift* e margem passiva, permeadas por uma fase de transição.

A Figura 27 mostra a delimitação e as principais feições estruturais da Bacia do Espírito Santo.

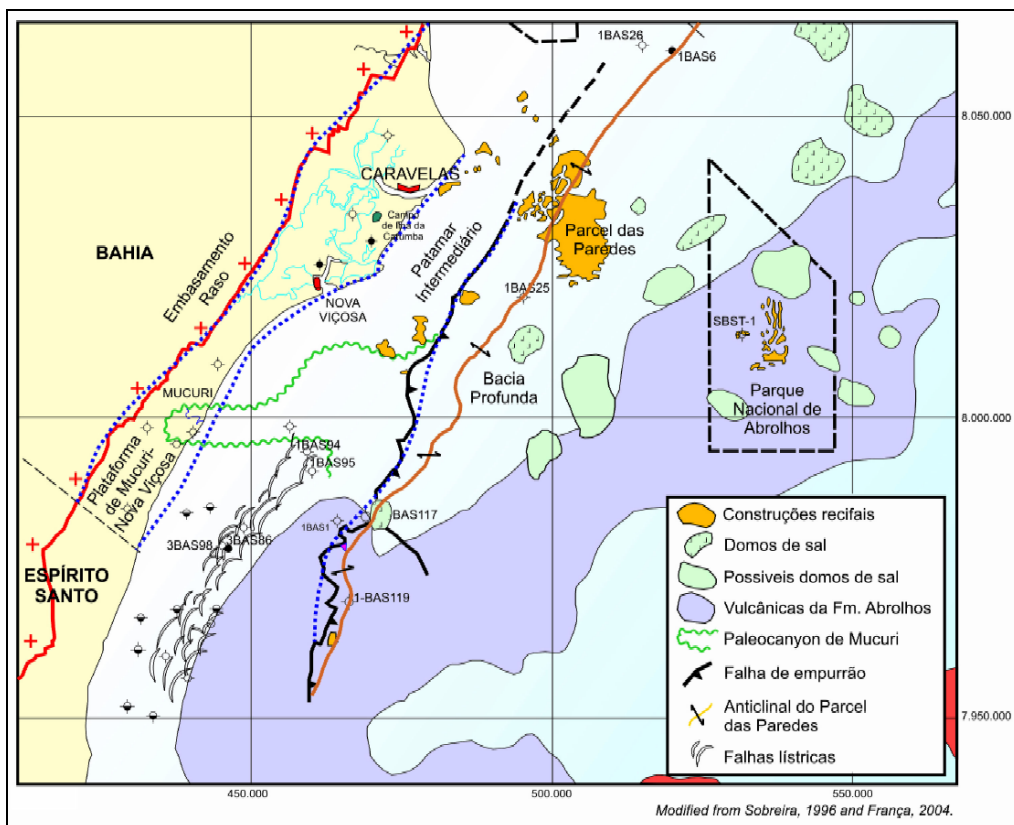


Figura 27 - Bacia do Espírito Santo – Limites e principais estruturas geológicas na região de pesquisa.

Fonte: Mohriac (2005).

Como seqüências *rift* têm-se as Formações Cricaré e Cabiúnas. A fase de transição para sedimentação marinha ocorreu por ocasião da deposição da Formação Mariricu e do início da deposição do Grupo Barra Nova. As seqüências marinhas de margem passiva são representadas pelos clásticos e carbonatos do Grupo Barra Nova e pelos sedimentos do Grupo Espírito Santo. Inicialmente, ocorreram sistemas pelíticos transgressivos e, a partir do Eoceno,

instalaram-se sistemas progradantes areno-carbonático-pelíticos representativos de plataforma-talude-bacia.

A estratigrafia da bacia envolve sedimentos com idades que variam do Cretáceo Inferior ao Terciário (Figuras 28 e 29).

Reconhece-se, nesta bacia, dois períodos distintos de eventos vulcânicos. O primeiro corresponde aos derrames da Formação Cabiúnas, constituídos por basalto, enquanto o segundo, considerado o mais importante pela espessura e abrangência total dos derrames e intrusões, é representado pela Formação Abrolhos.

Esta formação é composta por basaltos, diabásios, tufos, brechas vulcânicas, materiais piroclásticos e sedimentos intercalados. Corresponde à seqüência vulcanoclástica que aflora no Arquipélago de Abrolhos e às vulcânicas que formam as ilhas de Trindade e Martim Vaz. Esse magmatismo ocorreu no Terciário, com maior incidência no Neopaleoceno/Eoceno.

O Grupo Nativo, do Cretáceo Inferior, é um pacote sedimentar situado entre o embasamento cristalino e o Grupo Barra Nova, sendo representado por clásticos grosseiros, folhelhos e bancos de calcários não marinhos, intercalados nas vulcânicas da Formação Cabiúnas, tendo no topo uma seqüência de sedimentos evaporíticos. Compreende as formações Cricaré e Mariricu.

A Formação Cricaré foi depositada em ambiente continental, na forma de leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e lagos, e a Formação Mariricu representa a transição do ambiente continental para o marinho, ainda restrito e em clima árido.

O Grupo Barra Nova, do Cretáceo Médio, é composto pelas formações São Mateus (clásticos grosseiros) e Regência (carbonatos). O ambiente de deposição caracteristicamente era marinho raso, permitindo o desenvolvimento

de ampla plataforma carbonática, assoreada a oeste por um sistema de leques costeiros.

O Grupo Espírito Santo (Cretáceo Superior ao Terciário) compreende as formações Urucutuca, Caravelas e Rio Doce, depositadas em condições de mar mais profundo, em ambiente de plataforma/talude.

A Formação Urucutuca, na qual estão os depósitos de petróleo do campo de Fazenda Alegre, é composta por folhelhos com intercalações de conglomerado, calcário e arenito, depositados em ambientes de talude e bacia.

A Formação Caravelas é constituída por carbonatos que repousam localmente sobre as vulcânicas da Formação Abrolhos. O ambiente deposicional é de plataforma carbonática.

A Formação Rio Doce corresponde à seção basicamente arenosa, depositada em sistemas de leques costeiros, em ambientes marinhos.

A Figura 30 mostra um corte geológico característico da margem continental da Bacia do Espírito Santo, representando as regiões do paleocanyon de Regência, Plataforma de Regência, Paleocanyon de Fazenda Cedro e a Plataforma de São Mateus, onde se insere a área de Fazenda Alegre.

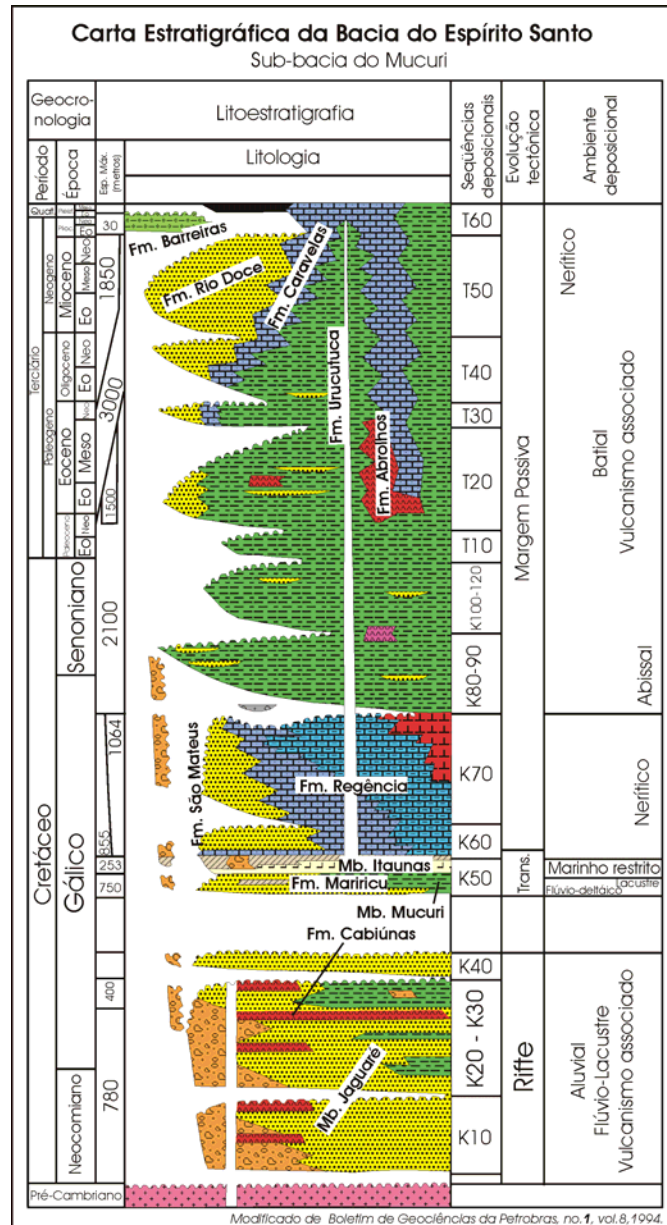


Figura 28 - Estratigrafia da Bacia do Espírito Santo.

Fonte: Petrobras (2007).

	CALCÁRIO		DIAMICTITO		CARNALITA
	MARGA		BASALTO		HALITA
	ARGILITO		DIABÁSIO		ANIDRITA
	FOLHELHO		METAMÓRFICAS		DOLOMITA
	SILTITO		ÍGNEAS		CALCILUTITO
	ARENITO		CARVÃO		CALCARENITO
	CONGLOMERADO		TAQUIDRITA		CALCIRRUDITO
			SILVINITA		

Figura 29 - Legenda da estratigrafia da Bacia do Espírito Santo.

Fonte: Petrobras (2007).

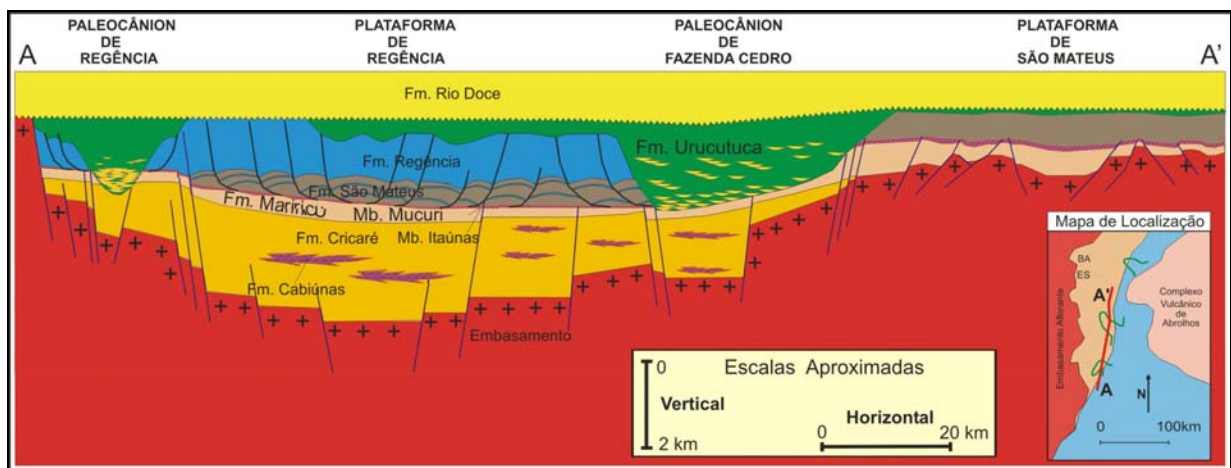


Figura 30 - Corte geológico em um trecho na faixa continental da Bacia do Espírito Santo. Adaptado da apresentação "Revitalização de Lagoa Parda – Ampliação de injeção de água produzida".

Fonte: Petrobras (2007).

6. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS

6.1. O método geofísico da eletrorresistividade

6.1.1. Introdução

No presente trabalho foi empregado o método geofísico de eletroresistividade, o qual se baseia no fato de que as rochas, em função de suas composições mineralógicas texturais e disposições, apresentam a propriedade elétrica da resistividade. A resistividade elétrica é a resistência que o material oferece à passagem da corrente elétrica. Em meios porosos, como no caso de rochas não consolidadas, o fluxo de corrente elétrica faz-se essencialmente ao nível do fluido intersticial e na camada limite entre a matriz sólida e o meio líquido; em meio não poroso tipo rochas fraturadas, a corrente elétrica é obrigada a atravessar o material constituinte da rocha antes de atingir as fraturas, sendo, portanto, sujeita a maior resistência (SACASA, 2004).

Os minerais de argila, por outro lado, conduzem a corrente elétrica tanto eletronicamente (no fluido), como através da dupla camada na interface mineral/eletrólito. Assim, a presença de argilo-minerais altera significativamente a resposta dos ensaios geofísicos normalmente por diminuição do valor da resistividade elétrica (BRAGA, 2001).

Com o objetivo de caracterizar os principais horizontes geoeletricos e suas respectivas espessuras e profundidades, optou-se, portanto, pelo método geofísico de eletrorresistividade, tradicionalmente utilizado para pesquisa de água subterrânea.

O método de eletrorresistividade consiste de medidas de impedância, com subsequente interpretação em termos de propriedade elétrica da estruturação geológica em subsuperfície, baseado na resposta de cada material ao fluxo de uma corrente elétrica (WARD, 1990). Quando uma corrente é introduzida no solo através de dois eletrodos, esta produz uma diferença de potencial que é medida por um segundo par de eletrodos. O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade aparente do solo e

do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo a profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (ORELLANA, 1972).

É consenso na literatura que existem basicamente dois tipos principais de modos de operação para qualquer método de resistividade: (1) sondagem elétrica vertical ou simplesmente SEV (*vertical electrical sounding*) e (2) caminhamento elétrico ou caminhamento lateral ou simplesmente CE (*lateral profiling*). As Figuras 31 e 32 apresentadas abaixo ilustram graficamente essas técnicas.

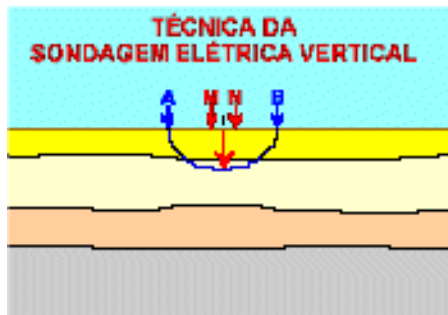


Figura 31 - Técnica da Sondagem Elétrica Vertical

Fonte: Braga (2001).



Figura 32 - Técnica do Caminhamento Elétrico.

Fonte: Braga (2001).

(1) Na sondagem elétrica vertical, conhecida como SEV, a separação dos eletrodos de emissão de corrente elétrica é variada, e os resultados são interpretados em termos de camadas ou estratos geoeletricos. É usada para camadas horizontalizadas, quando existe a necessidade de se conhecer a variação vertical de resistividade e, assim, inferir a profundidade (espessura) e resistividade aparente das camadas presentes. O procedimento é baseado no fato de que a corrente penetrará continuamente em profundidade à medida que aumenta o espaçamento entre os eletrodos de corrente.

(2) No caminhamento elétrico, transmissores e receptores são movidos ao longo da superfície para detectar variações laterais de resistividade a partir de uma determinada profundidade de investigação.

- **Equações básicas**

Analisando o caso para um terreno homogêneo de resistividade ρ , se introduzir através de um eletrodo pontual **A** uma corrente contínua de intensidade i , esta fluirá radialmente onde as superfícies equipotenciais seriam semi-esferas concêntricas de raio r (Figura 33).

Aplicando a lei de Ohm no espaço compreendido entre duas equipotenciais, teremos uma diferença de potencial ΔV , dada por:

$$- \Delta V = \rho \Delta r i / 2\pi r^2$$

Integrando-se:

$$V = \rho i / 2\pi r$$

Na prática, a diferença de potencial é medida através de um arranjo de 4 eletrodos, sendo dois de corrente nos extremos (**A** e **B**) e dois de potencial no centro do arranjo (**M** e **N**) (Figura 34).

Nos eletrodos externos **A** e **B** introduz-se corrente e nos internos **M** e **N**, é medido a diferença de potencial. Aplicando a fórmula de ΔV para um terreno homogêneo e isotrópico tem-se:

$$\Delta V = \frac{1}{2\pi} (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN) \rho i$$

fazendo:

$$K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN) \quad \text{ou} \quad K = \frac{(AM \times AN) \pi}{MN}$$

Desta forma a equação da resistividade aparente fica simplificada como mostrado abaixo, sendo conhecida como fórmula fundamental da eletrorresistividade:

$$\rho = K \Delta V / I$$

Onde **K** é uma constante que depende do arranjo geométrico dos eletrodos, ou seja, está baseado nas distâncias lineares entre os eletrodos de corrente e de potencial.

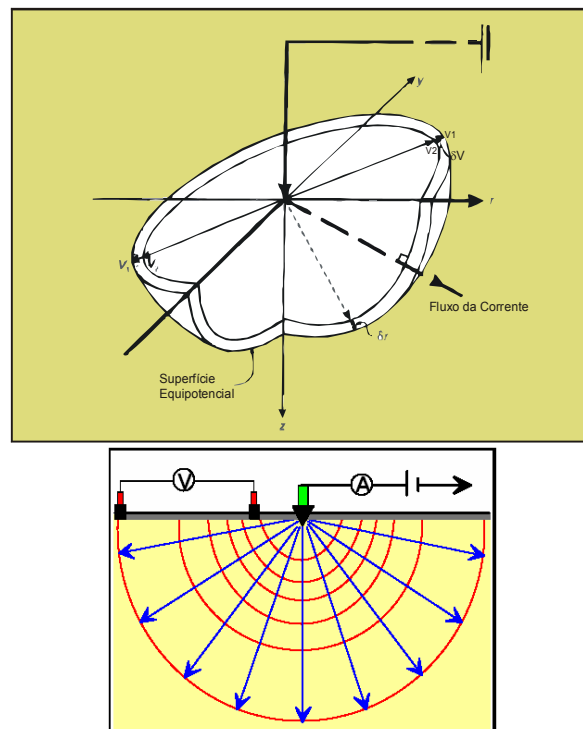


Figura 33 - Relação entre o fluxo de corrente elétrica e superfícies equipotenciais a partir de uma fonte pontual

Fonte: Baseado em Reynolds (1997).

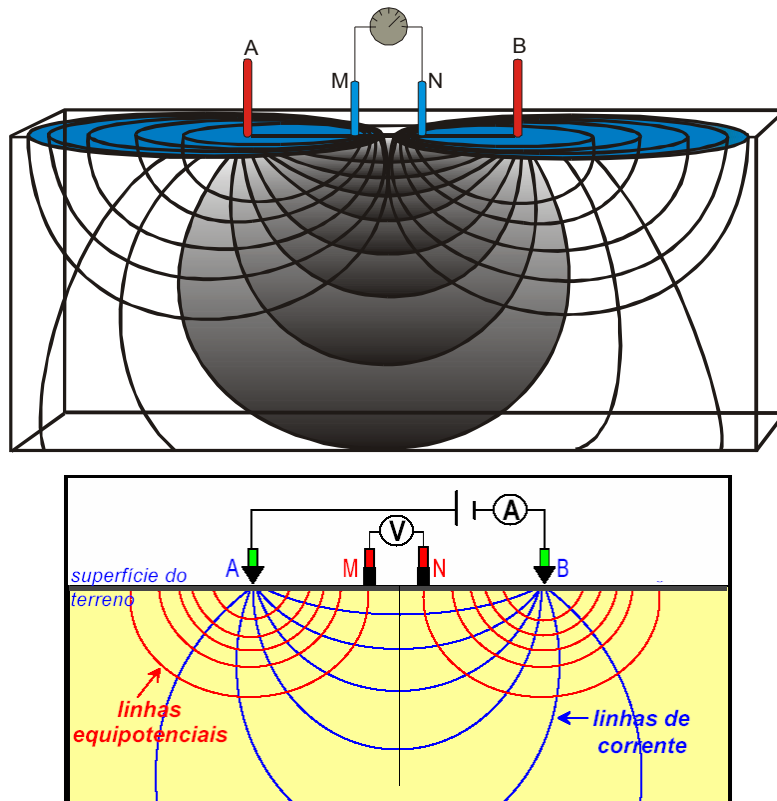


Figura 34 - Figuras ilustrativas para o arranjo Schlumberger, adotado neste trabalho, e a relação entre as linhas de corrente e as superfícies eqüipotenciais. A e B representam os eletrodos de injeção de corrente elétrica; M e N representam os eletrodos de medida da diferença de potencial. Notar que um conjunto “eletrorresistívmetro” fica caracterizado por um amperímetro (A) e por um voltímetro (V)

Fonte: Baseado em Cunha (2002) e Braga (2001).

Para um terreno não-homogêneo e não-isotrópico, o valor calculado através da fórmula acima é chamado, por particularidades do meio geológico, de resistividade aparente (ρ_a), em que a unidade de medida é dada em ohm.m.

Assim,

$$\rho_a = K \Delta V / I$$

6.1.2. Metodologia utilizada

O arranjo de eletrodos utilizado nas Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) foi aquele proposto por Schlumberger (ORELLANA, 1972). No caso das SEVs, o espaçamento dos eletrodos externos (A e B) é aumentado progressivamente, obtendo-se medidas de investigação cada vez mais profundas, num único ponto em profundidade. O espaçamento dos eletrodos internos (M, N) é aumentado a cada vez que esta distância for cinco vezes menor do que a separação dos primeiros ($MN \leq AB/5$). Deste modo, é possível medir as variações de resistividade aparente com o aumento da profundidade de investigação.

Utilizando-se AB máximo de 500 m, foram executadas seis SEVs na área de estudo em questão, cuja distribuição com suas respectivas coordenadas UTM e direção da abertura dos cabos encontra-se na Tabela 22. Cada sondagem consistiu, em média, de 28 leituras realizadas com o equipamento eletrorresistívmetro PER-500 (DPM-Engenharia) de fabricação nacional (Figura 35).



Figura 35 - Eletrorresistívmetro PER 500 constituído de fonte de 500W e receptor geração de corrente I e medida da diferença de potencial DV.

Ainda foram reinterpretados os dados de dez sondagens elétricas verticais existentes também na área de pesquisa. Estas, com exceção da FAL-04.A e

FAL-05.A por não terem informadas suas coordenadas nos relatórios analisados, e as novas seis SEVs executadas (Tabela 22) têm suas localizações mostradas na Figura 36.

Tabela 22 - Sondagens elétricas verticais realizadas na região de pesquisa

Sondagem Elétrica	Coordenadas UTM		Direção da SEV
	Este	Norte	
FAL-01	410.295	7.898.984	10° Az
FAL-02	410.097	7.897.831	10° Az
FAL-03	409.605	7.900.646	90° Az
FAL-04	408.885	7.899.464	120° Az
FAL-05	409.239	7.898.611	172° Az
FAL-06	409.224	7.898.024	90° Az

Mapa de posicionamento das sondagens elétricas verticais CAMPO DE FAZENDA ALEGRE - FAL

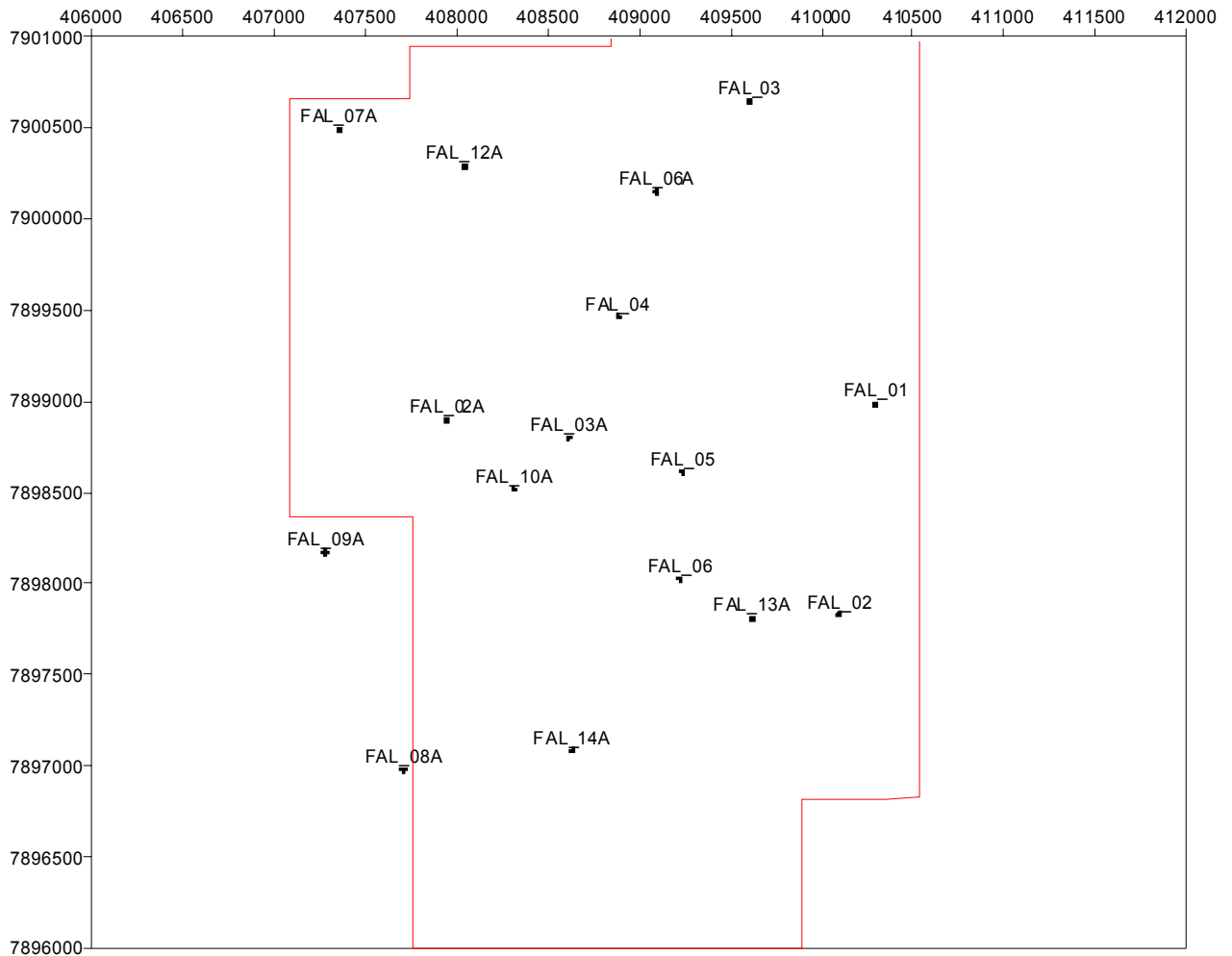


Figura 36 - Mapa de posicionamento das SEVs no Campo de Fazenda Alegre.

6.1.3. Processamento e interpretação dos dados

Uma vez que a resistividade aparente medida em campo não é uma propriedade física da subsuperfície, é necessário a utilização de técnicas de interpretação que transformem os valores obtidos pelas sondagens elétricas verticais em resistividades aparentes representativas dos pacotes ou camadas investigadas, levando-se em consideração suas espessuras.

As curvas de campo foram interpretadas através da metodologia desenvolvida por Castelo Branco et al.(2003) (Figura 37).

Inicialmente, os dados de campo constantes das fichas de campo e dos diagramas bilogarítmicos foram convertidos para meio digital utilizando-se planilhas eletrônicas e diagramas semi-automatizados através dos *softwares* Excell 7.0[®] e Grapher 4.0[®]. Nessa etapa, os dados tiveram uma primeira avaliação quanto à qualidade e uma primeira interpretação qualitativa considerando resistividades e profundidades de investigação.

Posteriormente, os dados de campo em formato digital foram processados através do *software* ATO[®], versão 1.82 (ZOHDY; BISDORF, 1989) em que, basicamente, cada ponto de medida é considerado como uma camada geométrica distinta com dois parâmetros associados: resistividade aparente e espessura.

A terceira etapa consistiu em agrupar camadas que possuem comportamento geométricos semelhantes, utilizando as informações geológicas e hidrogeológicas regionais e de campo que foram possíveis.

Em seguida, os dados foram novamente processados (invertidos) no *software* RESIST[®], versão 1.0 (VANDER VELPEN, 1988), com a introdução de um modelo inicial de n-camada com suas respectivas resistividades e espessuras, obtido da primeira etapa de interpretação.

O método de inversão, segundo Ward (1990), consiste, de uma forma simplificada, em calcular uma curva teórica e compará-la com a curva de campo. A comparação é feita utilizando a técnica de mínimos-quadrados entre os valores observados de ρ_a versus **AB/2** (curva de campo) e os valores calculados de ρ_a devido a 4 eletrodos sobre n-camada (curva teórica). Este método possibilita que a cada tentativa de comparação, o erro RMS convirja para valores menores, até um limite aceitável, geralmente < 5%.

A Figura 38 apresenta dois perfis litológicos de poços tubulares construídos na área do Campo da Fazenda Alegre.

Com base nesses dados, é possível identificar cinco camadas litológicas principais, caracterizadas por uma alternância de camadas de arenitos argilosos e muito argilosos, arenitos e argilitos.

As Figuras 41 a 59 apresentam um resumo do processamento efetuado nas 18 sondagens elétricas verticais realizadas nessa área (6 executadas e 12 reinterpretadas), desde os dados de campo até o modelo geoeétrico esperado. Vale ressaltar a utilização de dados de eletrorresistividade pré-existentes que foram reinterpretados nesta área de FAL.

Como podem ser observadas, as 18 sondagens elétricas adotadas apresentam o mesmo padrão geral, em que a resistividade diminui gradativamente com a profundidade. As curvas de eletrorresistividade que foram interpretadas nesta pesquisa podem ser agrupadas em três grupos qualitativos na classificação de Mooney e Orellana (1966). De um modo geral todas elas têm terminações decrescentes, pois as variações concentram-se fundamentalmente nos primeiros estratos geoeétricos mais rasos que foram investigados. O primeiro grupo está representado pelas sondagens elétricas verticais FAL_:01, 03, 04, 05 (Figuras 41, 42, 43, 44 e 45 respectivamente) e pelas sondagens elétricas verticais FAL_ALE: 2, 4 e 10 (Figuras 47, 49 e 55 respectivamente), em que todas elas correspondem a curvas decrescentes do Tipo QQ. O segundo grupo está representado pela sondagem elétrica vertical FAL_: 06 (Figura 46) e pelas sondagens elétricas verticais FAL_ALE:, 6, 8, 9, 12 e 14 (Figuras 51, 53, 54, 56 e 58 respectivamente) correspondem ao padrão do tipo KQ. Um terceiro grupo de sondagens está representado pela sondagem elétrica vertical FAL_: 02 (Figura 42), e pelas sondagens elétricas verticais FAL_ALE: 5 e 13 (Figura 50 e 57 respectivamente) e correspondem ao tipo QK.

As sondagens elétricas verticais FAL_ALE: 3 e 7 (Figuras 48 e 52 respectivamente) são do tipo HQ. Fica claro que por uma única exceção neste agrupamento (Grupo 02) todos os demais têm terminações Q, de curva decrescente e indicando passagem para camada geoeétrica relativamente condutiva.

No processo de modelagem e inversão dos dados foram identificadas cinco camadas geoeletrica.

A Figura 59 apresenta uma seção geoeletrica esquemática obtida com o resultado do processo de modelagem das curvas de campo.

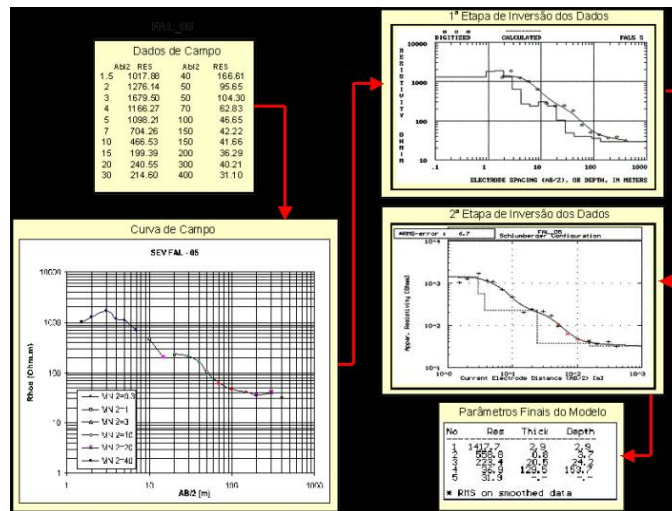


Figura 37 - Roteiro seguido para processamento e interpretação pontual de uma Sondagem Elétrica Vertical típica da área de FAL.

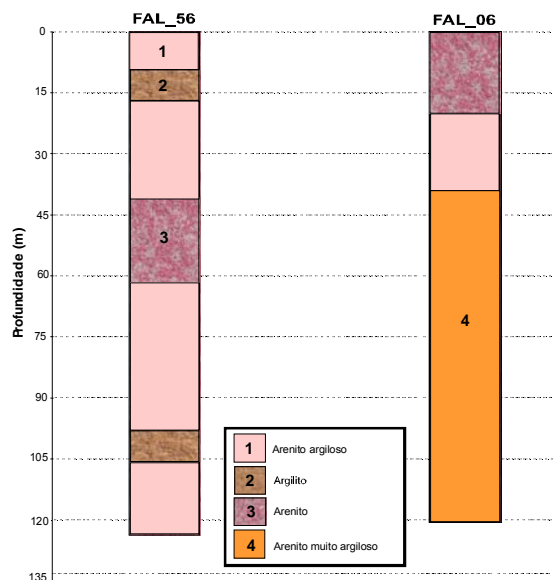


Figura 38 - Perfil litológico dos poços tubulares profundos FAL-56 e FAL-06.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram o equipamento utilizado e a aquisição de dados na área de pesquisa.



Figura 39 - Centro da SEV FAL-06 onde se localiza o equipamento e posicionamento dos eletrodos.



Figura 40 - Centro da SEV FAL-05 e vista do equipamento de eletrorresistividade.

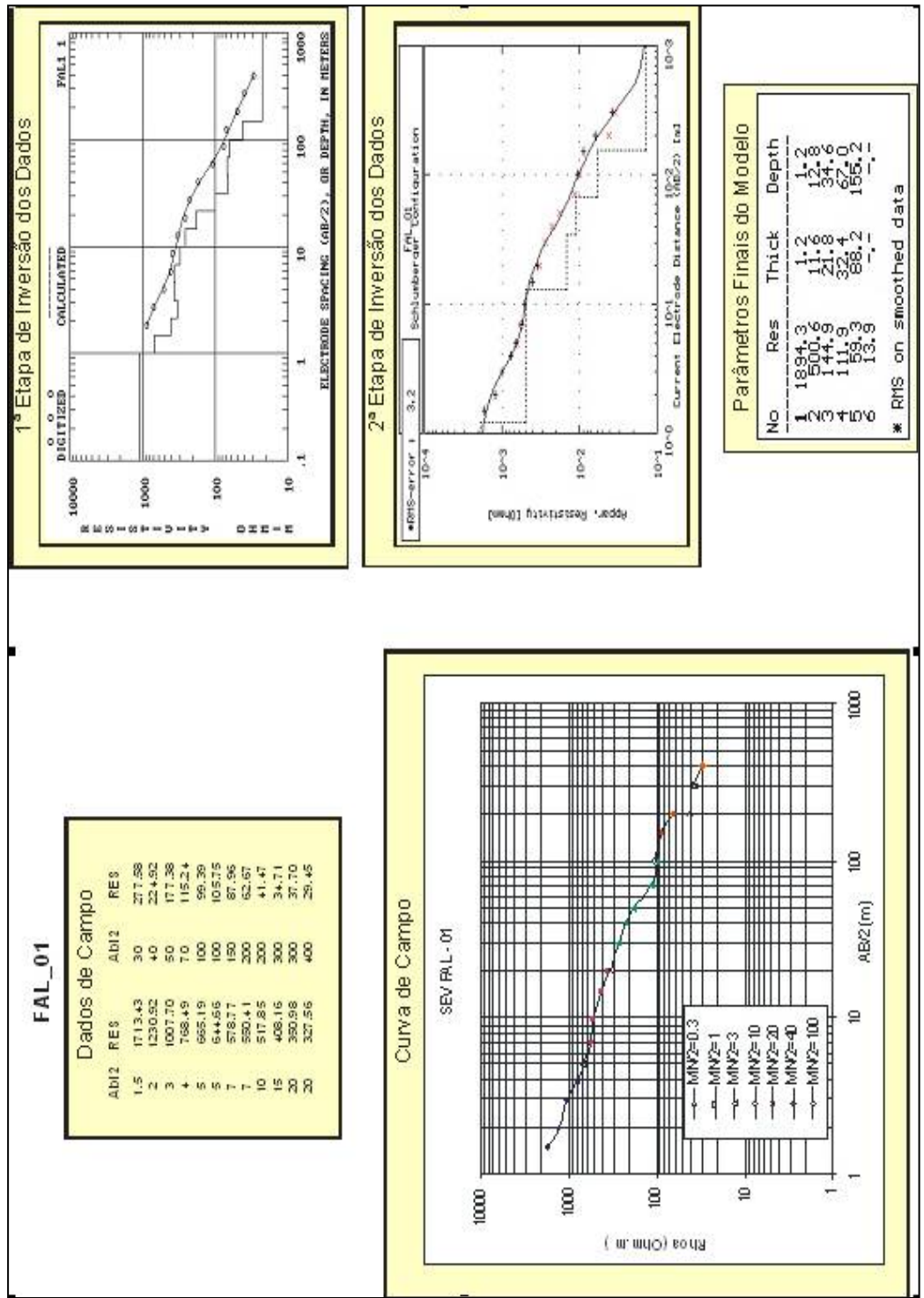


Figura 41 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-01.

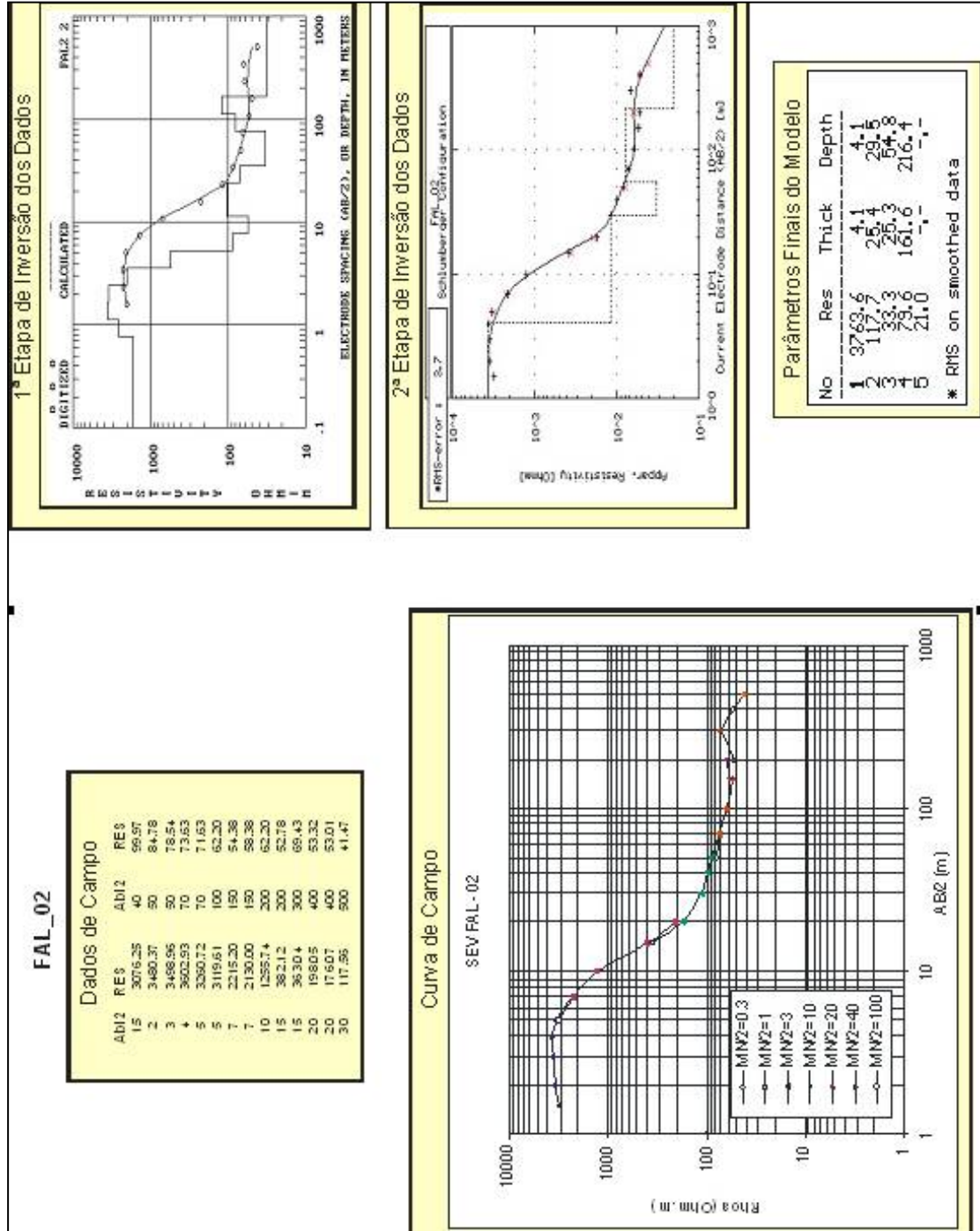


Figura 42 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-02.

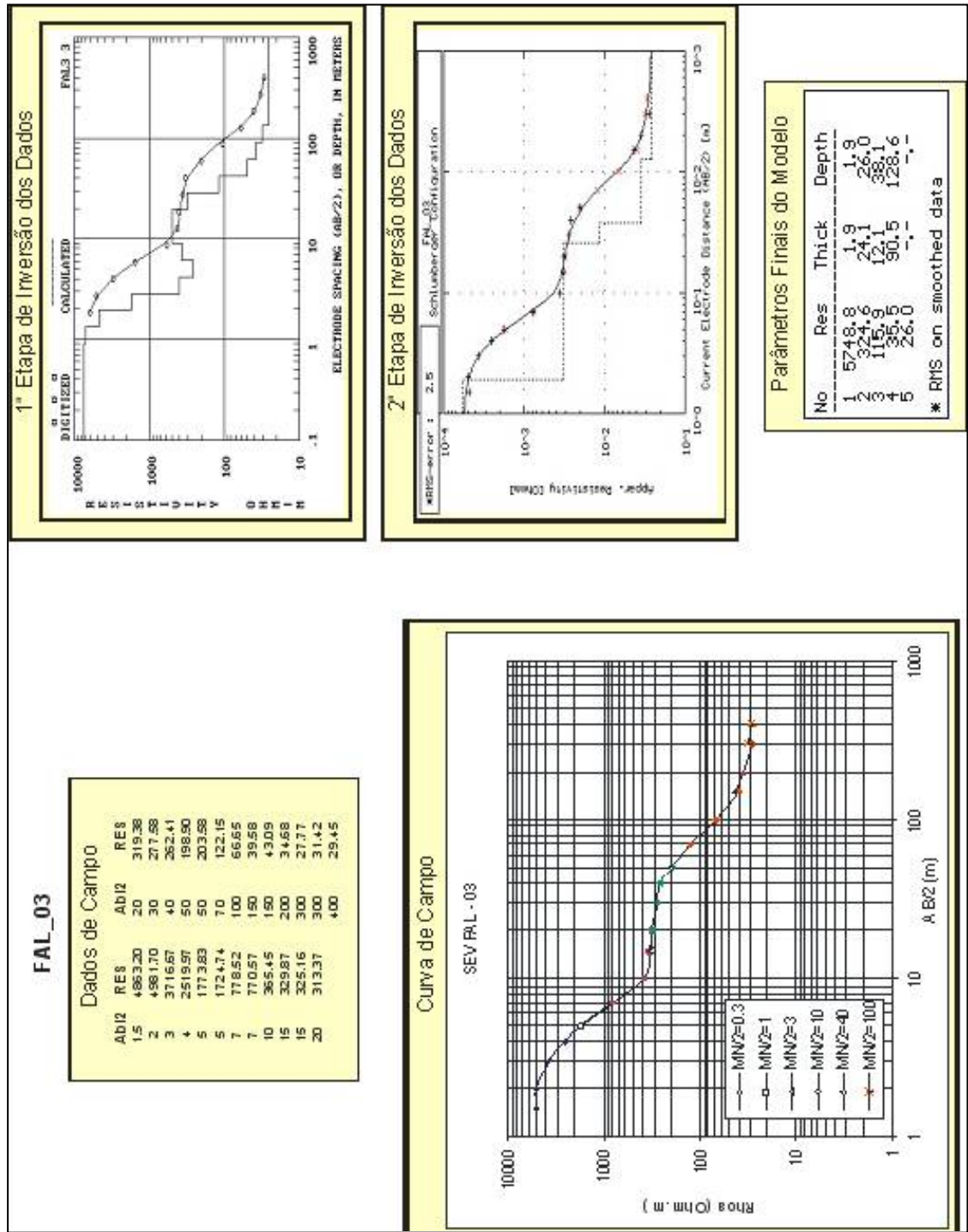


Figura 43 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-03.

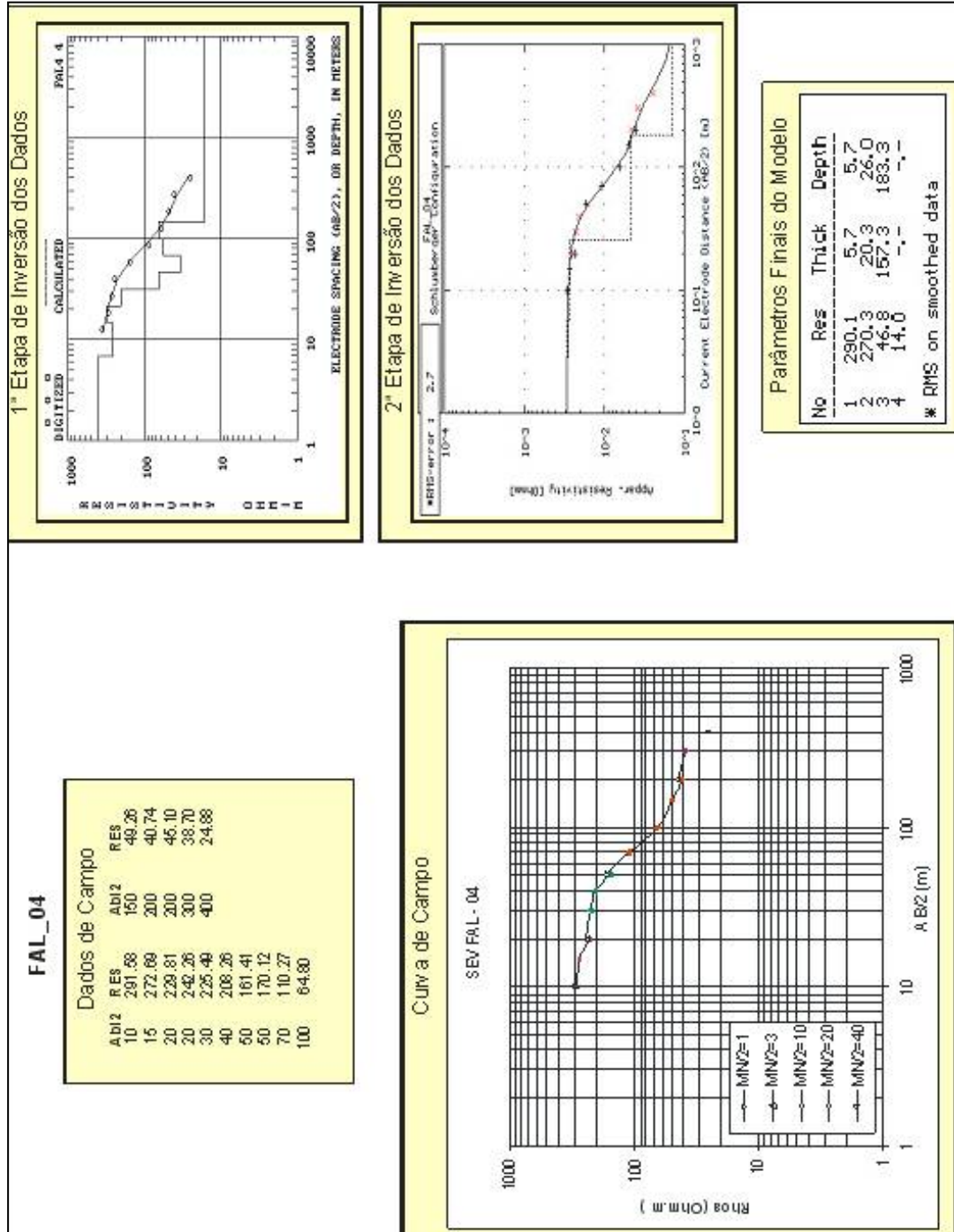


Figura 44 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-04.

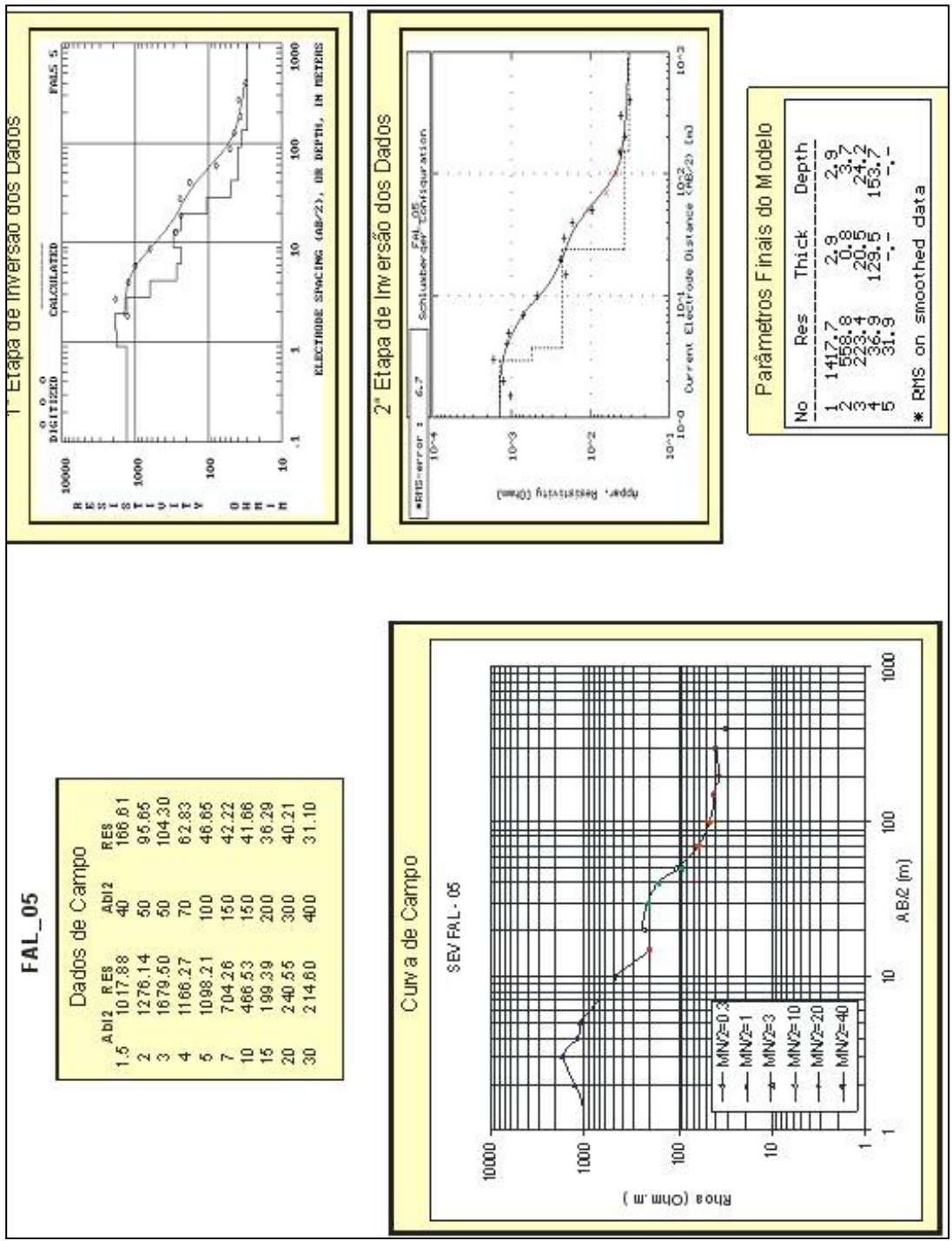


Figura 45 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-05.

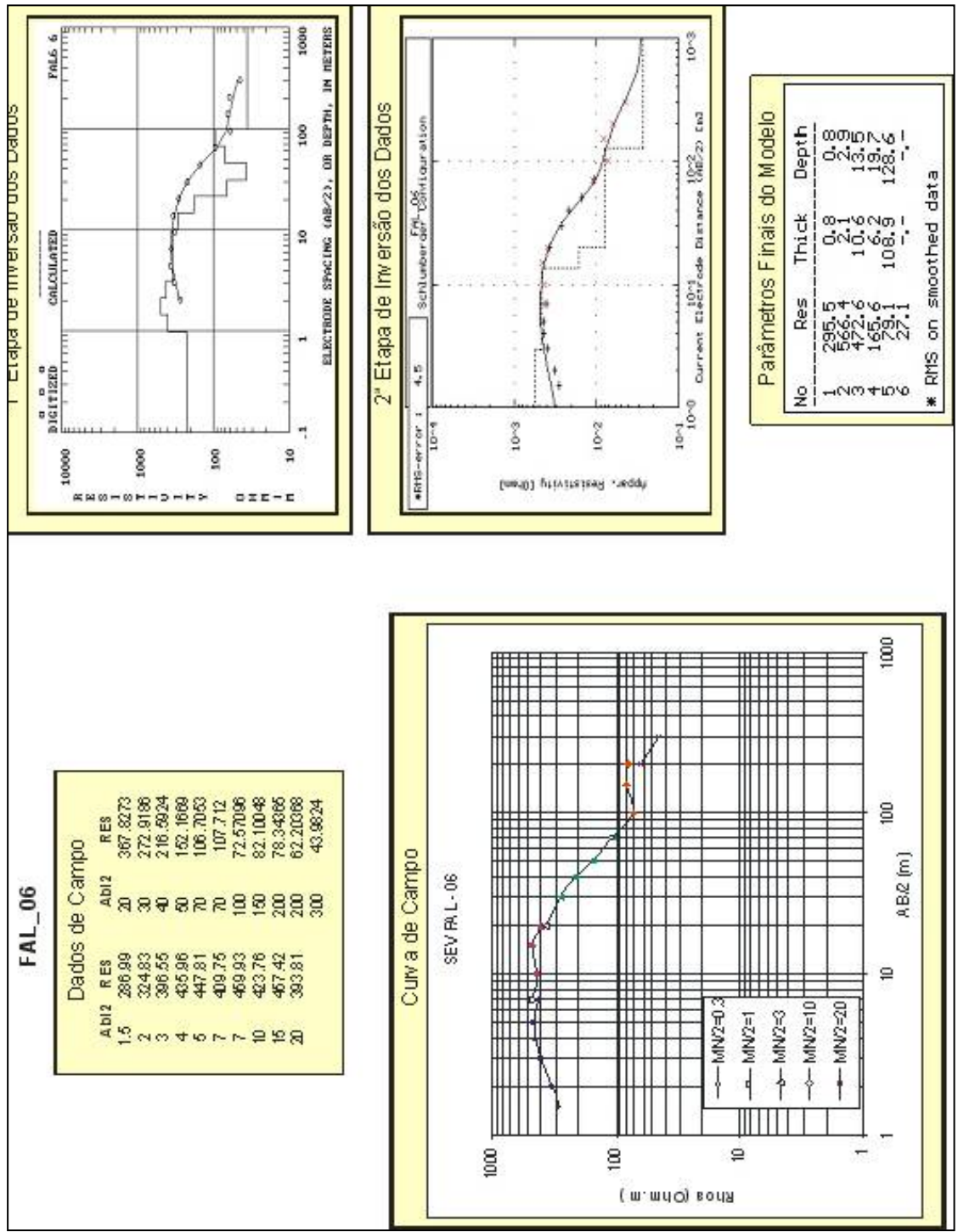


Figura 46 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-06.

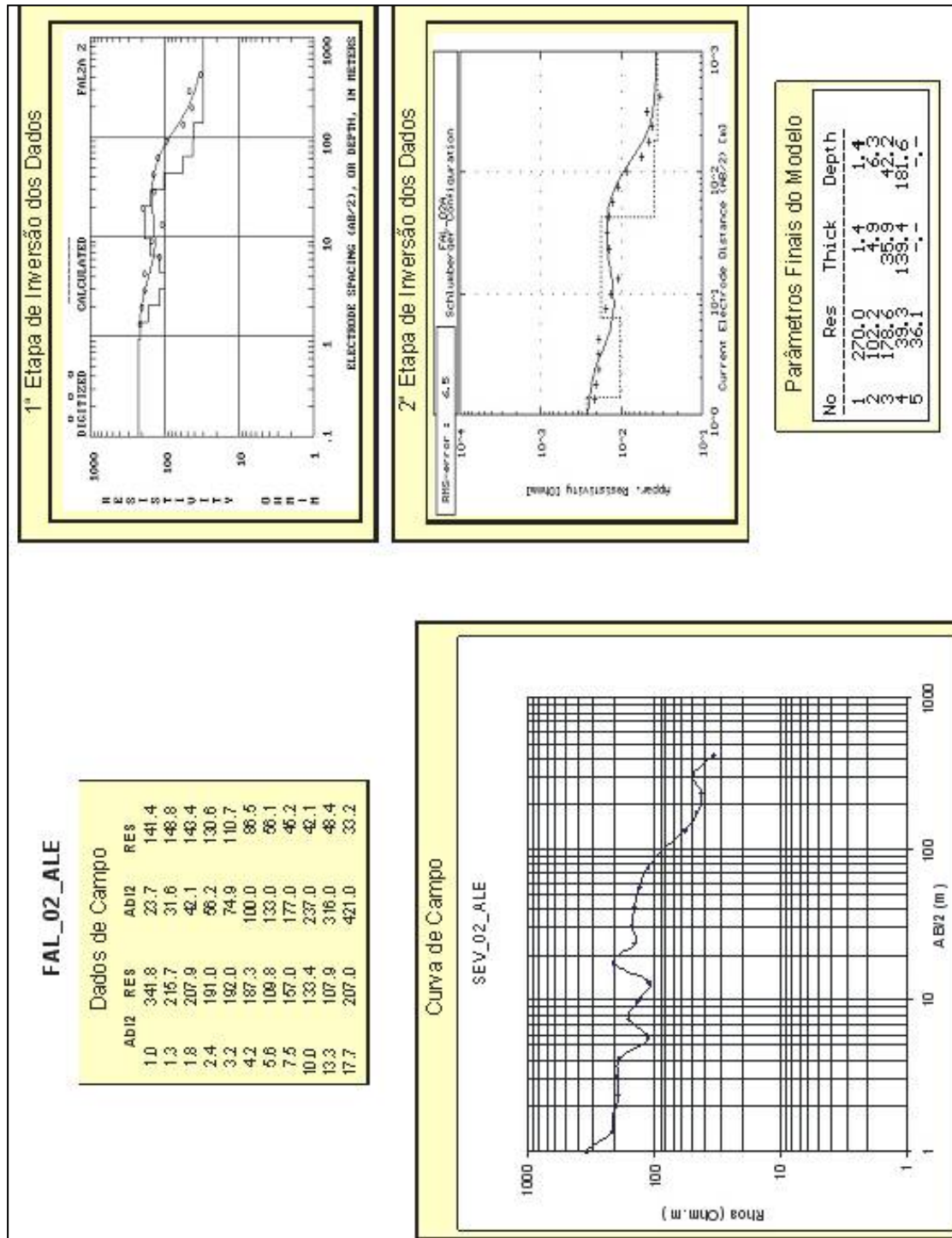


Figura 47 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-02_ALE.

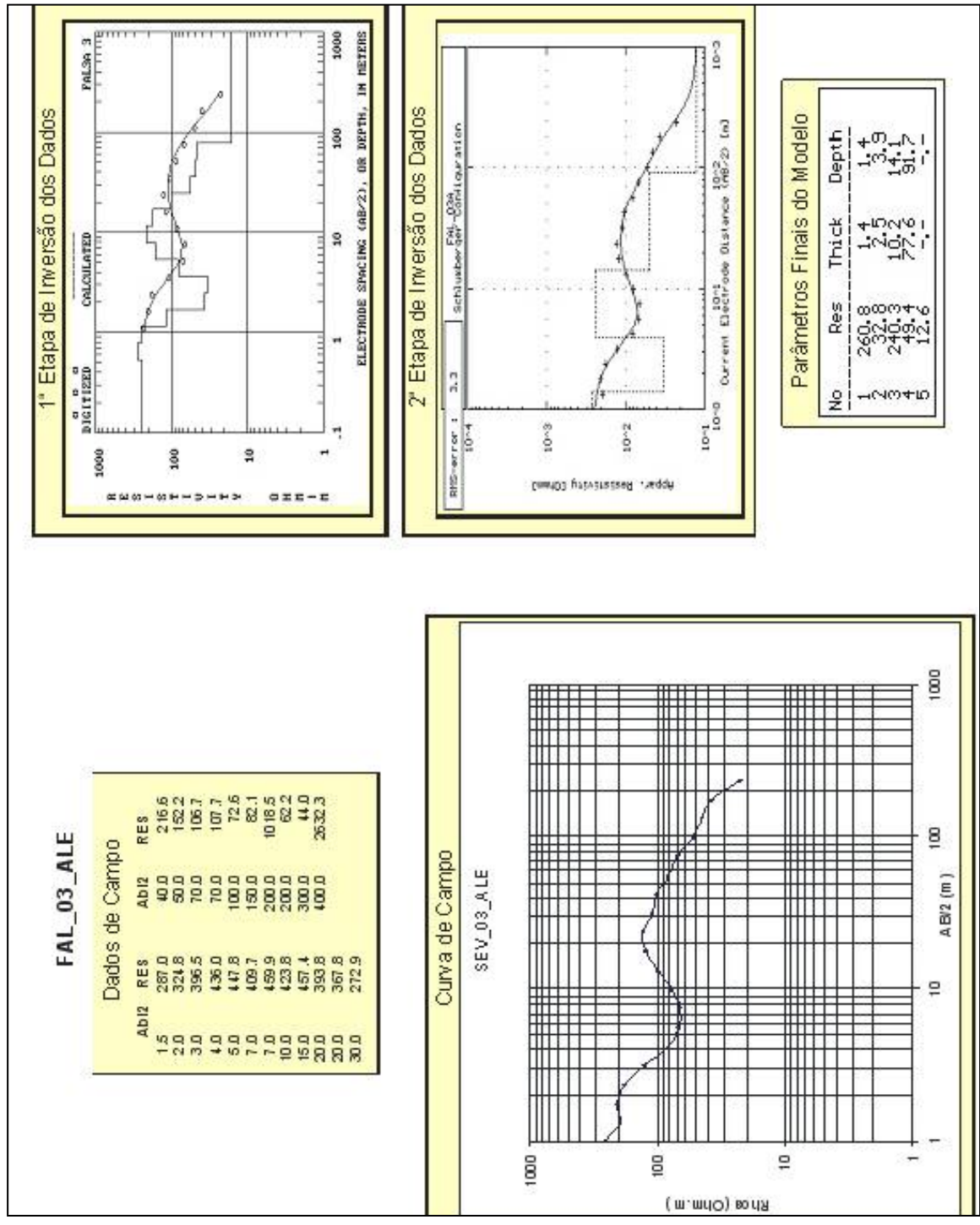


Figura 48 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-03_ALE.

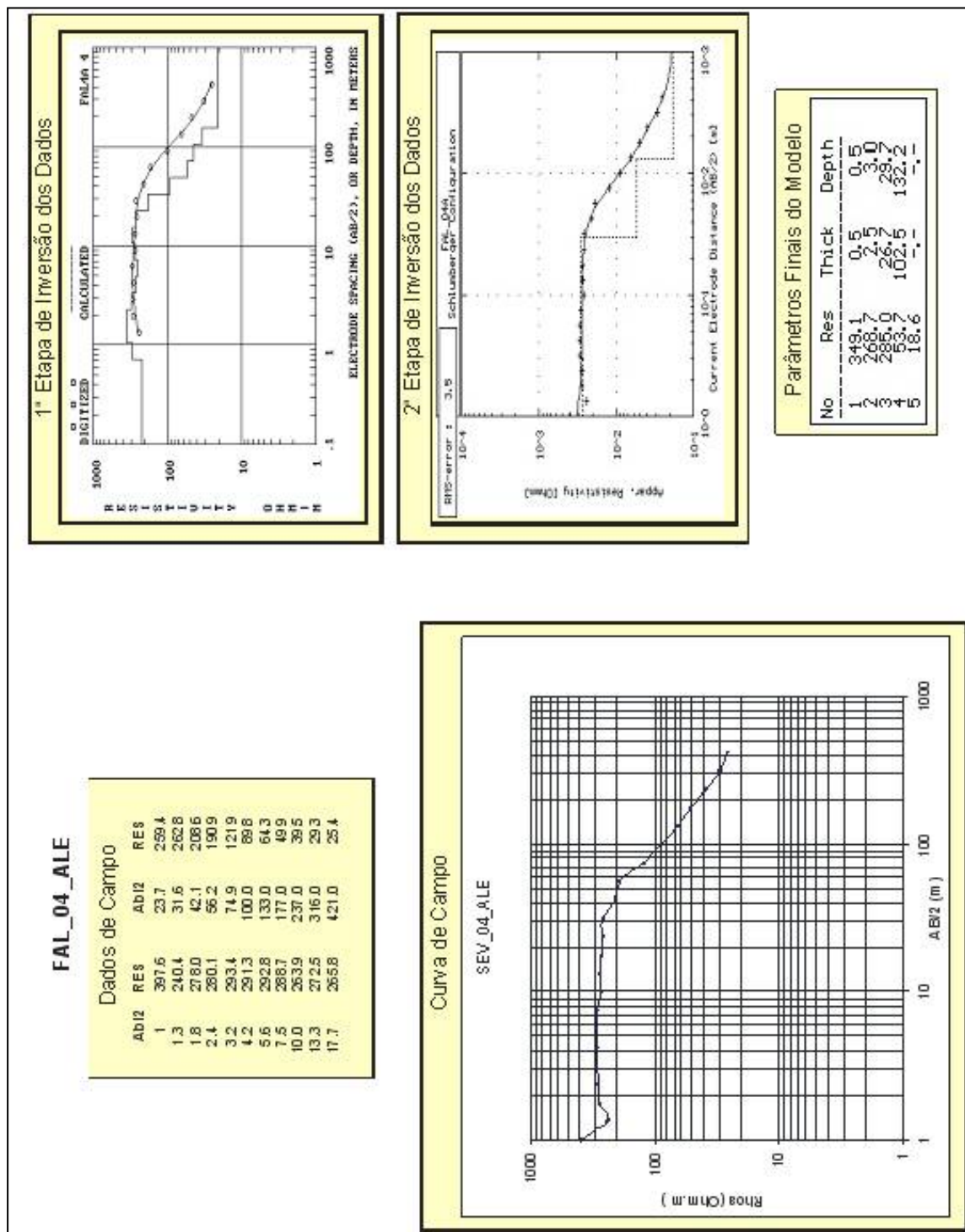


Figura 49 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-04_ALE.

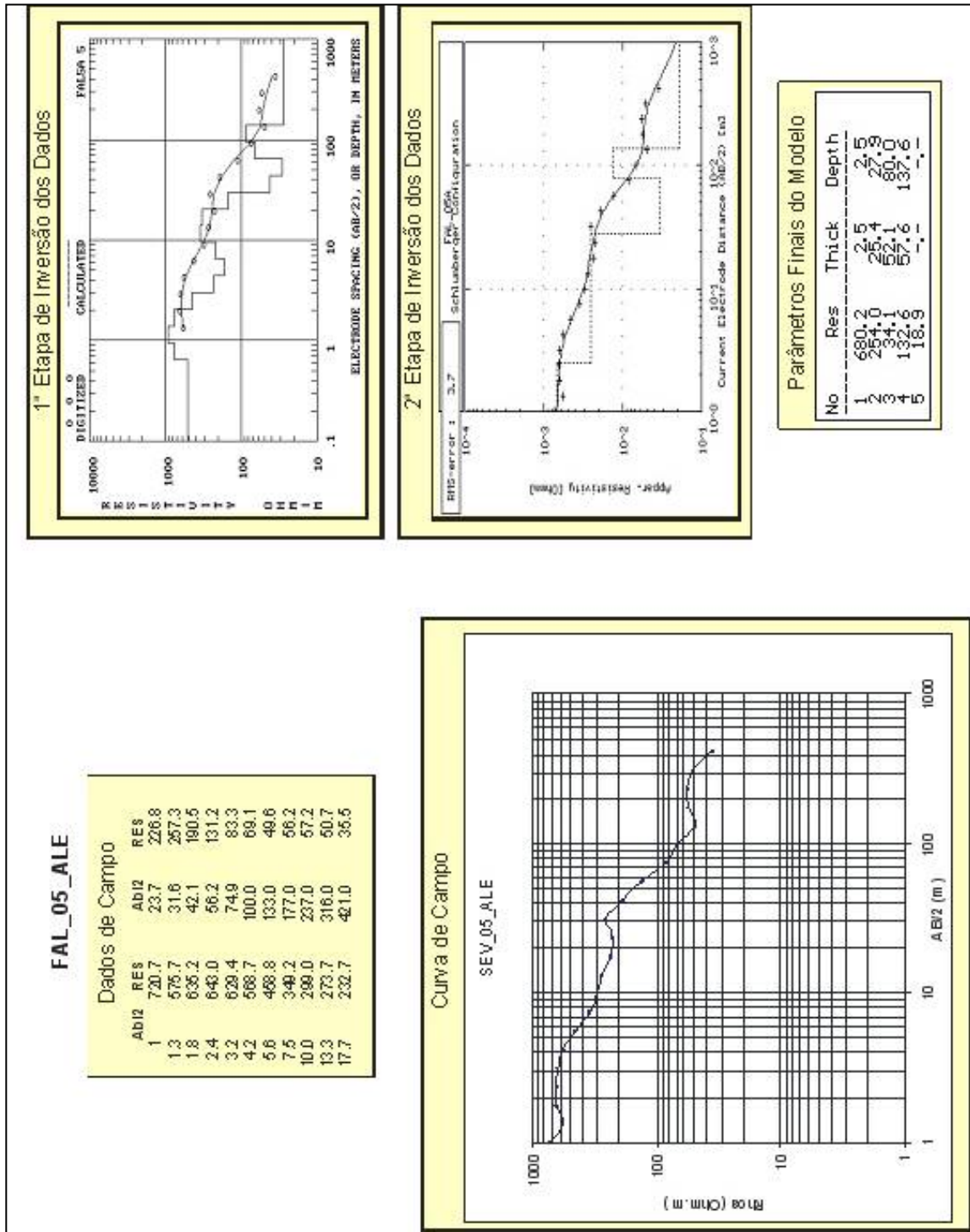


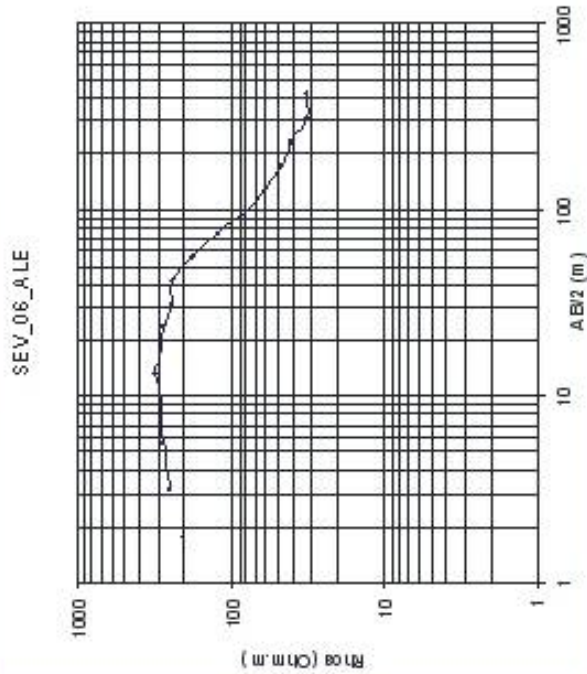
Figura 50 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-05_ALE.

FAL_06_ALE

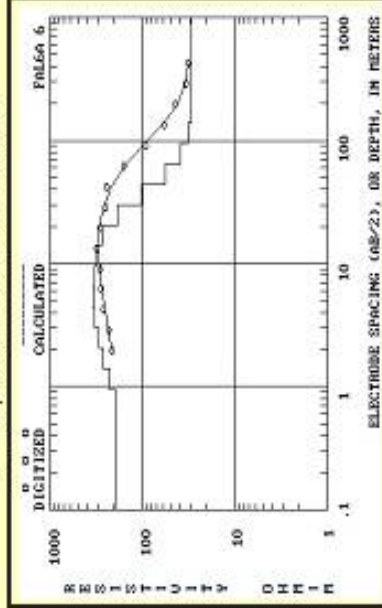
Dados de Campo

Abi2	RES	Abi2	RES
1.77	203.7	42.1	242.8
3.16	260	56.2	178.4
4.21	264.4	74.9	123.5
5.62	274.9	100	80.3
7.49	289.8	133	58.8
10	293	177	46.1
13.3	310.5	237	40.3
17.7	290	316	31.6
23.7	277.2	421	32.3
31.6	243		

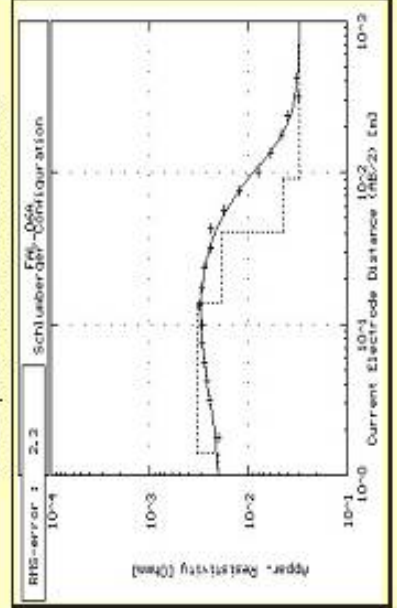
Curva de Campo



1ª Etapa de Inversão dos Dados



2ª Etapa de Inversão dos Dados



Parâmetros Finais do Modelo

No	Res	Thick	Depth
1	199.5	1.4	1.4
2	331.6	12.6	14.0
3	183.3	26.4	40.4
4	44.7	50.9	91.3
5	30.0	-	-

Figura 51 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-06_ALE.

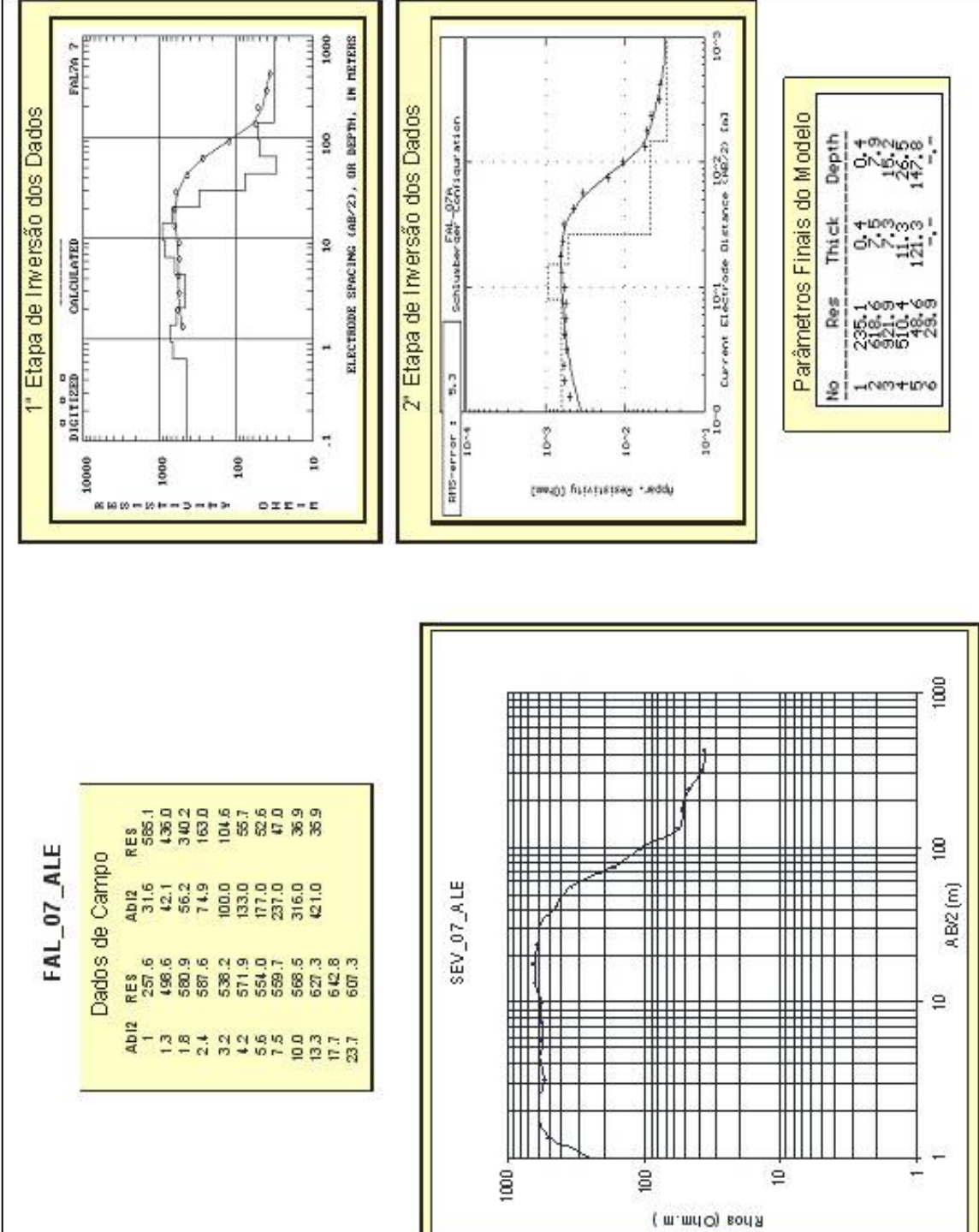


Figura 52 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-07_ALE.

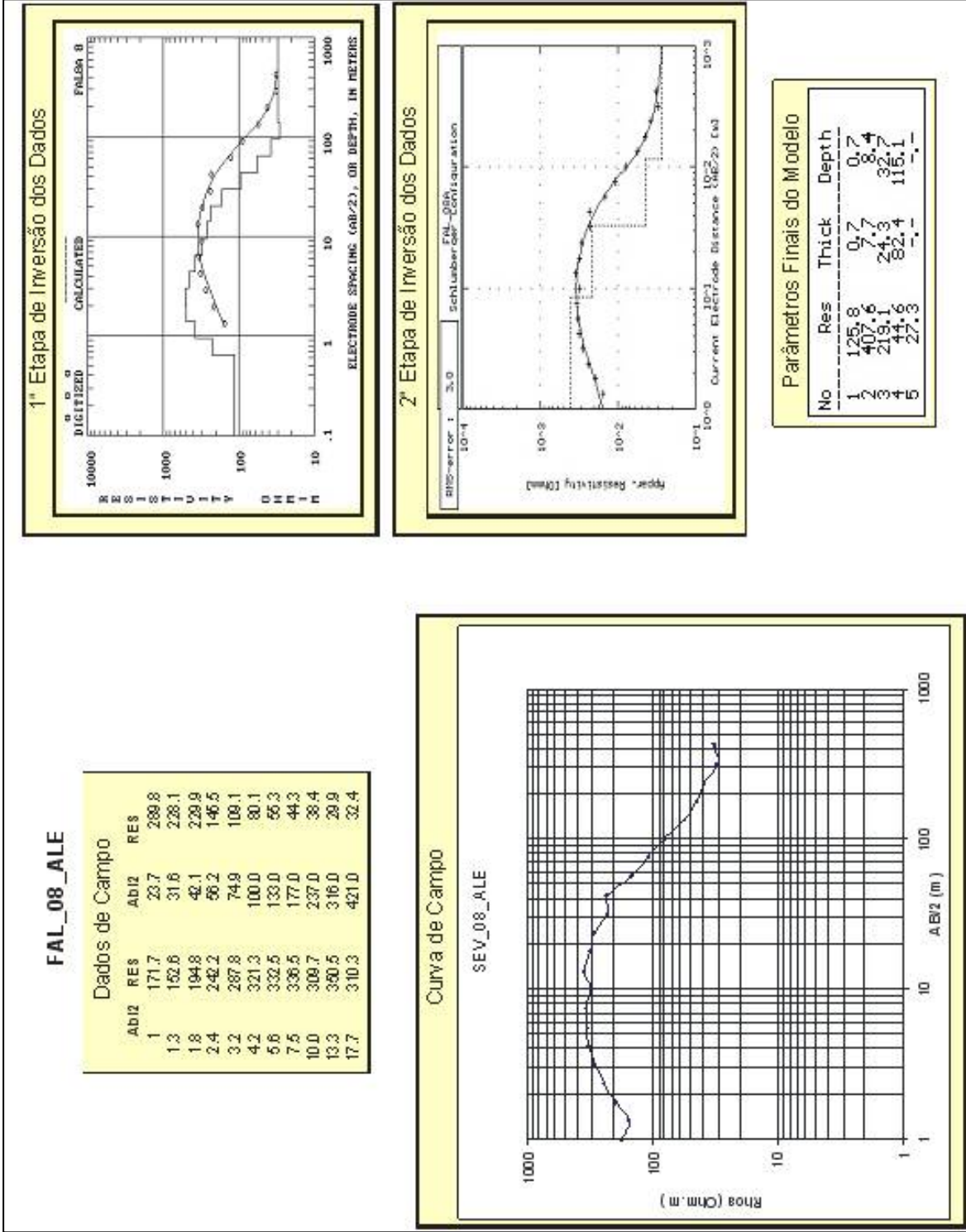


Figura 53 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-08_ALE.

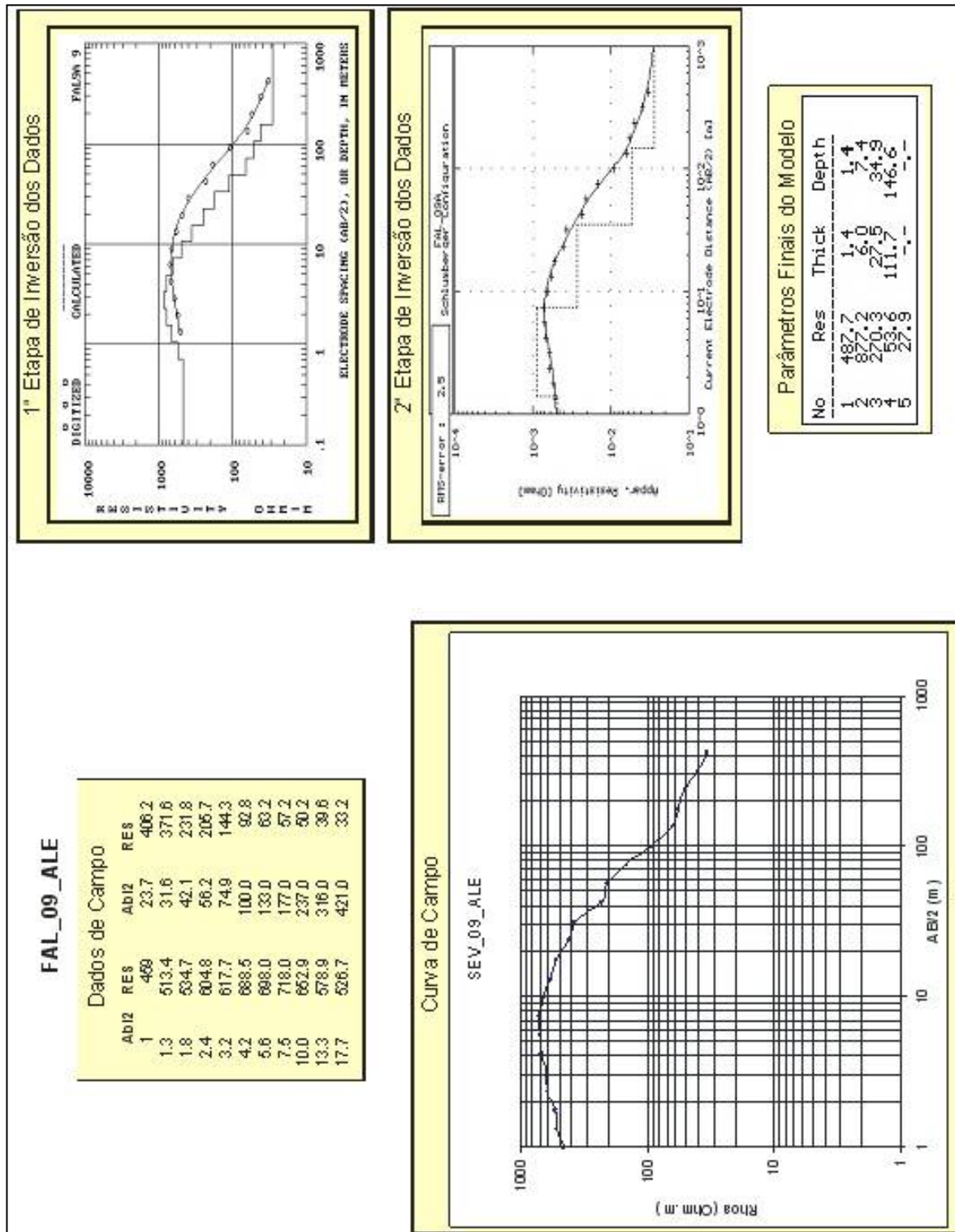


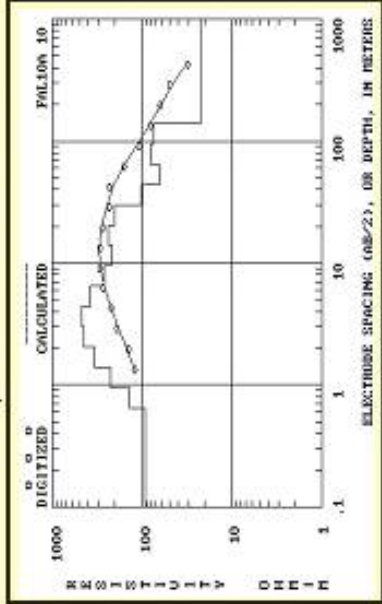
Figura 54 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-09_ALE.

FAL_10_ALE

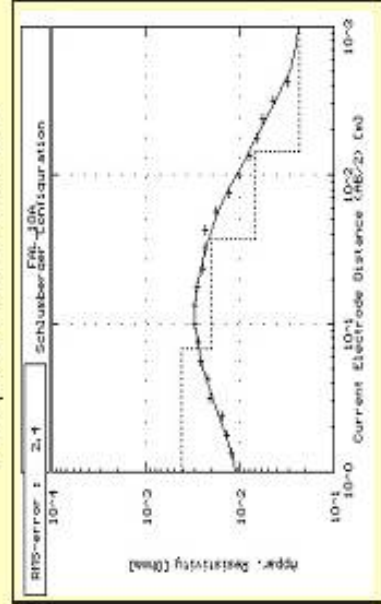
Dados de Campo

ABIZ	RES	ABIZ	RES
1	106.3	23.7	245.8
1.33	121	31.6	231.1
1.77	137.2	42.1	234.6
2.37	155.1	56.2	179.5
3.16	205.7	74.9	129.6
4.21	222.3	100	102.2
5.62	253.3	133	79.7
7.49	280.7	177	65.85
10	300.3	237	58.2
13.3	299	316	44.7
17.7	285.6	421	31.6

1ª Etapa de Inversão dos Dados



2ª Etapa de Inversão dos Dados



Parâmetros Finais do Modelo

No	Res	Thick	Depth
1	98.2	1.0	1.0
2	421.9	5.7	6.7
3	202.8	29.9	36.6
4	68.4	102.6	144.1
5	23.1	316.1	421.1

Curva de Campo

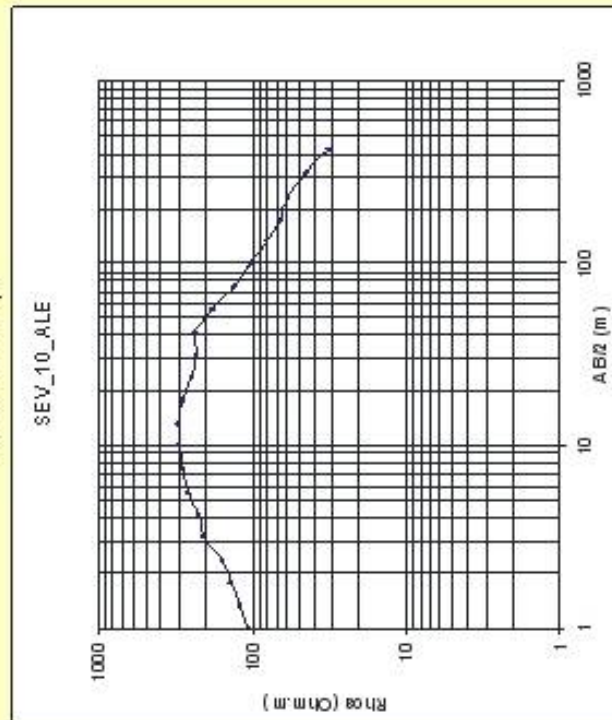


Figura 55 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-10_ALE.

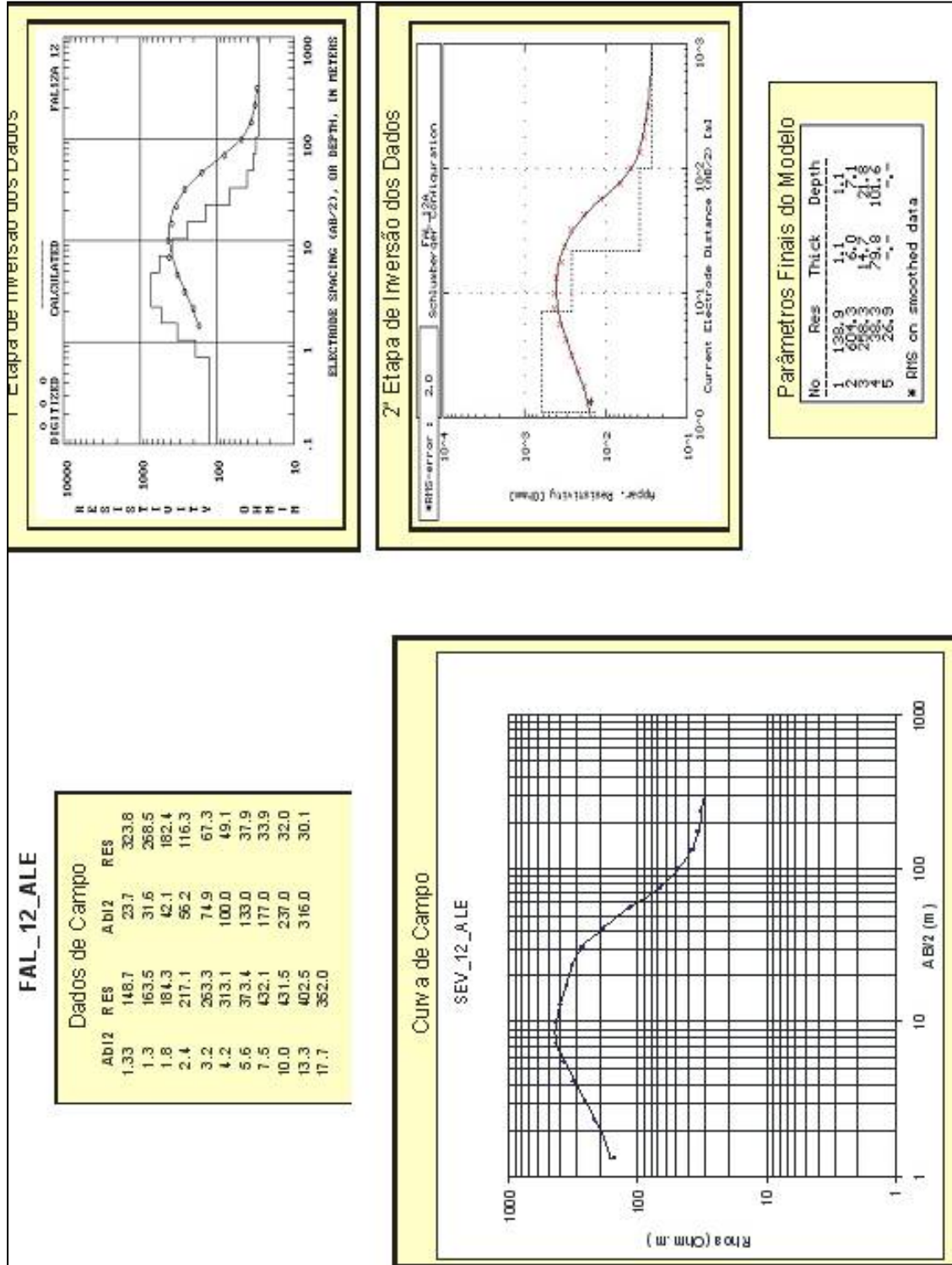


Figura 56 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-12_ALE.

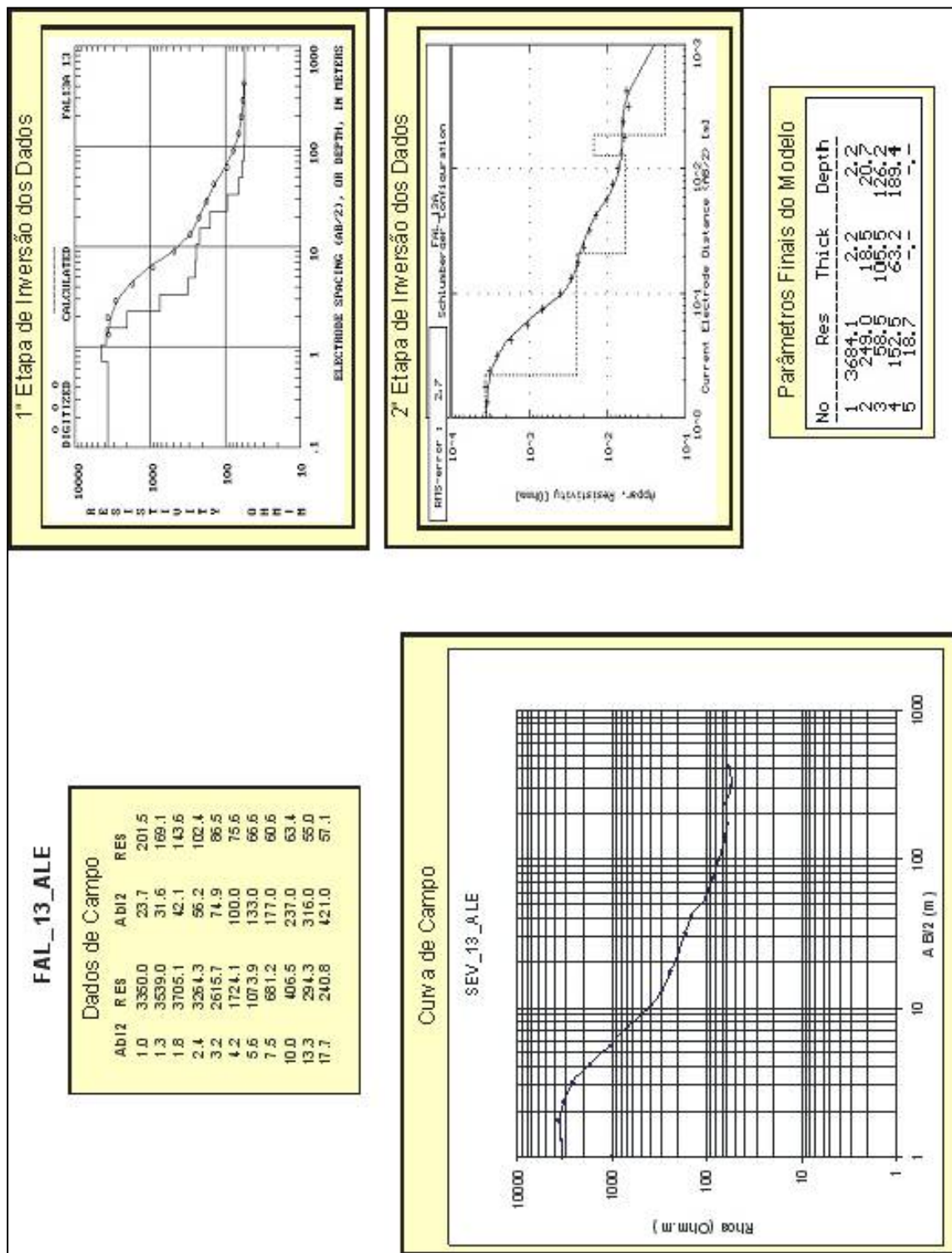


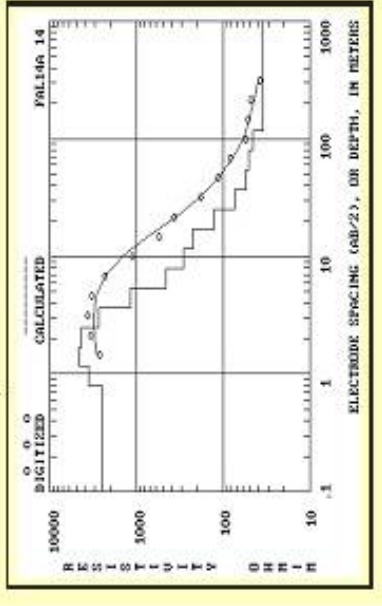
Figura 57 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-13_ALE.

FAL_14_ALE

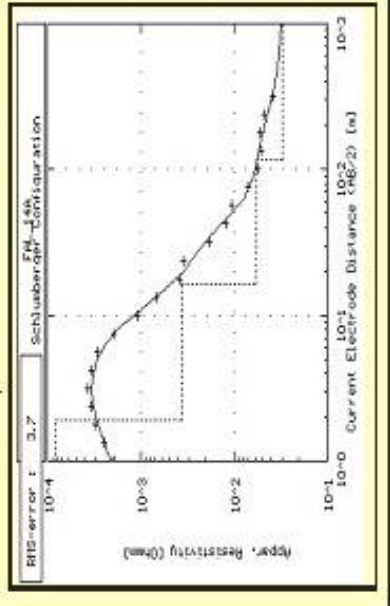
Dados de Campo

Ab12	RES	Ab12	RES
1	1902.5	23.7	347.5
1.3	2433.7	31.6	183.8
1.8	3088.0	42.1	121.4
2.4	3442.0	56.2	105.8
3.2	3683.0	74.9	71.2
4.2	3431.0	100.0	55.1
5.6	2953.2	133.0	51.0
7.5	1981.6	177.0	52.0
10.0	1096.8	237.0	46.2
13.2	681.0	316.0	37.9
17.7	379.9		

1ª Etapa de Inversão dos Dados



2ª Etapa de Inversão dos Dados



Parâmetros Finais do Modelo

No	Res	Thick	Depth
1	1288.4	0.5	0.5
2	8130.3	1.4	1.8
3	522.000	14.3	17.2
4	500.000	100.8	117.1

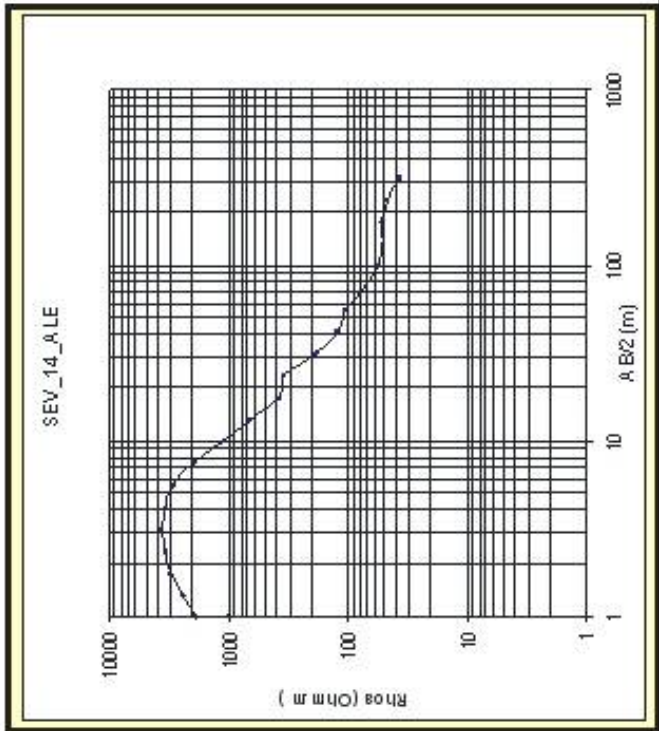


Figura 58 - Etapas do processamento realizado com os dados da SEV FAL-14_ALE.

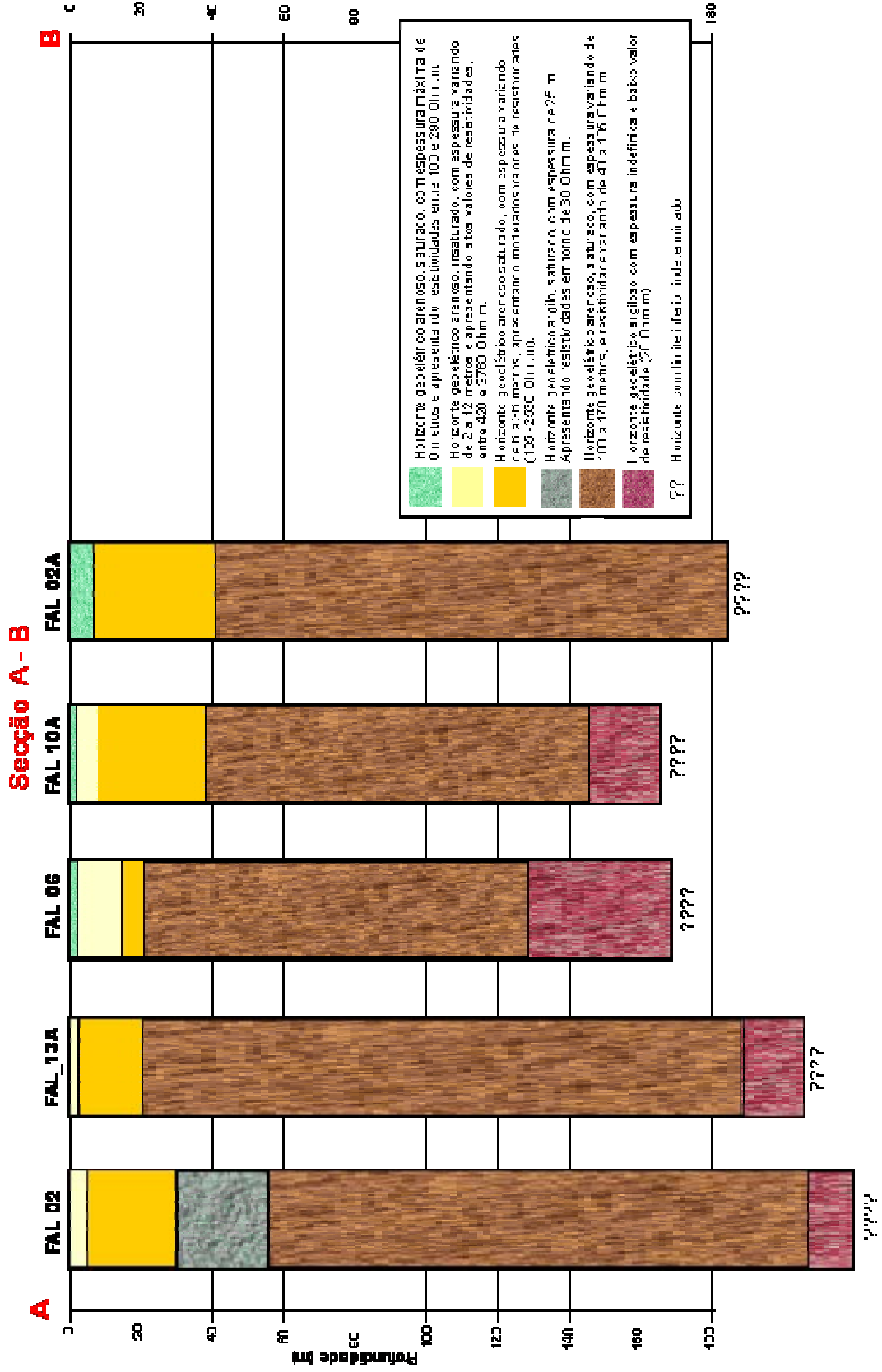


Figura 59 - Seção geológica proveniente das interpretações e modelagem dos dados de eletroresistividade.

Com base nos dados adquiridos, processados e interpretados para a área do Campo da Fazenda Alegre, pode-se tecer as seguintes considerações:

- A primeira camada geométrica apresenta uma baixa espessura, em torno de 6,0 m e os valores de resistividade são da ordem de 100 a 290 Ohms.m, caracterizando, assim, um pacote arenoso saturado pouco espesso.
- Em todas as sondagens elétricas processadas, a segunda camada pode ser relacionada a um “pacote” resistivo ($\cong 3.000$ Ohm.m), pouco espesso e normalmente associado a uma cobertura arenosa insaturada, cujo nível estático está mais abaixo.
- A terceira camada geométrica, cuja espessura varia de 6 a 36 m, possui valores de resistividades em torno de 165 a 2.500 Ohms.m, sendo caracterizada litologicamente por um arenito saturado.
- Já a quarta e sexta camadas geométrica apresentam um comportamento condutivo com valores de resistividade maiores, em torno de 20 Ohms.m, e espessuras de 25 m (quarta camada) e indefinida para a sexta camada.
- A quinta camada geométrica apresenta uma espessura elevada, variando de 100 a 170 m, e moderados valores de resistividade que variam de 40 a 105 Ohms.m. Esta camada é característica de um pacote arenoso saturado, com teores de argila intercalados.

Quando comparada à seção geométrica (Figura 59) com os perfis litológicos dos poços FAL-56 e FAL-06 (Figura 38), fica evidente a boa correlação das camadas geométricas com as camadas litológicas.

6.1.4. Processamentos visando à seleção de áreas com potencial hidrogeológico

Para a caracterização hidrogeológica da área de interesse foram utilizadas as informações relativas aos poços de captação de água subterrânea existentes, FAL-56 e FAL-06 (Figura 38), e os dados descritos no item anterior.

O poço FAL-06 possui uma vazão de teste de 26 m³/h e uma profundidade de 120 m, sendo que 91 m são filtros que estão posicionados no que se considera quarta e quinta camadas geoeletricas. O poço FAL-56 possui uma vazão de teste de 22.6 m³/h e uma profundidade de 120 m, sendo que 90 m são filtros que estão posicionados no que se considera também quarta e quinta camadas geoeletricas.

As Figuras 60, 61 e 62 apresentam mapas de resistividade, espessura e profundidade da quinta camada geoeletrica, cujos dados utilizados são oriundos do resultado do processamento das sondagens elétricas verticais executadas na área de interesse. Devido à baixa espessura das quatro primeiras camadas e à alta possibilidade de identificar a espessura da sexta camada geoeletrica, não serão apresentados mapas relativos ao primeiro, segundo, terceiro, quarto e sexto estratos geoeletricos.

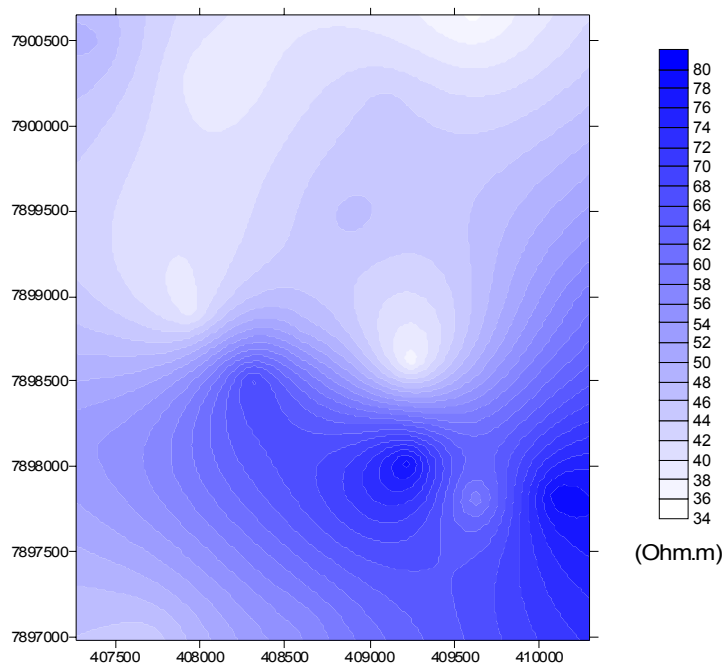


Figura 60 - Mapa de iso-valores de resistividade aparente estimada exibindo a variação da resistividade da quinta camada geolétrica para toda a área de estudo.

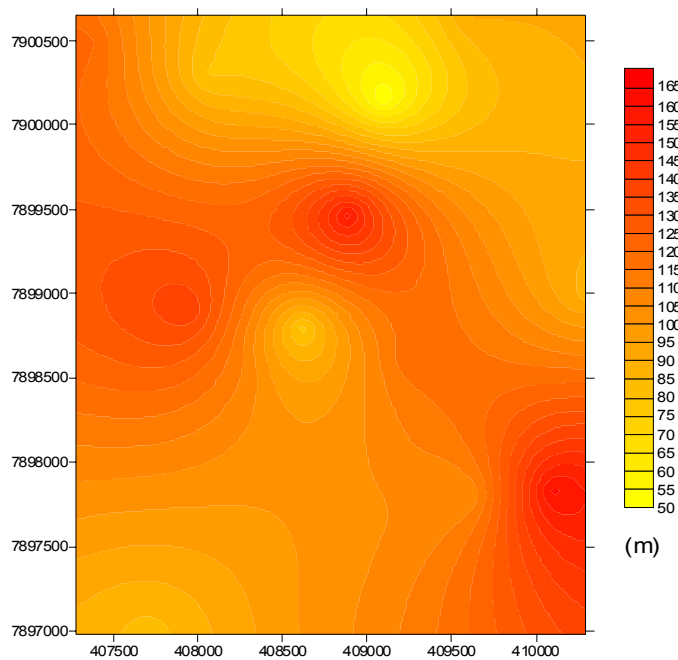


Figura 61 - Mapa de iso-valores exibindo a variação da espessura estimada da quinta camada geolétrica para toda a área de estudo.

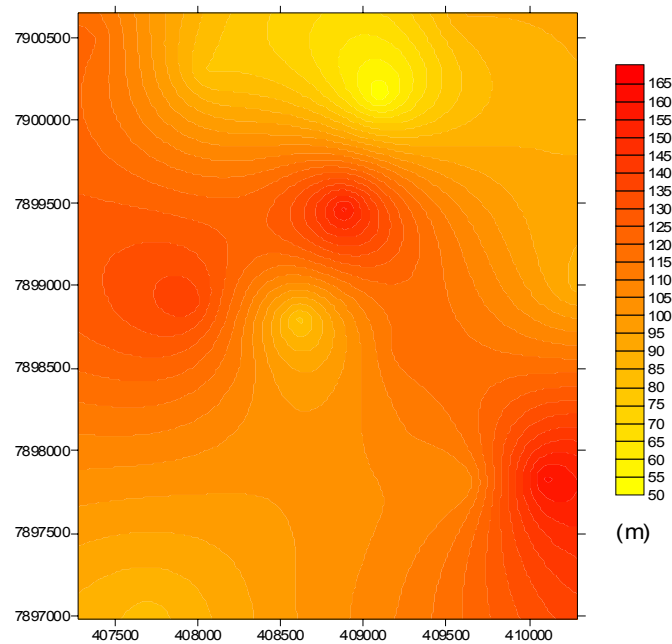


Figura 62 - Mapa de iso-valores exibindo a variação da profundidade estimada da 5ª camada geolétrica para toda a área de estudo.

A partir da observação das Figuras 60, 61 e 62, é possível constatar o aumento da espessura da quinta camada geolétrica do centro para oeste e do centro para sudeste da área e a Figura 63 mostra, numa visualização 3D, os mesmo dados de profundidade já comentados. O comportamento da resistividade é caracterizado por um aumento dessa propriedade física de norte para Sul. Essa análise irá refletir diretamente no potencial hidrogeológico deste estrato, pois a região dentro da área que apresentar as maiores espessuras e as resistividades mais adequadas (menor conteúdo de argila) tem indicativos de ter um potencial hidrogeológico mais representativo.

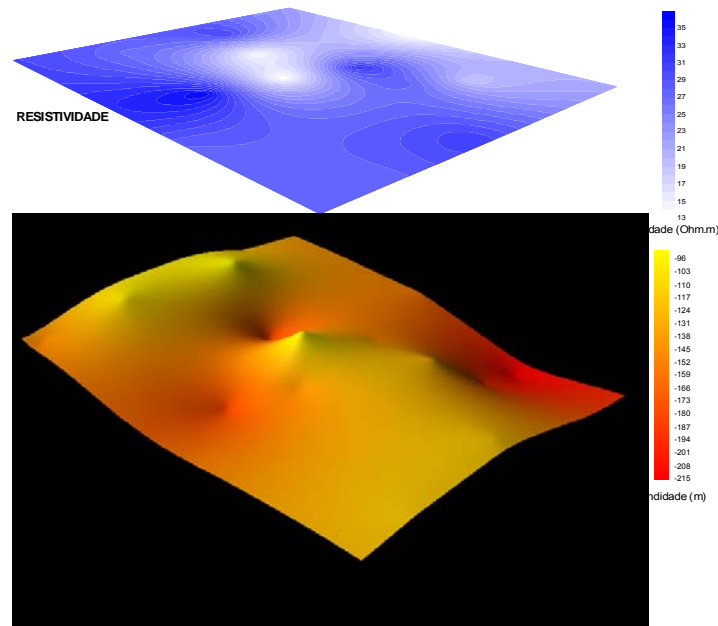


Figura 63 - Figura 3D de variação da resistividade e profundidades estimadas da quinta camada.

6.1.5. Resultados

De posse das considerações e análises realizadas pela caracterização geofísica/geológica e a caracterização hidrogeológica, as seguintes conclusões podem ser dissertadas:

- Devido ao fato de o primeiro estrato geoeletrico possuir baixa espessura (<6,0 m) e do segundo apresentar-se bastante resistivo, estas camadas não apresentam nenhum potencial hidrogeológico.
- O terceiro estrato geoeletrico possui características (resistividade e espessura) que não podem ser desprezadas, quando avaliado o seu potencial hidrogeológico. Sendo assim, considera-se como regular o potencial hidrogeológico desse estrato. Vale ressaltar que a falta de informações diretas mais confiáveis impede um avanço na análise do seu potencial.
- O quarto e o sexto estratos geoeletricos não possuem características de aquífero, mas sim de um aquífero, ou até mesmo de um aquíclode, ou seja, têm importância em uma possível condição de confinamento ou semi-

confinamento do aquífero intercalado. Sendo assim, são considerados menos importantes em termos de potencial hidrogeológico.

A quinta camada geométrica possui características (resistividade e espessura) que lhe imprimem um bom potencial hidrogeológico. Os valores relativamente baixos de resistividades são enormemente compensados por sua grande espessura. Apesar de não ter sido possível identificar a espessura da quinta camada geométrica, fica evidente que se este estrato for tão espesso quanto a camada anterior, o seu potencial hidrogeológico também será considerável.

Como produto dos processamentos e interpretações, foram locados 7 poços tubulares profundos em uma área considerada como de maior potencial hidrogeológico, com prioridades para perfuração (Figuras 64 e 65) cujas coordenadas são mostradas na Tabela 23. Dois desses poços foram construídos e serão comentados mais adiante, com os resultados dos testes de bombeamento realizados e a caracterização hidráulica do aquífero explorado.

Tabela 23 - Coordenadas UTM e ordem de perfuração indicada para novos poços na área de pesquisa

LOCAÇÃO DE POÇOS TUBULARES							
POÇO	Coordenadas UTM		Ordem	POÇO	Coordenadas UTM		Ordem
	Norte	Este			Norte	Este	
FAL 22	7.899.181	408.039	7º Poço	FAL 61	7.899.165	407.518	3º Poço
FAL 29	7.899.177	408.658	2º Poço	FAL 74	7.898.396	408.568	6º Poço
FAL-40	7.899.424.	407.511	1º Poço	FAL 79	7.898.644	407.684	5º Poço
FAL 42	7.899.900	407.345	4º Poço				

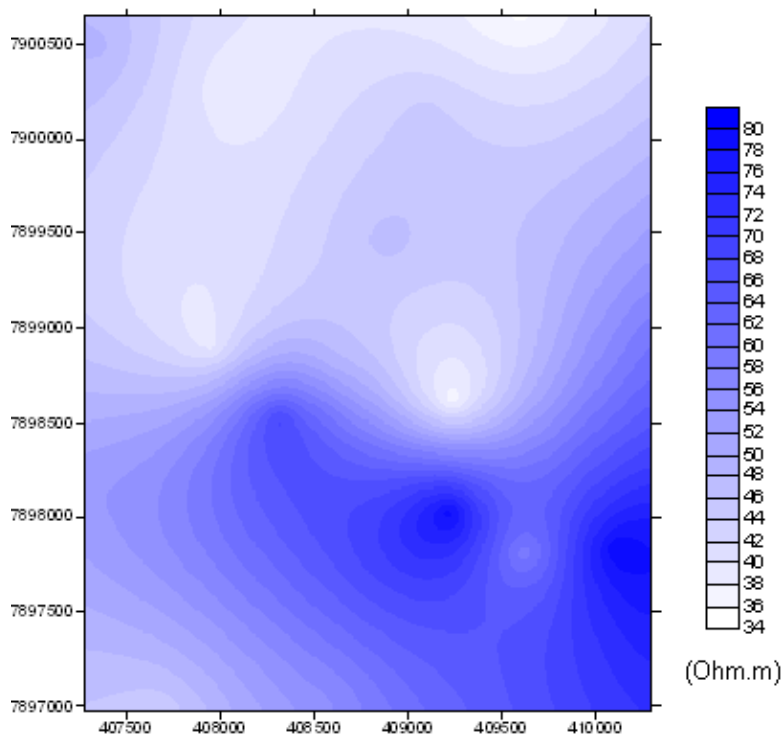


Figura 64 - Mapa de iso-valores de resistividade aparente estimada para a área de pesquisa.

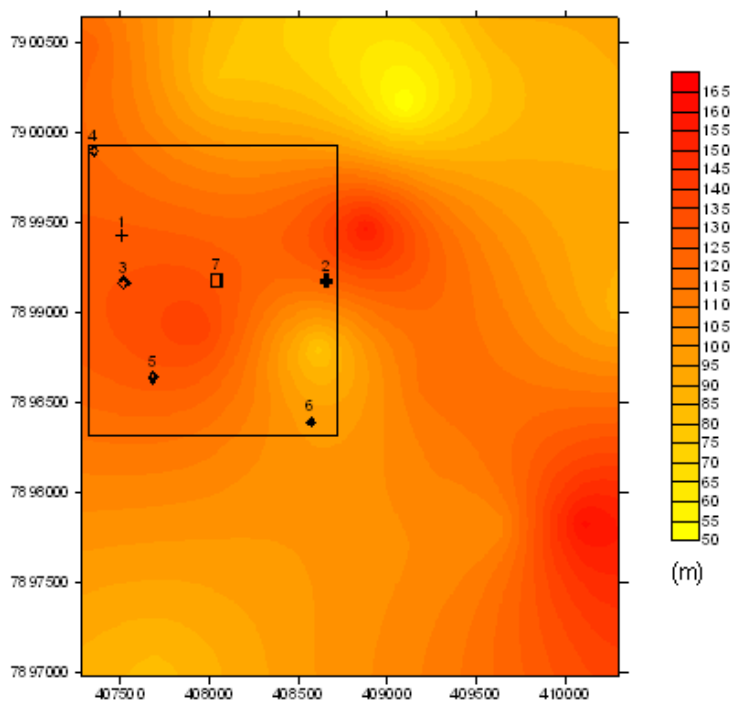


Figura 65 - Profundidades estimadas para a área de pesquisa e locais propostos em área considerada de melhor potencial hidrogeológico.

6.2. Perfisagens geofísicas em poços

6.2.1. Introdução

Neste tópico, serão discutidas as técnicas de perfilagem geofísica empregadas na área de pesquisa. Uma vez que tais técnicas foram aplicadas durante as etapas de completação dos dois poços construídos em locais definidos pela eletrorresistividade, as discussões sobre dados adquiridos, processamentos e resultados serão dissertadas no capítulo relativo à construção dos poços e hidrodinâmica do aquífero.

O objetivo principal desta etapa dos trabalhos foi o de definir as localizações para colocação dos filtros nos poços coincidente com os níveis mais produtores de água. Os sensores empregados foram o gama natural, a resistividade e o potencial espontâneo, cujos princípios são discutidos abaixo.

6.2.2. Tipos de perfis e a unidade de perfilagem

Segundo Schino, Girão e Nery (2004), o termo perfilagem geofísica refere-se a um processo de obtenção, registro e apresentação analógicos ou digitais das diversas propriedades petro-geofísicas de natureza elétrica, acústica, radioativa, mecânica, térmica, etc. das rochas atravessadas por um poço tubular. O produto final desta operação é um registro de tais propriedades em relação às profundidades, denominado *perfil*.

Segundo, ainda, os mesmos autores, uma operação de perfilagem é realizada imediatamente após uma interrupção programada da perfuração de um poço, através da descida de um cabo de propriedades eletromecânicas precisas, em cuja extremidade se acopla um mandril protetor contendo circuitos de telemetria e um ou mais sensores específicos para cada tipo de perfil. Ao conjunto, telemetria-sensor(es), dá-se o nome genérico de *ferramenta* ou *sonda* de perfilagem (Figura 66).

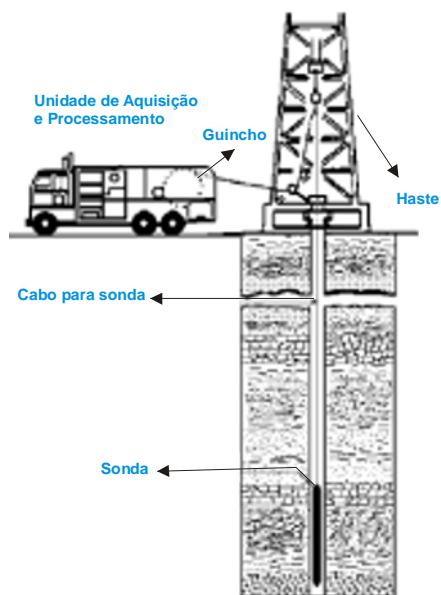


Figura 66 - Sonda de perfilagem.

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

Os sensores captam as informações oriundas das rochas e as entregam à telemetria para enviá-las, através do cabo, à superfície, onde são recolhidas, separadas, processadas e registradas na Unidade de Perfilagem (Figura 67).

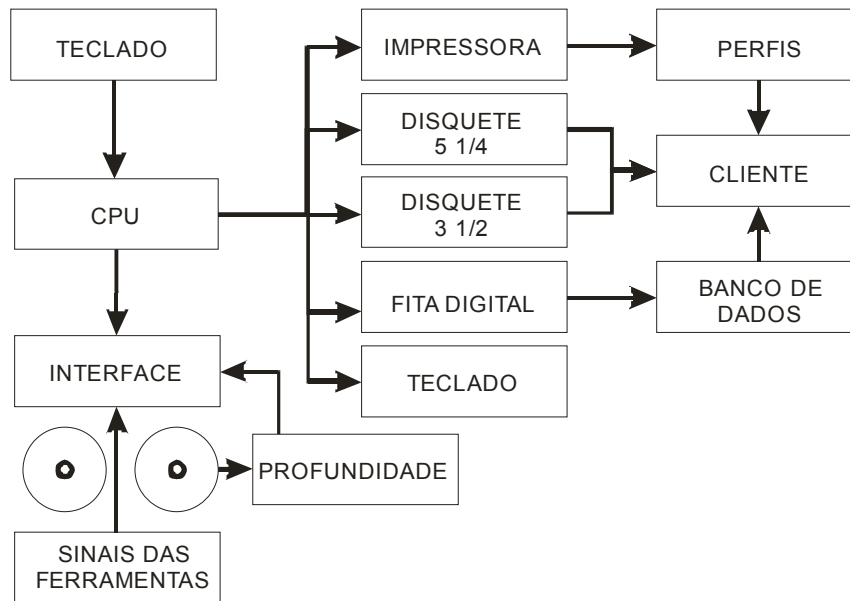


Figura 67 - Sistema de registro de uma unidade de perfilagem moderna

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

Tabela 24 - Principais tipos de perfis geofísicos utilizados na prospecção de água subterrânea

Propriedades	Sensores							
	Potencial Espontâneo	Resistividade Profunda	Normal Curta	Raios Gama	Sônico	Caliper	Temperatura	Inclinometro
Litológica	X	X	X	X	X			
Espessura das camadas	X	X	X	X	X			
Argilosidade	X	X	X	X				
Porosidade					X			
Propriedades químicas	X	X			X			
Entradas de água no poço							X	
Cimentação					X		X	
Construção do poço						X		X

Os perfis da Tabela 24 são utilizados como mostrado abaixo:

- Potencial Espontâneo.
- Resistividade Profunda: registra a pouca ou muita presença de sais dissolvidos na água contida nos poros das rochas.
- Normal curta.
- Raios gama.

- Sônico.
- Cáliper: registra o diâmetro do poço e permite a correção dos perfis pelo chamado efeito de poço e calcula os volumes de pré-filtro ou cimento.
- Temperatura: registra, de forma contínua, a temperatura do poço.
- Inclinômetro: registra a inclinação do poço.

Podem ainda ser citados outros tipos de perfis para aplicação em hidrogeologia. São eles:

- Perfil de Pega da Cimentação (CBL): avalia a qualidade da cimentação.
- Indicador de Ponto Livre: determina a profundidade onde uma coluna de perfuração está presa.
- Perfil de Flowmeter: mede o movimento vertical do fluido dentro do poço e é útil na determinação de fluxos entre aquíferos ou a produção seletiva de cada zona em um poço que atravessa vários aquíferos.

6.2.3. Possíveis problemas na perfilagem

- **Efeitos das camadas**

As perfilagens são extremamente dependentes dos parâmetros petrofísicos como a composição química, textura, estrutura sedimentar, porosidade e quantidade do fluido intersticial ao que se chama de “efeitos das camadas”. As Figuras 68, 69 e 70 mostram como as espessuras das camadas podem influenciar nos resultados de uma perfilagem. No primeiro caso, a espessura da camada é muito superior ao tamanho do sensor (espaçamento dos eletrodos), e a resistividade aparente (R_a) lida é igual à resistividade verdadeira (R_v) (Figura 68).

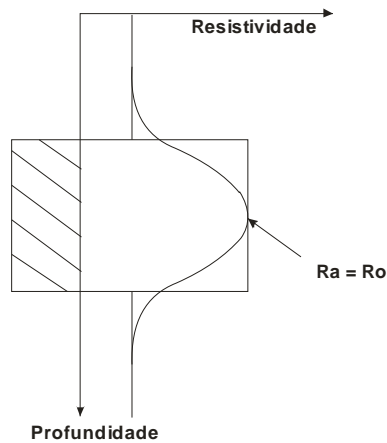


Figura 68 - A espessura da camada é bem superior ao espaçamento dos eletrodos.

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

No segundo caso, a espessura da camada é igual ao espaçamento dos eletrodos, e a resistividade aparente (R_a) é inferior à resistividade verdadeira (R_v) (Figura 71).

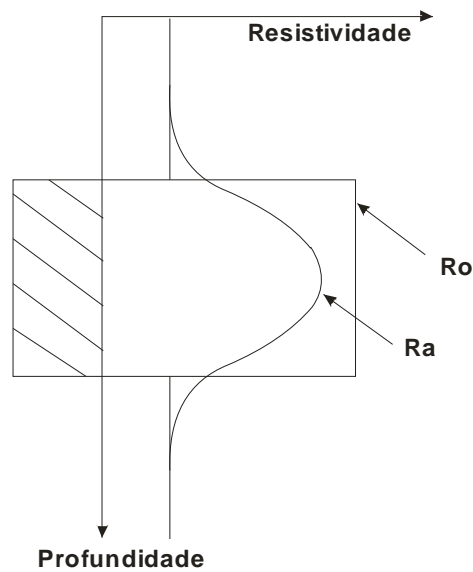


Figura 69 - A espessura da camada é igual ao espaçamento dos eletrodos.

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

No terceiro caso, a camada tem espessura inferior ao espaçamento dos eletrodos, e a resistividade aparente (R_a) lida é totalmente errada (Figura 70).

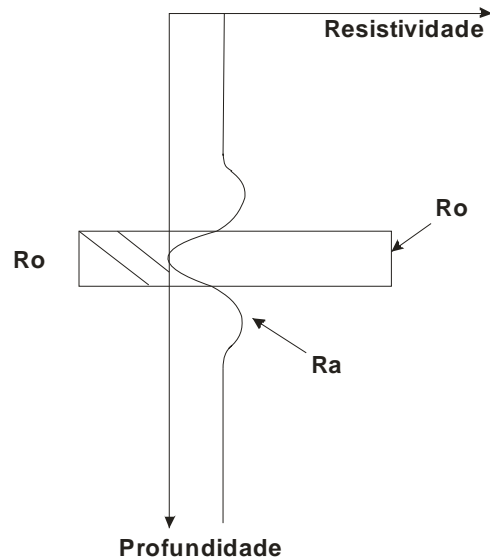


Figura 70 - A espessura da camada é inferior ao espaçamentos dos eletrodos.

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

- **Efeitos do poço**

Perfis são também influenciados pelo diâmetro do poço e pelas características da lama de perfuração. Esses efeitos são conhecidos como “efeitos do poço”.

Na área do petróleo, as ferramentas de perfilagem são especialmente projetadas para minimizar esses efeitos e fornecer uma leitura mais próxima possível dos valores reais das camadas sem alteração, ou seja, sem os efeitos de camada ou de poço. As Figuras 71, 72 e 73 mostram o que acontece com as linhas de corrente emitidas por um mesmo eletrodo em poços com lamas de perfuração de salinidades diferentes.

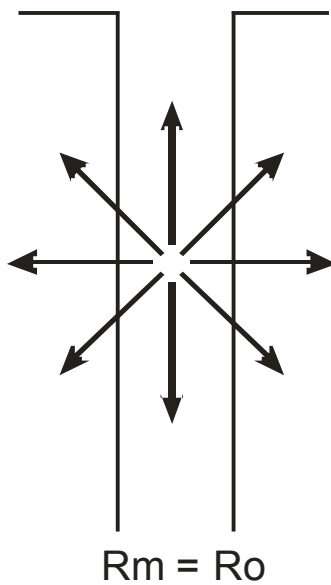


Figura 71 - A resistividade da lama (R_m) é igual à resistividade da camada (R_o).

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

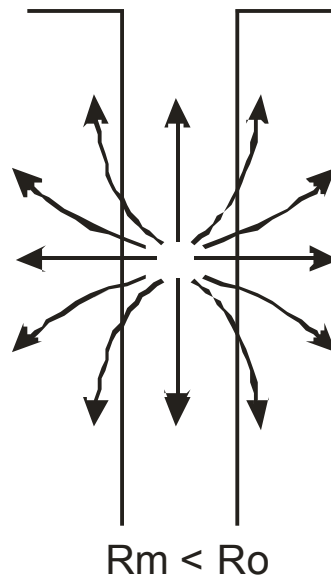


Figura 72 - A resistividade da lama (R_m) é menor que a resistividade da camada (R_o).

Fonte: Adaptado de Schino, Girão e Nery (2004).

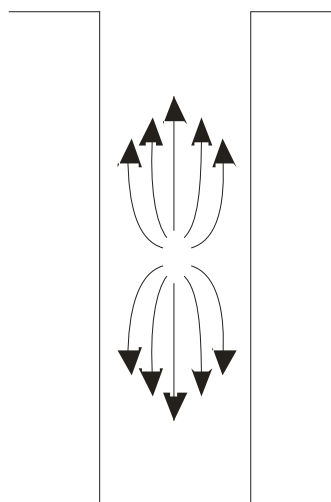


Figura 73 - A resistividade da lama (R_m) é bem inferior à resistividade da camada (R_o).

Fonte: Adaptado de Schino e Girão, 2004

- **Efeito de invasão**

Corresponde ao efeito produzido pela invasão das zonas permeáveis dos estratos atravessados pela perfuração pelo filtrado da lama, resultado em uma distribuição radial dos fluidos em relação ao eixo do poço. Nesse processo, o

filtrado invade a zona nas proximidades da parede do poço (zona lavada) e expulsa o fluido original daquela camada (água intersticial), que se desloca para as partes mais internas da rocha (zona virgem). Não existe um plano bem definido separando o filtrado da água intersticial virgem, mas uma zona de difusão ou intermediária, de largura variável e temporária, e as salinidades diferentes do filtrado e da água intersticial ocasionam uma distribuição de resistividades ao redor da perfuração, como mostrado na Figura 74.

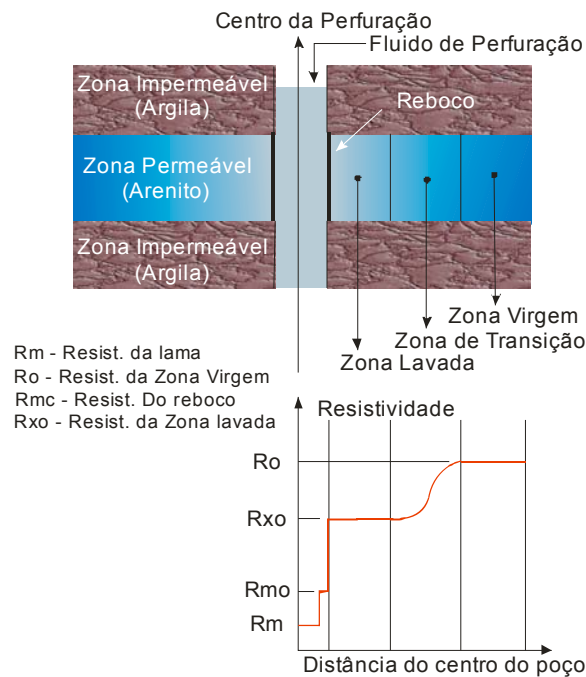


Figura 74 - Distribuição radial de resistividade pelo "efeito de invasão".

6.2.4. Gama Natural

Esse tipo de perfil é considerado como um dos melhores indicadores litológicos das rochas sedimentares, e sua aplicação mais importante em hidrogeologia consiste na identificação de intervalos argilosos para definição dos melhores intervalos para colocação de filtros. Os equipamentos mais modernos utilizam cintilômetros que permitem o cálculo quantitativo e percentual de argilas presentes nos aquíferos, enquanto os equipamentos tipo mineração utilizam Geiger-Muler, que permitem apenas a identificação qualitativa.

Segundo Schino e Girão (2004), existem três famílias de elementos radioativos naturais, que terminam todas em chumbo após várias desintegrações:

- a do urânio que se inicia com o U^{238} ;
- a do tório que se inicia com o Th^{232} , e
- a do Actínio que se inicia com o U^{235} .

Apesar de o potássio não formar uma família, existe em grande abundância na crosta da terra, sendo que os isótopos K^{39} , K^{40} e K^{41} representam cerca de 23.500 ppm, enquanto o U^{238} representa cerca de 12 ppm e o Th^{232} cerca de 3 ppm. O potássio ainda corresponde a um teor médio de 2,7%, em peso, dos folhelhos. Por essas razões, o urânio, o tório e o potássio são os três elementos que são detectados pelos sensores de radioatividade usados nos perfis de poços.

Ainda segundo os mesmos autores, as desintegrações são realizadas por liberação de partículas alfa e beta, que não podem ser detectadas pelos sensores, por terem pequeno poder de penetração nos materiais densos ou pela liberação de energia eletromagnética de curtíssimo comprimento de onda, (Raios Gama) que pode ser detectada mesmo através de revestimentos. Os raios gama não têm massa ou carga elétrica, mas transportam energia medida em milhões de elétron-volts (MeV), e, dessa forma, o potássio é detectado pelos sensores através de seu pico mono energético de 1,46 MeV, o tório pelo pico de 2,62 MeV, correspondente ao elemento-filho Ta^{208} , e o urânio pelo pico de 1,76 MeV do elemento-filho Bi^{214} .

Em um ambiente com arenitos e folhelhos, esses últimos geralmente irão apresentar uma maior radioatividade que os arenitos. Segundo experiências em laboratório, a argilosidade ou volume de folhelhos pode ser representado pela seguinte equação:

$$V_{SH} = \frac{V_{SHGR}}{A_{GR} - (A_{GR} - 1) \times A_{SHGR}}$$

Onde:

V_{SH} é a porcentagem de folhelho a ser calculada;

A_{GR} é uma constante igual a três nas rochas terciárias e a 2 nas rochas mais antigas;

V_{SHGR} é a porcentagem de argila calculada linearmente a partir do perfil de Raios Gama, usando-se a seguinte equação:

$$V_{SHGR} = \frac{GR_{Perfil} - V_{Mínimo}}{GR_{Máximo} - GR_{Mínimo}}$$

Os valores $GR_{máximo}$ e $GR_{Mínimo}$ devem ser, no caso de seqüências de arenitos e folhelhos ou de carbonatos e folhelhos, lidos no perfil em frente a essas respectivas litologias e jamais devem ser escolhidos o $GR_{máximo}$ e $GR_{Mínimo}$ em camadas pertencentes a formações ou ambientes distintos.

6.2.5. Resistividade

Segundo Schino e Girão (2004.), a primeira geração de ferramentas de resistividade foram as do tipo elétrico, em que uma corrente elétrica circula entre dois eletrodos para dentro do poço e das rochas, enquanto uma diferença de potencial é medida entre dois outros eletrodos. Pela lei de Ohm, pode-se, então, calcular a resistividade do volume global poço-rocha atravessado pela corrente; entretanto, esse método tem graves limitações e foi abandonado pela indústria petrolífera, que passou a aplicar a ferramenta de indução para poços perfurados com lama doce, ou a ferramenta de laterolog para poços perfurados com lama salgada.

Para poços de água, a ferramenta de indução é a mais indicada por não utilizar correntes elétricas, mas ondas eletromagnéticas que penetram dentro do material rochoso e minimizam o efeito do poço sobre a medição, e os resultados das leituras são mais próximos da realidade que as ferramentas elétricas.

6.2.6. Potencial espontâneo (SP)

Um poço para água que é perfurado com lama condutiva e que atravessa uma zona permoporosa, ou arenito, intercalada com argilas impermeáveis, cria um potencial chamado de Potencial Espontâneo (SP) e uma voltagem que pode ser medida em milivolts entre um eletrodo dentro do poço e outro eletrodo fora do poço, na superfície, como mostrado na Figura 75.

Em laboratório, foi demonstrado que o Potencial Espontâneo é composto de dois potenciais distintos: o E_m , ou potencial de membrana, que se forma nas interfaces das argilas como o poço e com as zonas permeáveis adjacentes, e o E_j , ou potencial de indução de junção líquida, formado pelo contato entre o filtrado e a água intersticial de salinidades diferentes (Figuras 76, 77 e 78).

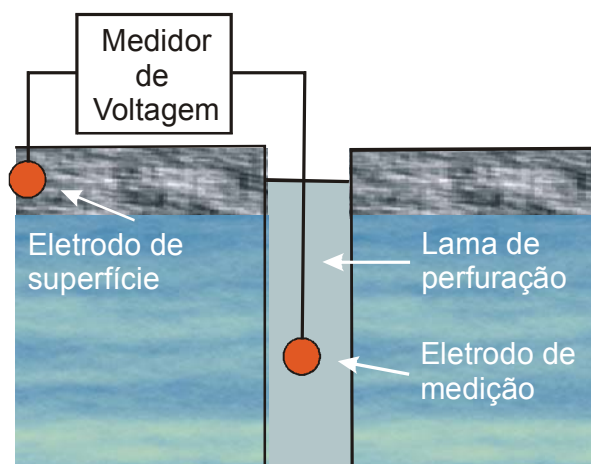


Figura 75 - Modelo esquemático do Potencial Espontâneo.

A Figura 76 mostra o “efeito de bateria” devido à composição geoquímica dos folhelhos, que tende a acumular cátions positivos no contato lama-folhelho e ânions negativos, no contato arenito-folhelho e responsável pela criação do potencial de membrana.

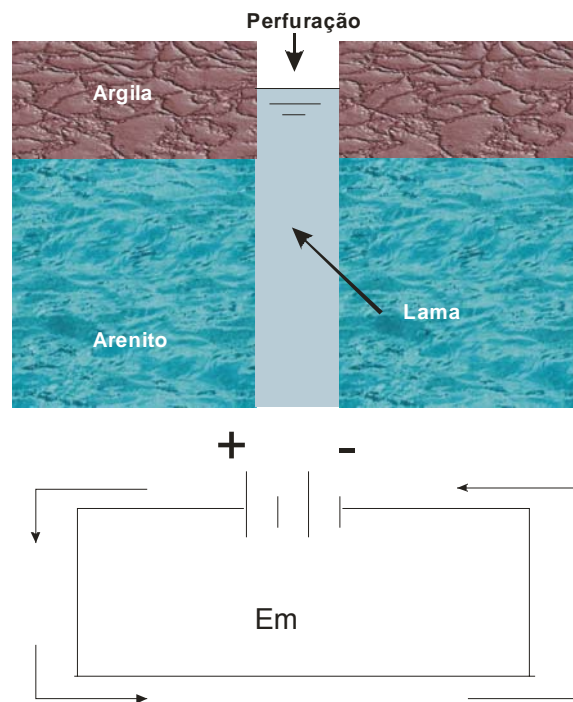


Figura 76 - "Efeito bateria" e potencial de membrana.

O potencial de membrana pode ser calculado pela seguinte equação:

$$V_{SHGR} = -59,2 \times \log_{10} \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right) \text{ A } 25^\circ \text{ C}$$

Onde:

- R_{mf} – resistividade do filtrado medido pela perfilagem;
- R_w – resistividade da água da formação a ser calculada.

O Potencial de Junção é ilustrado na Figura 77, que mostra os efeitos da difusão iônica que se desenvolve entre o filtrado e a água intersticial de salinidades diferentes. Os sais diferentes tendem a se equilibrar e migrar da solução mais salina para a mais doce, e, devido às diferenças entre as mobilidades relativas dos diferentes íons, cargas negativas de um lado e

positivas do outro se acumulam na interface da zona invadida e da zona virgem, criando um potencial de junção que pode ser calculado através da seguinte equação:

$$V_{SHGR} = -11,5 \times \log_{10}\left(\frac{R_{mf}}{R_w}\right) \text{ A } 25^\circ \text{ C}$$

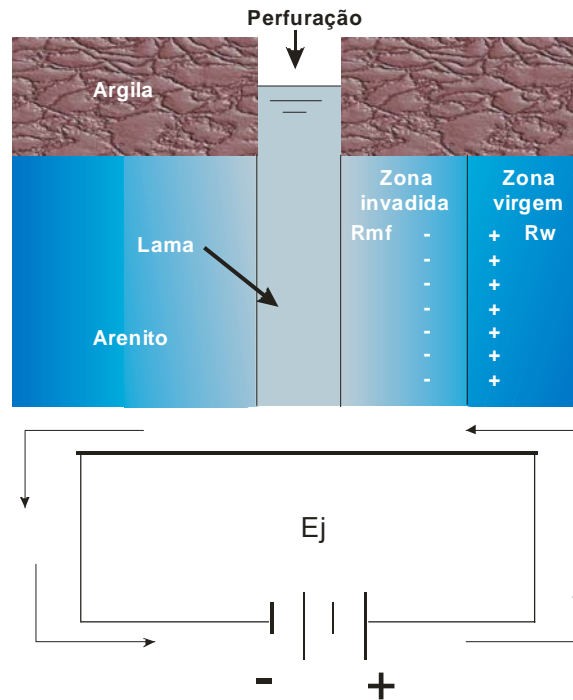


Figura 77 - Potencial de junção.

A Figura 78 mostra que a soma dos potenciais de membrana e de junção geram o potencial espontâneo, que pode ser calculado pela equação abaixo, que é a soma dos dois outros potenciais citados.

$$SP = E_m + E_j = -70,7 \times \log_{10}\left(\frac{R_{mf}}{R_w}\right)$$

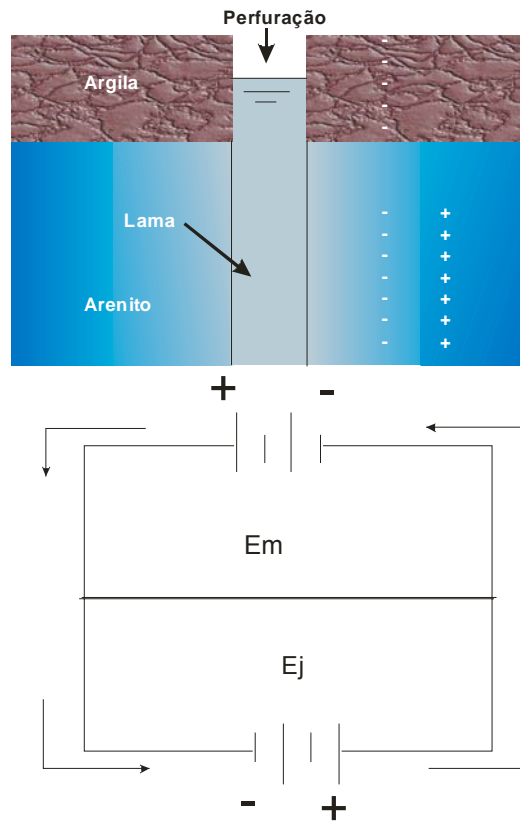


Figura 78 - O potencial espontâneo é a soma dos potenciais de junção e de membrana.

A Figura 79 demonstra a direção da corrente em função da relação entre as resistividades do filtrado e da lama. No caso de poços de água doce, as correntes estão invertidas, e a curva de Potencial Espontâneo deflete na direção contrária.

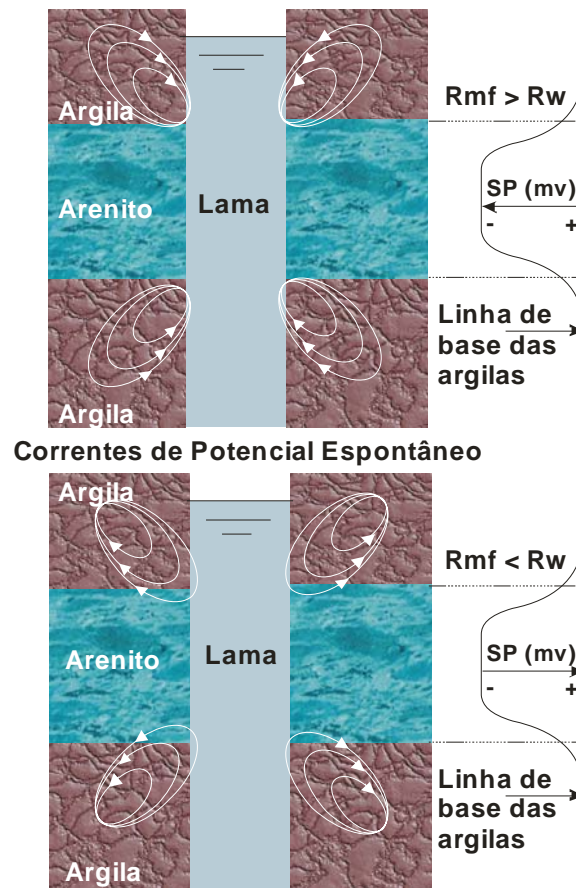


Figura 79 - Correntes que geram o SP e deflexões correspondentes da curva em função da relação R_{mf} e R_w .

A equação para cálculo do Potencial Espontâneo foi estabelecida para soluções de cloreto de sódio. Entretanto, para águas contendo predominantemente este sal, a resistividade da água R_w pode ser calculada diretamente a partir da equação seguinte, que pode ser modificada pelo efeito da temperatura de formação $T^\circ C$.

$$SP = -K \times \log_{10} \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right)$$

Onde $K = 65 + 0,24 \times T$

Para aquíferos de água doce contendo outros tipos de sais, como Sulfatos e carbonatos, o R_w não pode ser calculado diretamente, e a equação seguinte é

utilizada para cálculo de uma resistividade equivalente, R_{we} , de cloreto de sódio:

$$R_{we(SP)} = \left(\frac{R_{mf}}{R^{-\left(\frac{SP}{K}\right)}} \right)$$

Para a obtenção de R_w a partir de R_{we} , é necessária uma correção pelos diversos tipos de sais dissolvidos, e quando se desconhece a composição química da água, essa correção, pelo efeito do sal, não pode ser aplicada com precisão, não sendo a equação do Potencial Espontâneo 100% confiável.

6.2.7. Interpretação qualitativa e quantitativa de perfis geofísicos

Na interpretação qualitativa deve-se, em primeiro lugar, montar a coluna litológica atravessada pela perfuração usando a primeira faixa, da esquerda, do perfil onde estão registradas as curvas litológicas de Raios Gama e SP, devidamente identificadas (Figuras 80 e 81). As respectivas escalas de cada curva são indicadas na parte superior e inferior de cada faixa.

Nos Raios Gama, a radioatividade, ou argilosidade, aumenta da esquerda para a direita, sendo que areias, arenitos, calcários, dolomitos têm baixa radioatividade, enquanto folhelhos ou mineralizações têm alta radioatividade.

Na curva do SP, o intérprete deverá analisar a deflexão da curva em relação à linha de base dos folhelhos e não o valor quantitativo lido na escala, sendo que para deflexões para a direita o sinal é positivo, enquanto deflexões para a esquerda o sinal é negativo. A existência de uma deflexão, seja para a direita ou para a esquerda, é evidência da presença de permoporosidade. Um arenito permoporoso, por exemplo, apresenta baixa radioatividade e uma deflexão positiva ou negativa no SP, dependendo da relação entre R_{we} e R_{mf} .

Na faixa do meio (Figuras 82 e 83), são registradas as resistividades, sendo que o valor da resistividade da formação (R_o) está identificado pela sigla DIR (*Deep Induction Resistivity*) e a normal curta, que não foi utilizada nesta pesquisa. Os folhelhos têm resistividades menores que os arenitos em função das suas cargas periféricas e da sua quantidade de água adsorvida. Após esses passos, o intérprete, com base nos seus conhecimentos sobre a geologia da área e na descrição das amostras da perfuração, deve desenhar a litologia atravessada na faixa reservada para as profundidades, de forma a orientar a interpretação quantitativa.

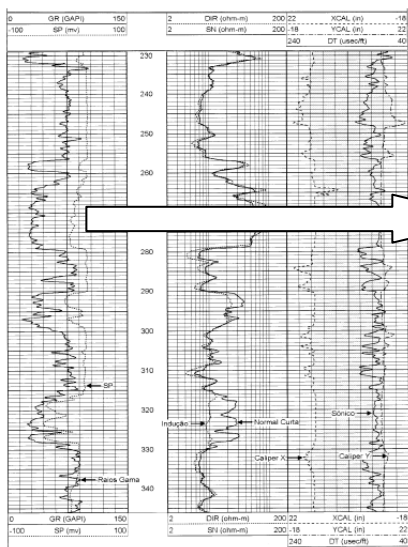


Figura 80 - Ficha de perfilagem.

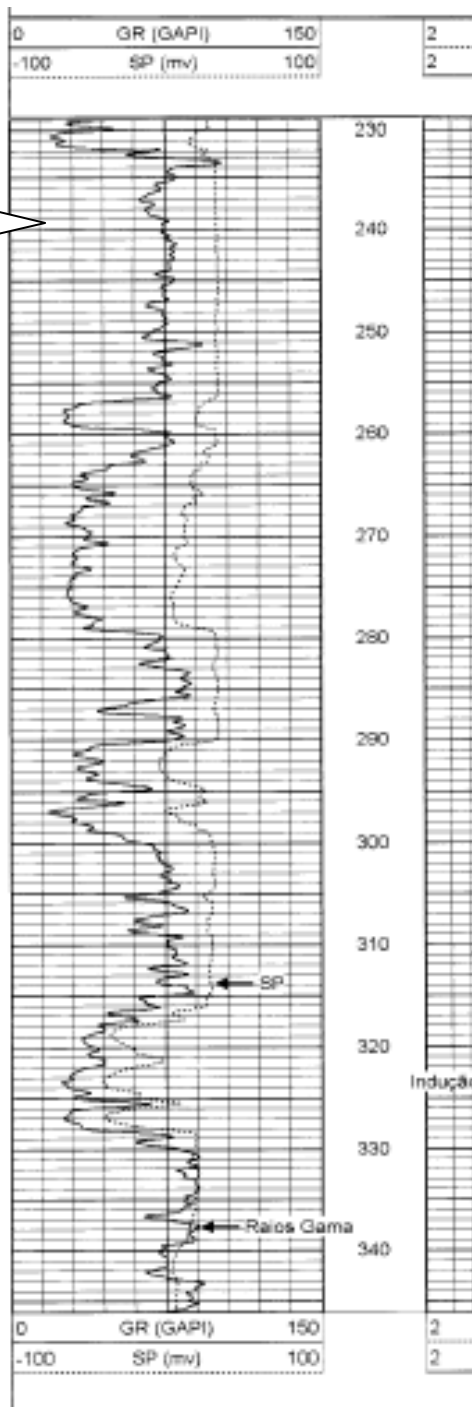


Figura 81 - Detalhe da faixa reservada para Raios Gama e SP.

A análise quantitativa dos perfis geofísicos se dá em dois passos. No primeiro, são definidas todas as constantes e parâmetros das equações já citadas neste capítulo, enquanto o segundo passo se caracteriza pela própria realização dos cálculos.

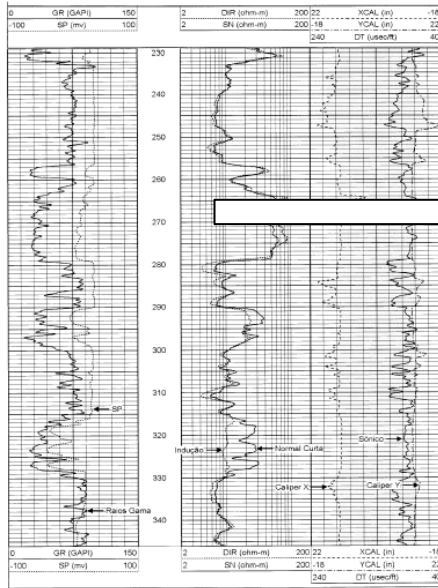


Figura 82 - Ficha de perfilagem geofísica.

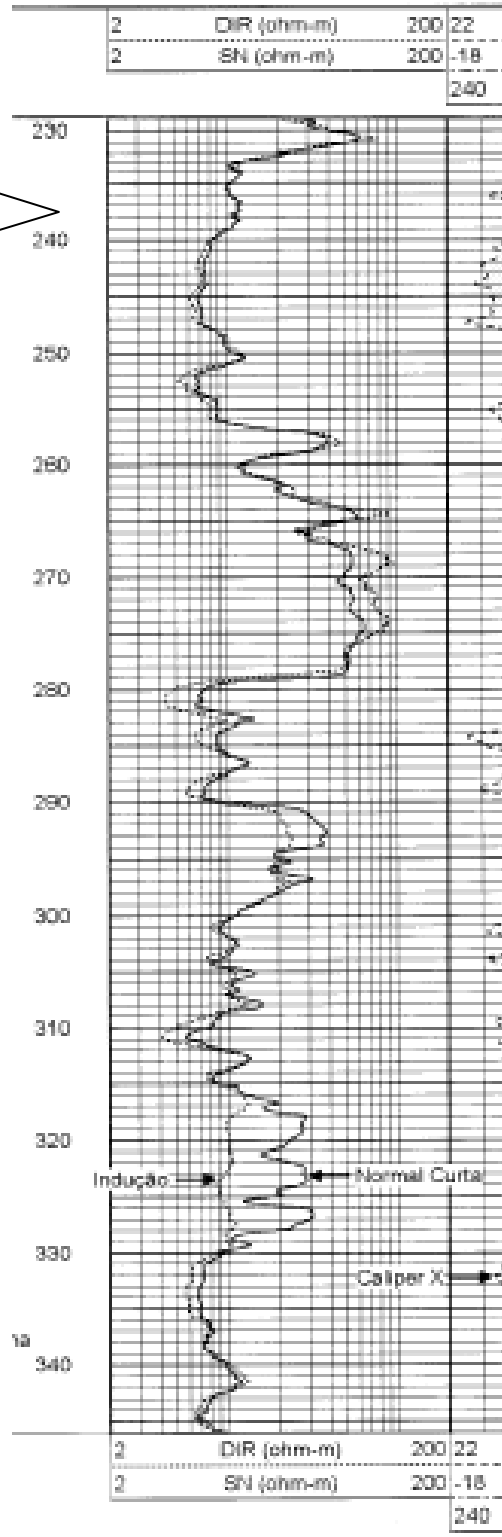


Figura 83 - Faixa reservada para a resistividade e normal curta.

7. Construção de Poços Tubulares e Caracterização Hidrodinâmica do Sistema Aquífero

7.1. Introdução

Conforme discutido anteriormente, os processamentos e as interpretações dos dados adquiridos nas atividades de geofísica permitiram a delimitação de uma área com maior potencial hidrogeológico, em função das espessuras e valores de resistividade aparente dos vários estratos geoeletricos, e a determinação de sete pontos para construção de novos poços tubulares na área de pesquisa.

Para a caracterização hidrodinâmica do sistema aquífero foram seguidas, portanto, as seguintes etapas que serão discutidas neste capítulo:

- construção de dois poços tubulares profundos, FAL-40 e FAL-42, e de dois piezômetros nos locais determinados em função dos processamentos e interpretações dos dados de geofísica;
- perfilagem elétrica nos dois poços tubulares produtores para determinação dos locais de instalação de filtros e tubos cegos;
- testes de produção nos poços produtores para determinação dos regimes de bombeamento; e
- testes de aquífero para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero.

7.2. Construção e características técnicas dos poços de produção e piezômetros

Baseado, desta forma, nos levantamentos realizados na área de pesquisa, foram construídos dois poços profundos posicionados através dos estudos anteriores (FAL-40 e FAL-42), cujas características construtivas tomaram por base:

- os dados geofísicos, geológicos e geométricos provenientes do processamento e interpretação de parâmetros geoeletricos ^{1*};

- os dados da amostragem metro a metro e da descrição litológica dos estratos atravessados pela perfuração ^{2*};
- os dados obtidos através do tempo de perfuração ^{2*}; e
- os dados de perfilagem geofísica elétrica e gama natural ^{2*}.

^{1*} Dados utilizados para determinação prévia, principalmente, das suas localizações na área e profundidades de perfuração.

^{2*} Dados utilizados para determinação, em profundidade, dos diferentes tipos de estratos e níveis de maior produção de água para colocação dos filtros e tubos cegos.

Ambos os poços (Figuras 84 e 85) tiveram as mesmas características técnicas de construção, apresentando 183 m de profundidade, 08" de diâmetro de revestimento, com seções de filtro nas profundidades de 40-48 m, 56-60 m, 64-68 m, 92-100 m e 144-152 m, totalizando 32 m como mostrado, a exemplo, para o poço FAL-40 na Figura 86.



Figura 84 - Poço FAL-42 construído e com equipamento de extração de água.



Figura 85 - Poço FAL-40 construído e com equipamento de extração de água.

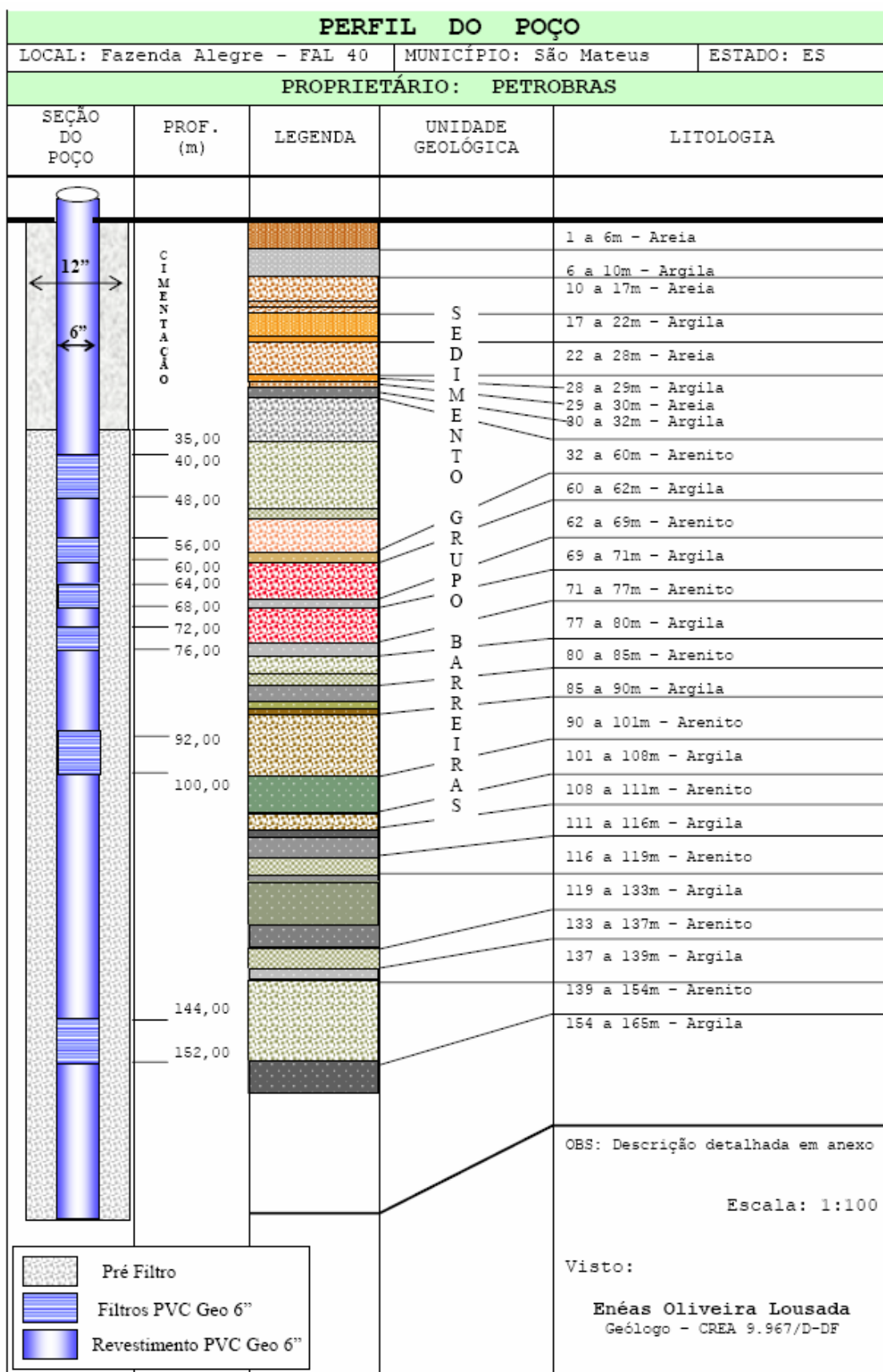


Figura 86 - Detalhes construtivos e estratigrafia do poço FAL-40.

Os piezômetros, que foram construídos a aproximadamente 35 m de distância de ambos os poços de captação, possuem também as mesmas características construtivas destes, com exceção do diâmetro de revestimento, que foi de 4". A Figura 87 mostra os detalhes dos piezômetros construídos. Na Figura 88, como exemplo, observa-se como o tempo de perfuração varia conforme o material atravessado durante a perfuração para o poço FAL-40.



Figura 87 - Piezômetros construídos na área de pesquisa com caixa de proteção em alvenaria.

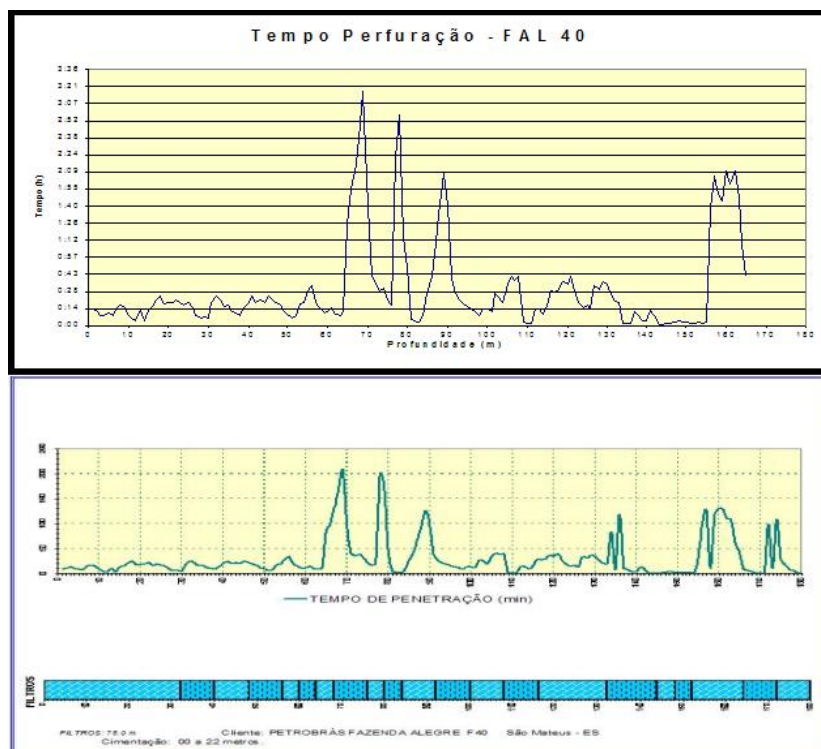


Figura 88 - Variação do tempo de perfuração com a profundidade para o poço FAL-40.

Nas Figuras 89, 90 e 91, encontra-se, a título de exemplo, toda a descrição das amostras para o poço FAL-40.












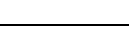







LEG	Amostra	Descrição do material
	01-05	Areia com argila, cor ocre, predominantemente quartzoso, qz hialino, sem feldspato, indícios de óxido de Fe, seleção regular a boa. 1-4 areia fina a média. 5 – areia média a grossa.
	06-10	Argila muito plástica, cor cinza rosado, presença de níveis oxidados.
	11-15	Areia, cor vermelho rosado, granulometria média a grossa, seleção regular a boa, predominância de Qz hialino, grãos angulosos a sub-angulosos, sem feldspato. 15 – predominantemente areia grossa.
	16	Material areno-argiloso, cor vermelho rosado, areia fina a média, seleção regular a boa, grãos sub-arredondados a angulosos.
	17	Areia, cor creme, indícios de oxidação de Fe, granulometria média a grossa, seleção regular a boa.
	18-20	Material argiloso, cor amarelo rosado, com areia média a grossa, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa, presença de Qz hialino e esfumaçado.
	21	Argila com areia média a grossa, cor creme acinzentado
	22	Argila com areia fina a média, cor creme
	23-28	Areia, cor creme avermelhada, pouca concentração de argila, granulometria média a grossa, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	29	Argila, cor creme, presença de areia fina.
	30	Areia, cor creme acinzentado com matiz vermelha, granulometria fina a média, com feldspato, argila em média proporção.
	31-32	Argila, cor cinza, com areia de granulometria fina a média.
	33-40	Arenito, cor cinza, granulometria média a grossa, com níveis argilosos, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa. Amostras 33, 34 e 38 – maior concentração de argila.
	41-46	Arenito, cor creme, granulometria grossa a muito grossa, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, bem selecionados. Amostras 44 e 45 – eminentemente arenito de granulometria muito grossa.
	47-48	Arenito, cor creme, granulometria média a grossa, com níveis argilosos, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	49-52	Arenito, cor creme, granulometria média a grossa, com níveis argilosos pouco significativos, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	53-54	Arenito, cor creme esbranquiçada, granulometria fina a média, grãos regularmente selecionados, com elevada concentração de argila.
	55-60	Arenito, cor creme avermelhado, granulometria média a grossa, com níveis argilosos pouco significativos, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa. Amostra 60 – maior concentração de argila.
	61-62	Argila, cor creme esbranquiçada, ocorrência de areia fina.
	63-69	Arenito, cor creme avermelhada, granulometria média a grossa, predominância de Qz hialino e leitoso, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.

Figura 89 - Descrição das amostras para o poço FAL-40.












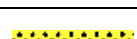







	70-71	Argila, cor cinza esbranquiçada, ocorrência de areia fina.
	72 - 75	Arenito, cor creme avermelhada, granulometria média a grossa, com níveis argilosos pouco significativos, predominância de Qz hialino e leitoso, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa. Amostra 75 com elevada concentração de argila
	76-77	Arenito, cor creme avermelhada, granulometria grossa, predominância de Qz hialino e leitoso, com feldspato, grãos sub-angulososa angulosos, seleção regular a boa.
	78	Argila, cor cinza, presença de areia fina a média, material bastante plástico.
	79	Argila, cor cinza, presença de areia fina, material bastante plástico.
	80	Argila, cor cinza, presença de areia fina a média, material bastante plástico.
	81-83	Arenito, cor cinza claro, granulometria grossa, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	84-85	Arenito, cor cinza claro, granulometria média a grossa, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	86-88	Argila, cor cinza claro azulado, presença de areia grossa, material bastante plástico.
	89	Argila, cor creme, presença de areia fina a média em pouca proporção, material bastante plástico.
	90	Argila, cor marrom, presença de areia fina em pouca proporção, material bastante plástico.
	91-93	Arenito, cor creme avermelhado claro, granulometria grossa, com pouca concentração de argila, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	94	Arenito, cor creme avermelhado escuro, granulometria muito grossa, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	95-101	Arenito, cor creme acinzentado, granulometria grossa, com pouca concentração de argila, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, regularmente selecionados.
	102-104	Argila, cor cinza esverdeado, com fortes indícios de oxidação de Fe, presença de areia fina a média. Amostras 102 e 104 com indícios de oxidação mais intensos. Amostra 103 de cor cinza esbranquiçado.
	105-108	Argila, cor cinza, presença de areia fina em pouca proporção. Material bastante compacto e resistente. Amostra 108 de cor cinza esbranquiçado.
	109-111	Arenito, cor creme, granulometria grossa, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, regularmente selecionados.
	112	Argila, cor cinza escuro. Material bastante compacto, resistente e plástico.
	113-116	Argila, cor cinza, com areia fina a média em pouca proporção, ocorrência de feldspato.

Figura 90 - Descrição das amostras para o poço FAL-40.











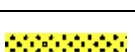

	117-119	Arenito, cor cinza claro, granulometria fina a média, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, regularmente selecionados.
	120-121	Argila, cor cinza, com areia fina em pouca proporção, ocorrência de feldspato, material bastante compacto.
	122-129	Argila, cor cinza amarelado, com areia fina em pouca proporção, ocorrência de feldspato, material bastante compacto.
	130-133	Argila, cor cinza, com areia fina em pouca proporção, ocorrência de feldspato, material bastante compacto.
	134-137	Arenito, cor creme acinzentado, granulometria média a grossa, com pouca concentração de argila, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	138-139	Argila, cor cinza claro, material bastante compacto.
	140	Arenito, cor creme acinzentado, granulometria grossa, com pouca concentração de argila, predominância de Qz hialino, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	141	Arenito, cor cinza, granulometria muito grossa, predominância de Qz hialino, leitoso e esfumaçado, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	142-144	Arenito, cor creme, granulometria grossa, com pouca concentração de argila, predominância de Qz hialino, leitoso e esfumaçado, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, seleção regular a boa.
	145-148	Arenito, cor creme avermelhado, granulometria muito grossa, predominância de Qz hialino e leitoso, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, bem selecionados. Amostras 146 e 147 com pouca concentração de argila.
	149-154	Arenito, cor creme avermelhado, granulometria muito grossa, predominância de Qz hialino e leitoso, com feldspato, grãos sub-angulosos a angulosos, bem selecionados.
	155-165	Argila, cor cinza escuro, bastante plástica, compacta.

Figura 91 - Descrição das amostras para o poço FAL-40.

7.2.1. Perfilagem elétrica para completção dos poços

As perfilagens elétricas dos poços foram realizadas envolvendo sensores para gama natural, resistividade lateral e potencial espontâneo (Figuras 92, 93 e 94). Desta forma, os parâmetros elétricos, juntamente com a variação da radiação gama em profundidade, permitiram uma integração com a descrição litológica das amostras analisadas no sentido de se chegar ao perfil construtivo ideal para os poços. A seção construtiva idealizada para os poços, juntamente com as informações geológicas e geofísicas, encontram-se integradas na Figura 95.

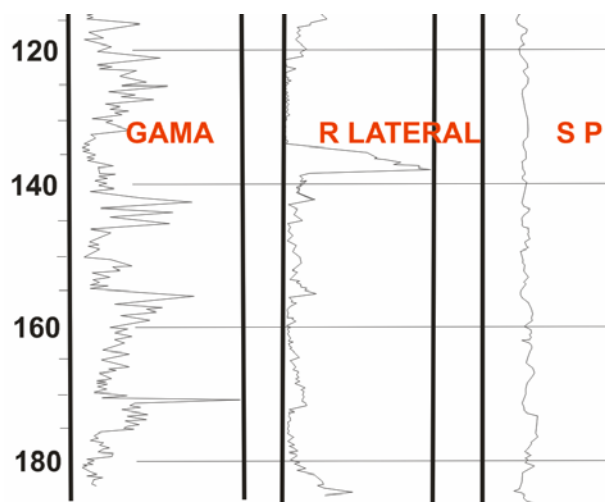


Figura 92 - Dados processados de perfilagem geofísica de poço (últimas metragens do poço).

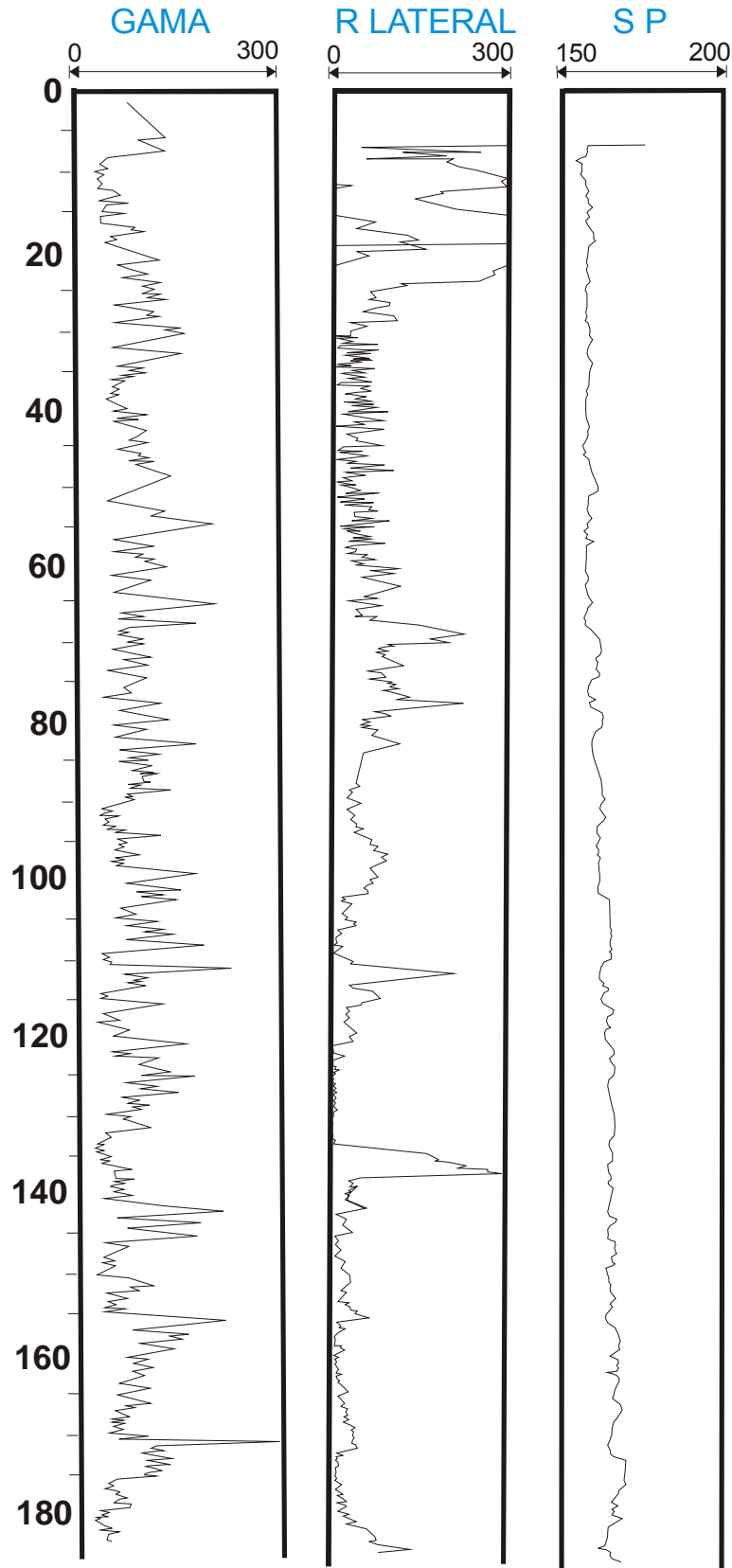


Figura 93 - Dados processados de perfilagem geofísica de poço.

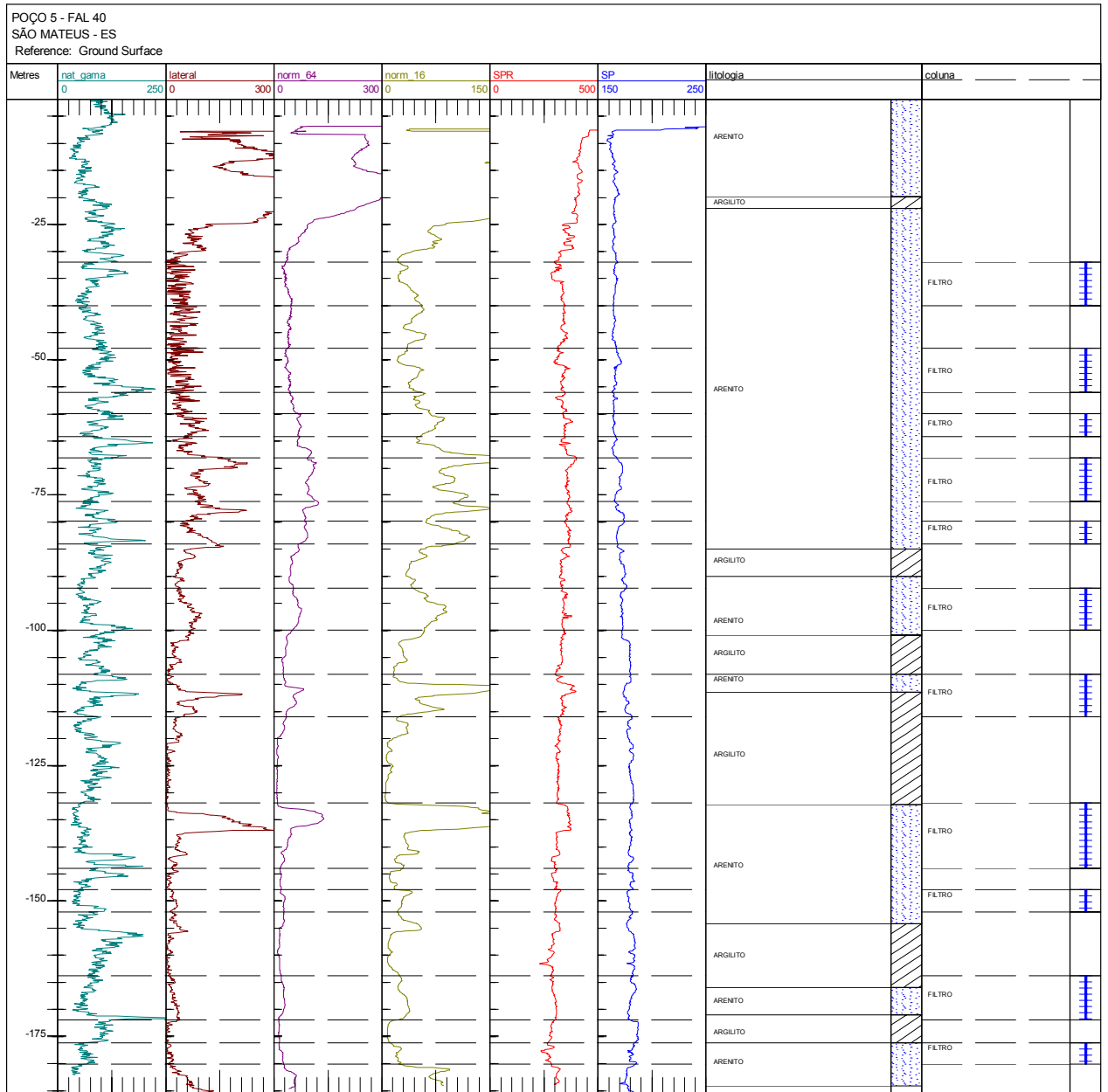


Figura 94 - Dados processados de perfilagem geofísica de poço.

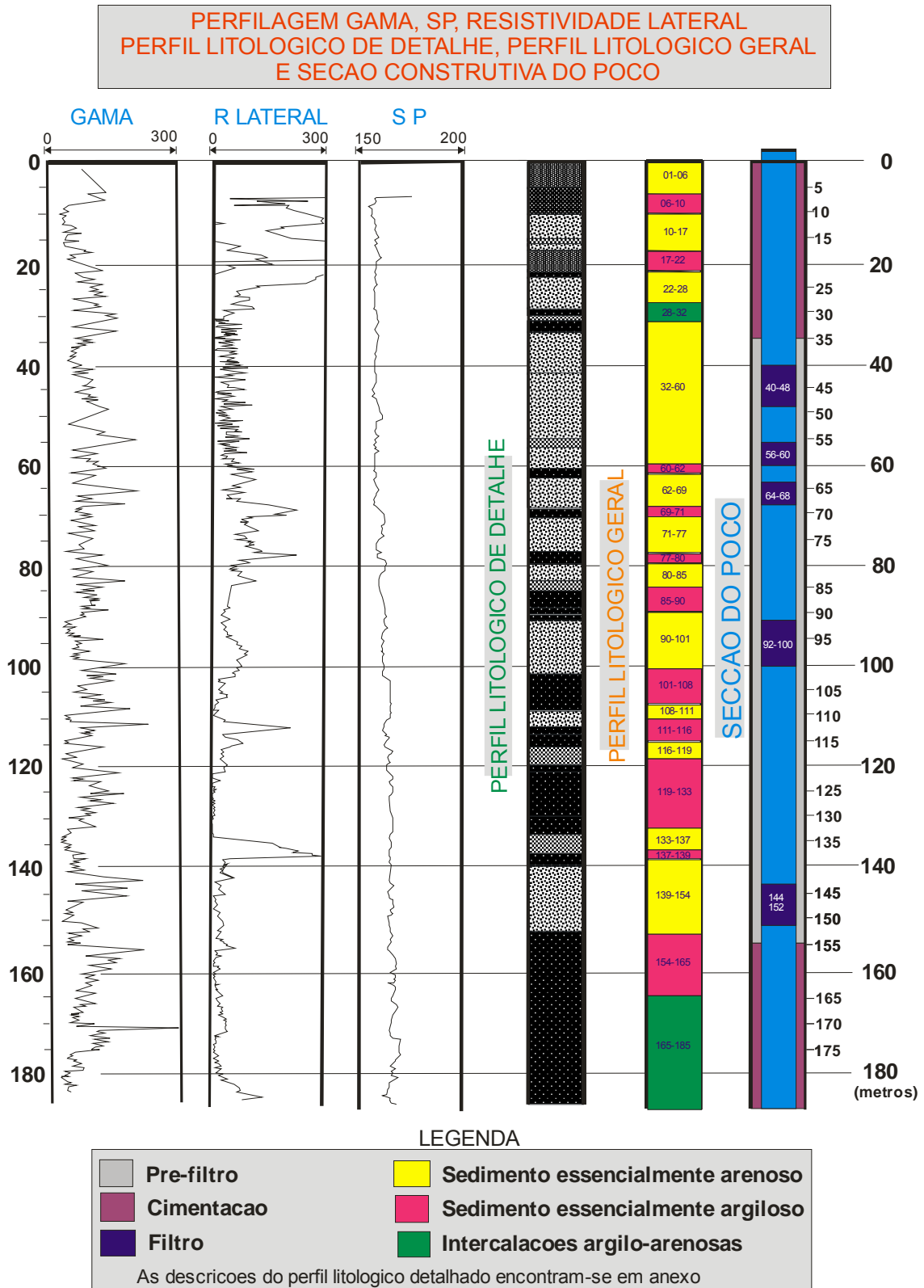


Figura 95 - Dados de perfilagem geofísica de poço integrado à geologia detalhada para a elaboração do perfil construtivo do poço FAL-40.

7.2.2. Testes de produção e de aquífero

O ensaio de produção conjugado com o de aquífero foi realizado tanto no poço FAL-40 quanto no FAL-42, visando à determinação das perdas de carga totais que ocorrem no poço quando se processa bombeamento com vazões conhecidas. Um acampamento foi montado na área para execução desses serviços (Figuras 96 e 97).



Figura 96 - Acampamento no poço FAL-40.



Figura 97 - Piezômetro do poço FAL-40.

O principal objetivo quando se executa um teste de produção em um poço é conhecer um limite máximo de exploração, a partir do qual um somatório de danos (material fino, vida útil da bomba, consumo de energia, etc.) poderá comprometer seriamente a sua capacidade de produção e/ou sua vida útil.

A metodologia adotada para o teste de produção foi a do teste escalonado, realizado através do bombeamento contínuo, passando-se de uma etapa para outra após a recuperação do nível estático. As vazões progressivas e crescentes foram de 15.000, 30.000 e 50.000 l/h, com intervalos de tempo de bombeamento de 3 horas, 15 horas e 30 horas, respectivamente. Esses intervalos de vazões foram escolhidos com base nos dados de um pré-teste realizado no momento da instalação do acampamento e início das operações logísticas e de calibração (Figura 98 e Figura 99).



Figura 98 - Água bombeada do poço FAL-40 durante o pré-teste de bombeamento.



Figura 99 - Escoador de orifício circular durante a calibração no poço FAL-40.

Para o teste de produção, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- uma bomba submersa LEÃO em aço inox com diâmetro de 3" com motor de 5,5 c.v. e 7 estágios, com vazão de 60.000 l/h, a 58 m.c.a;
- dois medidores elétricos de nível; e
- um medidor de vazão de orifício circular, especificamente construído para estes testes, com diâmetro de 2" (Figura 100).



Figura 100 - Equipamento de orifício circular para medidas de vazão constante.

Os testes foram conduzidos com medidas em intervalos de tempo pré-determinados dos níveis estáticos, inicialmente, e dinâmicos tanto no poço de produção quanto no piezômetro, adotando-se tabelas eletrônicas preenchidas *on line* através de um *notebook*. Os três testes mencionados anteriormente para cada poço e piezômetro somente foram retomados após a completa retomada nos níveis estáticos iniciais.

A Figura 100 ilustra, a título de exemplo, o modelo de planilha eletrônica usado, para a primeira etapa do teste correspondente à vazão constante de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ e medidas simultâneas do nível de água tanto no poço de captação (FAL-40) quanto no piezômetro. Isto foi válido tanto para a fase de bombeamento quanto para a fase de recuperação no nível de água. Nesta planilha, foram gerados diagramas que permitiram o acompanhamento, também *on line*, da qualidade dos dados. Este mesmo procedimento foi realizado nos outros testes para 30 e $50 \text{ m}^3/\text{h}$, em ambos os poços.

FICHA PARA TESTE DE PRODUÇÃO DO POÇO - 1ª ETAPA									
REBAIXAMENTO					RECUPERAÇÃO				
HORA	t (min)	ND(PO) (m)	ND (PI)(m)	Q (m³/h)	HORA	t' (min)	ND(PO) (m)	ND (PI)(m)	tb't' + 1
16:30:00					19:02:00				
16:31:00	0:01:00	6.34	5.28	15.00	19:03:00	0:01:00	5.58	5.51	90.00
16:32:00	0:02:00	6.38	5.33	15.00	19:04:00	0:02:00	5.78	5.47	60.00
16:33:00	0:03:00	6.43	5.36	15.00	19:05:00	0:03:00	5.76	5.44	45.00
16:34:00	0:04:00	6.46	5.37	15.00	19:06:00	0:04:00	5.74	5.41	36.00
16:35:00	0:05:00	6.48	5.38	15.00	19:07:00	0:05:00	5.72	5.4	30.00
16:36:00	0:06:00	6.49	5.40	15.00	19:08:00	0:06:00	5.71	5.39	25.71
16:38:00	00:08:00	6.51	5.41	15.00	19:10:00	00:08:00	5.68	5.37	20.00
16:40:00	00:10:00	6.53	5.43	15.00	19:12:00	00:10:00	5.66	5.35	16.36
16:42:00	00:12:00	6.54	5.44	15.00	19:14:00	00:12:00	5.66	5.33	13.85
16:45:00	00:15:00	6.55	5.45	15.00	19:17:00	00:15:00	5.64	5.31	11.25
16:50:00	00:20:00	6.57	5.47	15.00	19:22:00	00:20:00	5.62	5.3	8.57
16:55:00	00:25:00	6.61	5.48	15.00	19:27:00	00:25:00	5.6	5.28	6.92
17:00:00	00:30:00	6.63	5.50	15.00	19:32:00	00:30:00	5.58	5.27	5.81
17:10:00	00:40:00	6.63	5.51	15.00	19:42:00	00:40:00	5.57	5.25	4.39
17:20:00	00:50:00	6.63	5.53	15.00	19:52:00	00:50:00	5.55	5.24	3.53
17:30:00	1:00:00	6.65	5.55	15.00	20:02:00	1:00:00	5.53	5.23	2.95
17:40:00	1:10:00	6.66	5.55	15.00	20:12:00	1:10:00	5.52	5.22	2.54
17:50:00	1:20:00	6.67	5.56	15.00	20:22:00	1:20:00	5.51	5.2	2.22
18:10:00	1:40:00	6.68	5.57	15.00	20:42:00	1:40:00	5.51	5.19	1.78
18:45:00	2:00:00	6.69	5.58	15.00	21:17:00	2:00:00	5.51	5.19	1.49
19:00:00	2:30:00	6.70	5.59	15.00	21:32:00	2:30:00			
19:30:00	3:00:00	6.73	5.60	15.00	22:02:00	3:00:00			

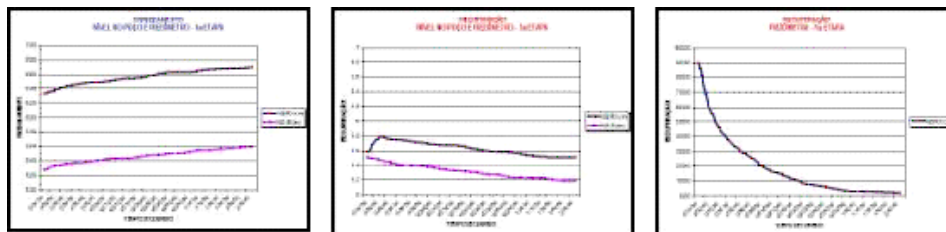


Figura 101 - Planilha eletrônica utilizada e controle *on-line*.

Em um aquífero não confinado, a água subterrânea pode ser explorada através de dois mecanismos: como nos aquíferos confinados, o decréscimo na pressão no aquífero leva a água a um armazenamento elástico (S – armazenamento, *storativity*). O caimento no nível de água também leva a um escoamento pelos poros do aquífero, devido à gravidade (S_y – produção específica, *specific yield*).

Com o intuito de obter o máximo de parâmetros hidrodinâmicos que possam indicar uma vazão de exploração mais adequada à correta gestão dos recursos

hídricos subterrâneos na área de pesquisa, foi utilizada a equação de Neuman, mencionada anteriormente, para calcular a transmissividade (T) e a condutividade hidráulica (K), além do coeficiente de armazenamento (S) e da produção específica (Sy).

Para isso, foram utilizados os dados de rebaixamento medidos nos piezômetros durante a etapa de bombeamento de maior duração, ou seja, 50.000l/h e 30 horas. Os Gráficos 35 e 36 trazem os resultados alcançados para os piezômetros dos poços FAL-40 e FAL-42, respectivamente.

Os valores obtidos de transmissividade (T) para ambos os poços são bastante semelhantes – $1,61 \times 10^{-1}$ (FAL-40) e $1,98 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{min}$ –, o que indica uma homogeneidade do aquífero na região onde estão inseridos esses poços. Valores nessa ordem de grandeza são compatíveis com aquíferos com bons potenciais hídricos.

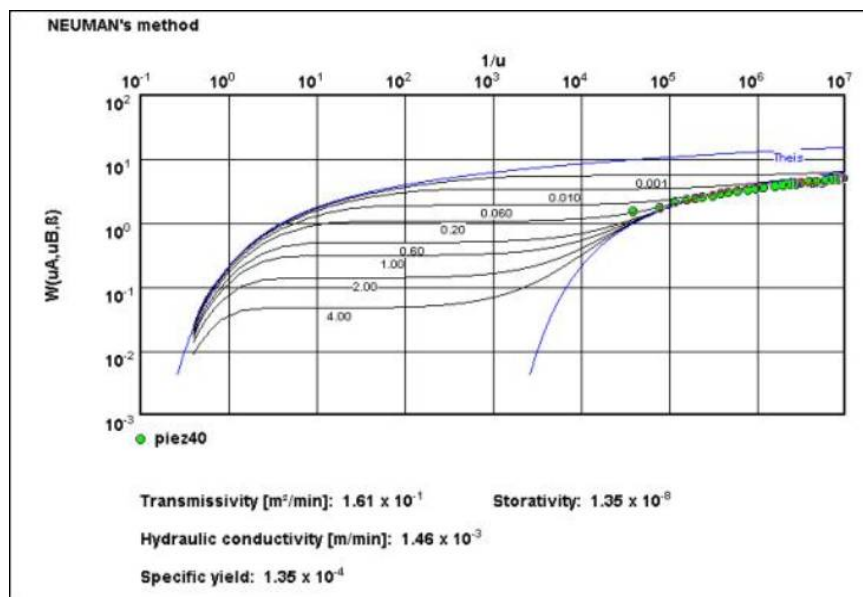


Gráfico 35 - Método analítico de Neuman para a determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero livre – piezômetro do poço FAL-40.

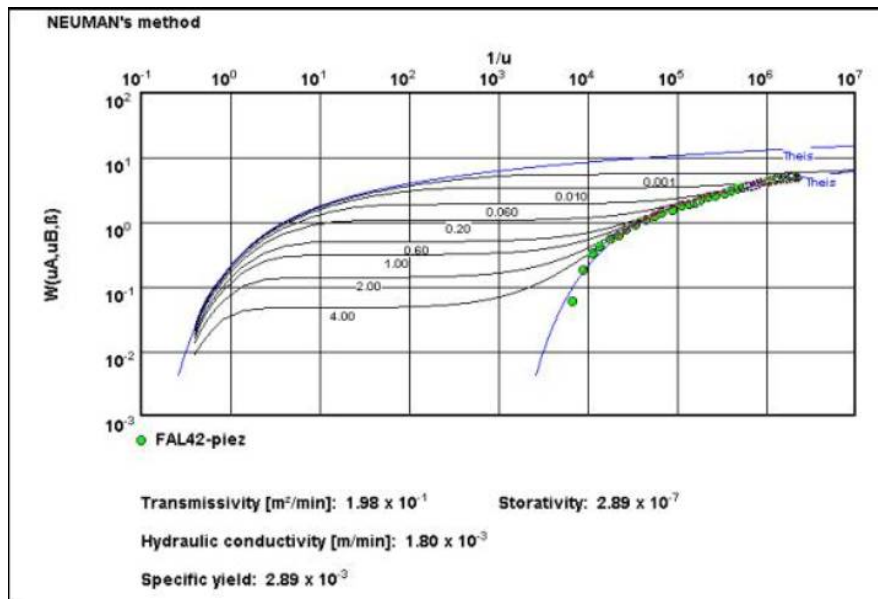


Gráfico 36 - Método analítico de Neuman para a determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero livre — piezômetro do poço FAL-42.

Também os valores de condutividade hidráulica (K) dos dois poços estão muito próximos, pois transmissibilidade está relacionada com a condutividade hidráulica pela relação $T = K/b$, onde b é a espessura do aquífero. Na região do poço FAL-40, a condutividade hidráulica é de $1,43 \times 10^{-3}$ m/min, enquanto na região do poço FAL-42 é de $2,89 \times 10^{-3}$ m/min.

Já o coeficiente de armazenamento (S) apresentou maior variação entre os valores obtidos. Para a região do poço FAL-40, S foi de $1,35 \times 10^{-8}$, enquanto para as proximidades do poço FAL-42 foi de $2,89 \times 10^{-7}$. Pode-se considerar esta variação não significativa, pois o valor do coeficiente de armazenamento depende da espessura saturada, e tal espessura varia entre os poços.

7.2.3. Regimes de bombeamento para os poços FAL-40 e FAL-42

Com base nos parâmetros obtidos nos testes anteriores, foi possível a determinação das equações características dos poços produtores para regimes de bombeamento de uma hora e de cinco anos, bem como a determinação da máxima vazão de exploração e a avaliação da interferência de outros poços na região.

- **Equação característica para uma hora de bombeamento**

Para determinação da equação característica do poço para uma hora de bombeamento, inicialmente foi avaliado se os dados obtidos satisfaziam às condições de contorno:

$$Q1 < Q2 < Q3 \text{ e } S1/Q1 < S2/Q2 < S3/Q3$$

Constata-se que isto é correto somente para o poço FAL-40. No caso do poço FAL-42, o incremento do rebaixamento proporcionado pelo aumento de vazão de 30 para 50 m³/h não foi suficiente para que S3/Q3 fosse maior do que S2/Q2. A implicação disto é que não foi possível avaliar diretamente/matematicamente a capacidade de produção do poço FAL-42. Devido à proximidade e a semelhança das características construtivas, nenhum erro grave foi cometido pelo rebatimento dos resultados alcançados com o poço FAL-40 para o poço FAL-42.

A solução do sistema $S_{wi} = BQ_i + CQ_i^n$, onde S_{wi} é o rebaixamento para um tempo qualquer, B é o coeficiente de perdas no aquífero, C é o coeficiente de perdas no poço e “n” é o coeficiente de proporcionalidade entre C e a vazão (Q), foi montada com os dados dos três escalões de bombeamento e os valores obtidos por meio de software específico que utiliza um método iterativo. A equação característica do poço FAL-40 para uma hora de bombeamento apresenta os seguintes parâmetros:

$$S_w (60 \text{ min}) = 0,0206 Q + 0,01233 Q^{1,6613}$$

- **Equação característica para cinco anos de bombeamento**

As curvas características são construídas de acordo com o exposto acima e, por sua vez, são determinadas para um tempo específico, de forma que pode e deve ser utilizada para identificar uma vazão de exploração que prolongue a vida útil do poço. Não existe um critério bem definido sobre qual é o alcance

máximo de tempo (confiável) que a equação característica pode refletir. No entanto, critérios como demandam, oferta hídrica e tendência a aumento de interferências devido a novos poços devem ter um peso maior na escolha do tempo de alcance. Sendo assim, um tempo de cinco anos se encaixa adequadamente nesse caso.

A metodologia utilizada para atingir este objetivo foi a determinação, inicialmente, do coeficiente de perdas lineares (B^*) correspondente a este alcance, já que este parâmetro varia no tempo. Assim,

$$B^* = (S_w(5 \text{ anos}) - CQ^n) / Q$$

$$B^* = 0,0561$$

$$S_w(5 \text{ anos}) \gg 11,00 \text{ (rebaixamento projetado para 5 anos)}$$

$$C = 0,01233$$

$$n = 1,6613$$

$$Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$$

Logo, a equação característica do poço FAL-40 para um tempo de 5 anos de bombeamento é:

$$S_w(5 \text{ anos}) = 0,0561 Q + 0,01233 Q^{1,6613}$$

- **Vazão máxima de exploração dos poços produtores**

Na prática, é necessário otimizar a vazão de exploração em função da diminuição de custos e da preservação do manancial hídrico. Neste sentido, é recomendável avaliar uma vazão máxima, em função do Rebaixamento Máximo Disponível (RMD). Os valores encontrados de B , C e n da fórmula $S_w = BQ + CQ^n$, que mostra as perdas de carga no aquífero (BQ) por construção do poço (CQ^n), constituem a Equação Característica do Poço. Desta forma, foram determinadas:

$$S_w (60 \text{ min}) = 0,0206 Q + 0,01233 Q^{1,6613}$$

$$S_w (5 \text{ anos}) = 0,0561 Q + 0,01233 Q^{1,6613}$$

Um fator predominantemente limitador é o rebaixamento máximo disponível (RDM), ou seja, a lâmina d'água efetivamente disponível entre o nível estático e o crivo da bomba. Para a avaliação do rebaixamento máximo disponível, consideram-se os seguintes parâmetros:

Crivo da bomba = 58,0 m

Submergência da bomba = 5,0 m

Nível estático = 6,0 m

Variação sazonal = 5,0 m

Interferência entre poços = 12,0 m

$$\text{RMD} = \text{Crivo da bomba} - \text{NE} - \text{Submergência} - \text{Interferência} = 30 \text{ m}$$

- **Interferência por outros poços**

A interferência do bombeamento ocasionada por outros poços (FAL-42, FAL-56 e FAL-45) foi avaliada através da expressão de Theis, mostrada abaixo:

$$\text{Expressão de Theis: } S_w = (Q / 4pT) * W(u)$$

Onde

$$u = r^2 S / 4Tt;$$

S_w = rebaixamento adicional gerado pela interferência

Q = vazão

T = transmissividade

t = tempo

R = distancia para o piezômetro

$W(u)$ = função do poço

S = coeficiente de armazenamento

Normalmente, a maioria desses parâmetros é estimada devido à falta de dados de testes de bombeamento de longa duração. Utilizando os resultados obtidos para os parâmetros hidrodinâmicos, obteve-se um rebaixamento total de 12,0 m. A Figura 102 mostra os parâmetros que foram utilizados no cálculo da interferência dos poços mais próximos ao FAL-40 e FAL-42 e que estão sendo explorados.

Poços	Distância(m)	Tempo(s)	u	W(u)	Q(m ³ /s)	Sw(m)
FAL42	500	7200	0.002878	5.3037	0.01388	3.887539
FAL56	540	7200	0.003357	5.1399	0.00305	3.282918
FAL4/5	500	7200	0.002878	5.3037	0.00305	3.887539

Figura 102 - Coeficientes utilizados no cálculo da interferência dos poços mais próximos em operação.

A partir da equação característica do poço FAL-40 para um tempo de 05 anos de bombeamento, foi possível encontrar o regime de bombeamento (vazão x tempo) que alcançaria o limite máximo de rebaixamento (RMD = 32,0 m).

Como pode-se observar no Gráfico 37, a vazão máxima possível (Q_{poss}) para o poço FAL-40 é de 110 m³/h, mantida constante por um período de 20 horas contínuas de bombeamento com 4 horas de recuperação.

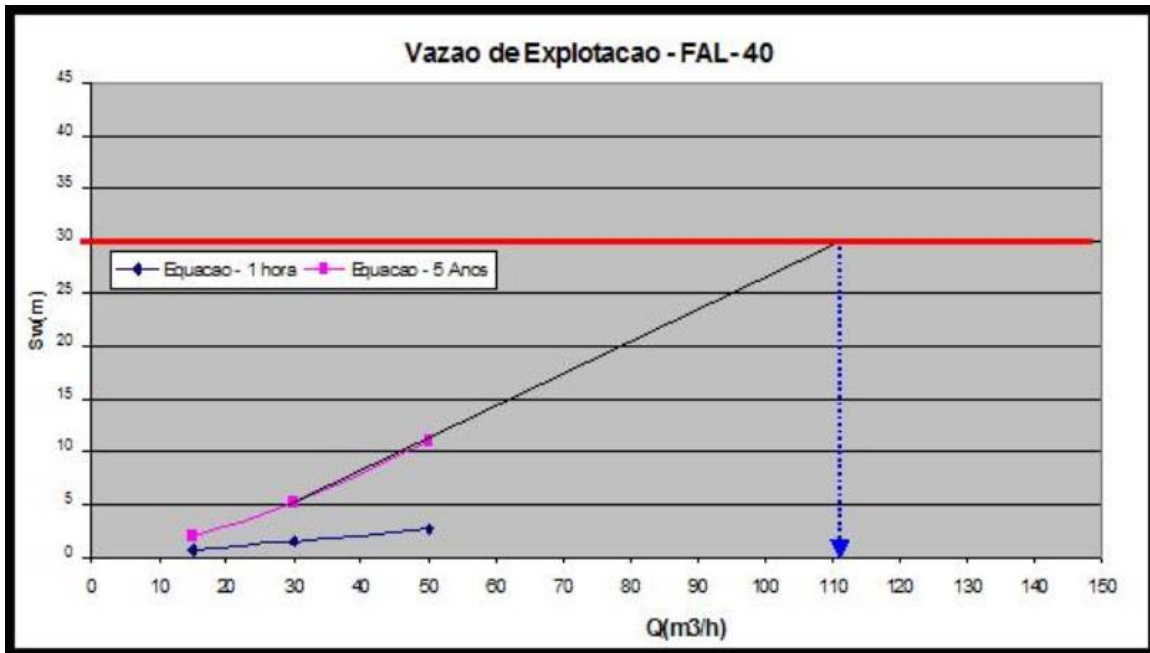


Gráfico 37 - rebaixamento máximo disponível indicando a vazão máxima disponível utilizando as equações características para 1 hora e 5 anos.

7.3. RESULTADOS

Como resultados da pesquisa, podem ser citados os seguintes fatos:

- Em função das análises dos poços e piezômetros construídos e de observações locais, o sistema aquífero local explorado deve ser considerado como um sistema aquífero livre, até a profundidade de 140 m.
- O aquífero livre compreende o arenito mais superficial do Grupo Barreiras, que está aflorando na área de pesquisa. Este arenito possui coloração amarelo-avermelhada, granulometria média a fina, composto por grãos de quartzo, cuja esfericidade e arredondamento estão entre baixo e médio, respectivamente. Subordinadamente, mas com presença visual de fácil constatação, encontram-se argilominerais e minerais pesados.

- No intervalo de 140 m a 160 m, encontram-se os melhores aquíferos, representados pelos arenitos grosseiros, pouco argilosos e bem selecionados, com características de um sistema aquífero confinado, provavelmente associado a Fm Rio Doce. A espessura média deste pacote sedimentar pode ser considerada em torno de 150 m.
- O nível estático na região da área de pesquisa varia de 5,0 m a 7,0 m nos meses em que ocorre deficiência hídrica e em torno de 1,0 m quando se processa a reposição e excedente hídrico. Em alguns locais da área, foram constatados níveis de água aflorantes (os poços tubulares FAL-40 e FAL-42), e os piezômetros, recentemente construídos na área de pesquisa da Fazenda Alegre, estão inseridos nesse sistema aquífero.
- Com base nas análises realizadas utilizando os resultados obtidos com os testes de aquífero, fica evidente que as características hidrodinâmicas (T, K, S e Sy) do aquífero apontam para um bom manancial hídrico subterrâneo.
- Os valores obtidos de transmissibilidade (T) para os poços podem ser considerados entre $1,61 \times 10^{-1}$ e $1,98 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{min}$, o que indica uma homogeneidade do aquífero na região onde estão inseridos esses poços. Valores nessa ordem de grandeza são compatíveis com aquíferos com bons potenciais hídricos.
- Os valores de condutividade hidráulica (K) para a área onde se inserem os dois poços podem ser considerados como variando entre $1,43 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{min}$ e $2,89 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{min}$.
- Os valores do armazenamento (S) apresentaram uma variação maior entre os valores obtidos. Para a região do poço FAL-40, S foi de $1,35 \times 10^{-8}$, enquanto para as proximidades do poço FAL-42 foi de $2,89 \times 10^{-7}$.

Esta variação pode ser associada, sem maiores problemas, simplesmente à variação da espessura saturada.

- Com relação aos regimes de bombeamento dos dois poços produtivos, temos como resultados o seguinte:

Equação característica (FAL-40) 1 hora: A equação característica do poço FAL-40 para uma hora de bombeamento apresenta os seguintes parâmetros:

$$Sw (60 \text{ min}) = 0,0206 Q + 0,01233 Q^{1,6613}$$

Equação característica (FAL-42) 5 anos: A equação característica do poço FAL-40 para um tempo de 05 anos de bombeamento será:

$$Sw (5 \text{ anos}) = 0,0561 Q + 0,01233 Q^{1,6613}$$

Rebaixamento máximo: Um fator predominantemente limitador é o rebaixamento máximo disponível (RDM), que deve ser considerado como mostrado abaixo:

$$RMD = \text{Crivo da bomba} - \text{NE} - \text{Submergência} - \text{Interferência} = 30 \text{ m.}$$

Interferência de poços: Com relação à interferência de outros poços em operação, e considerando os dados existentes destes outros poços, os resultados obtidos para os parâmetros hidrodinâmicos apontam para um rebaixamento total de 12,0 m.

Vazão máxima de produção: A vazão máxima possível, de acordo com os estudos aqui empreendidos, pode ser considerada de 110 m³/h mantida constante por um período de 20 horas contínuas de bombeamento e 4 horas de recuperação.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em consonância com o objetivo proposto neste estudo, de avaliar a potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos no campo petrolífero de Fazenda Alegre utilizando técnicas de geofísica integrada aos aspectos hidrogeológicos e levando em consideração as premissas ambientais, legais e de desenvolvimento sustentado na exploração dos sistemas aquíferos circunvizinhos ao campo em questão, conclui-se que:

- A metodologia utilizada no estudo, com técnicas de geofísica (eletroresistividade) integrada aos aspectos hidrogeológicos da área, possibilitou caracterizar com sucesso as principais camadas geoeletricas e suas respectivas espessuras e profundidades.
- As curvas de eletroresistividade que foram interpretadas nesta pesquisa podem ser agrupadas em três grupos qualitativos (QQ, KQ e QK) na classificação de Mooney e Orellana (1966). De um modo geral todas elas têm terminações decrescentes, com as principais variações ocorrendo nos estratos geoeletricos mais rasos.
- As técnicas de investigação geofísicas integradas às descrições litológicas e dos testes de vazão de poços tubulares profundos realizados na área de estudo identificaram seis camadas geoeletricas, sendo que a terceira e a quinta camadas apresentam-se como as mais promissoras no tocante ao potencial hidrogeológico.
- Devido aos fatos de a primeira camada geoeletrica possuir baixa espessura (<6,0 m) e do segundo estrato apresentar-se bastante resistivo, essas camadas não apresentam qualquer potencial hidrogeológico.
- A terceira camada geoeletrica possui características (resistividade e espessura) que não podem ser desprezadas, quando avaliado o seu

potencial hidrogeológico. Sendo assim, considera-se como regular o potencial hidrogeológico desse estrato, com espessura variando de 6 a 36 m.

- A quarta e a sexta camadas geoeletricas não possuem características de aquífero, mas sim de um aquífero ou até mesmo de um aquíclodo, ou seja, têm importância em uma possível condição de confinamento ou semi-confinamento do aquífero intercalado. Sendo assim, considera-se menos importante em termos de potencial hidrogeológico.
- Quando comparada a seção geoeletrica com os perfis litológicos dos poços FAL-56 e FAL-06, fica evidente a boa correlação entre as camadas geoeletricas e as camadas litológicas.
- Os valores de resistividade observados nas sondagens elétricas realizadas na área não apresentaram valores indicativos de água salobra ou salgada. Este fato foi confirmado pelas análises de condutividade elétrica, já realizadas nas análises de água dos poços tubulares profundos do campo de Fazenda Alegre.
- Como produto dos processamentos geofísicos e integração dos dados, foram localizados sete poços tubulares profundos na área de estudo com profundidades entre 150 e 200 m, objetivando validar o modelo proposto e otimizar a produção de água subterrânea com um menor número de poços construídos.
- Baseado nas localizações propostas na área de pesquisa foi construído dois poços tubulares profundos (FAL-40 e FAL-42) e efetuadas amostragens metro a metro com descrições litológicas, perfilagem elétrica e ensaios de bombeamento, sendo que, de acordo com os estudos empreendidos, a vazão explorável pode ser considerada de 110 m³/h mantida constante por um período de 20 horas contínuas de

bombeamento, com 4 horas de recuperação (regime de bombeamento) o que comprova a expectativa do bom manancial hídrico subterrâneo.

- Em função das análises dos poços, perfilagem e piezômetros construídos, o sistema aquífero local explorado deve ser considerado livre até a profundidade de 140 m, compreendendo as areias argilosas com colorações amareladas/avermelhadas, granulometria média a fina.
- No intervalo de 140 a 160 m, encontram-se os melhores aquíferos, representados pelos arenitos grosseiros, pouco argilosos e bem selecionados, provavelmente associados a Fm Rio Doce e com características de um sistema aquífero confinado.
- A evolução do estudo hidrogeológico da área possibilitará a exploração racional da reserva hídrica subterrânea existente, contribuindo também para o desenvolvimento sustentável da região através da disponibilidade dos dados para entidades gestoras dos recursos hídricos (ANA, IEMA, dentre outras), propiciando planejamento, acompanhamento e preservação dos recursos hídricos.
- Sugerimos o detalhamento das descrições litológicas e integração com perfis elétricos dos poços tubulares existentes na área, como também os que serão perfurados, visando identificar o contato das Formações Barreiras e Rio Doce.
- Sugerimos a investigação da camada geoeletrica 6 com o objetivo de determinar a sua espessura e avaliar o potencial hídrico.
- Sugerimos a realização de estudos de viabilidade econômica para implantação de projetos de piscicultura e cunicultura na área em

estudo, tendo em vista o bom potencial hídrico do sistema de aquíferos identificados.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/cbhriodoce/bacia/caracterizacao.asp>>. Acesso em: 30 maio 2007.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados**: módulo: hidrogeologia. Rio Claro/SP: UNESP/IGCE/DGA, 2001. 91p.

CASTELO BRANCO, R. M. G. et al. **Avaliação hidrogeológica dos campos petrolíferos do norte capixaba através de técnicas geofísicas e hidrogeológicas**. Relatório Técnico. Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura-FCPC. Fortaleza/CE. 2003. 127p.

COSTA, F. G. Projeto hidrogeologia do Centro de Minas Gerais e norte do Espírito Santo. **Folha Rio Doce**. Belo Horizonte: [s.n.], 1980. Relatório inédito DNPM/CPRM).

CPRM. Banco de dados de poços. [2000]. 1 CD-ROM.

CUNHA, L. S. da. **Prospecção de água subterrânea em terrenos sedimentares na região litorânea cearense**: integração de dados geofísicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) -especialidade: Hidrogeologia) – Programa de Mestrado em Geologia, especialidade em Hidrogeologia, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2002.

CUSTÓDIO, E.; LHAMAS, O. **Hidrologia subterrânea**. Barcelona: Ediciones Omega, 1976. 2 v.

EMBRAPA. Banco de dados climáticos do Brasil. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/index.php>>. Acesso em: 26 maio 2007.

FEITOSA, F. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, 1977.

GABARDO, I. T. **Caracterização química e toxicológica da água produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar**. 2007. 250 f. Tese (Pós-graduação em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2007.

IEMA. Disponível em: <<http://www.iema.es.gov.br/default.asp>> Acesso em: 14 abril de 2007.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br>>. Acesso em: 16 abril de 2007.

LEITE, C. E. S.; MÖBUS, G., Estimativa do potencial instalado de água subterrânea no Estado do Ceará 1991 – 1998. In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 2000, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: ABAS/ALHSUD/IAH. CDROM. 21 p. jul-ago/2000. Cd-rom.

MOHRIAK, W. U. **Interpretação geológica da bacia do Espírito Santo e da região de Abrolhos**: Petrografia, datação radiométrica e visualização sísmica das rochas vulcânicas. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/tecnologia/port/boletim_geociencias/v14_n1_no_v_2005_mai_2006/pdf/WebstrUeipassMohriak.pdf>. Acesso em: 28 maio 2007.

MOONEY, H.; ORELLANA, H. P. **A resistivity computation method for layered earth models**, Geophysics, 31, 192–203.

NEUMAN, S. P. **Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response**: Water Resources Research, vol. 11, issue 2, pp. 329-342, 1975. n.1, 41 v.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoeletrica em corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972. 523p.

PETROBRAS; CEPEMAR. **Plano de manejo do parque estadual de Itaúnas**: meio físico. Disponível em: <<http://www.iema.es.gov.br/download/geologia.pdf>>. Acesso em: 19 maio 2007.

PETROBRAS. Estudos hidrogeológicos dos aquíferos dos campos de produção de Fazenda Alegre e mosquito. **Relatório técnico**. Vitória/ES, 2003. 65p.

PETROBRAS. Revitalização de Lagoa Parda: ampliação de injeção de água produzida. Vitória/ES, 2007. 1º slide de apresentação.

PETROBRAS. Estudos hidrogeológicos dos aquíferos das formações de barreiras e rio Doce: região norte do Estado do Espírito Santo. **Relatório técnico**. Vitória/ES, 2005. 40p.

PIAZZA, H.D., ARAÚJO, M.B., BANDEIRA JÚNIOR, A.N. - 1972 - **Projeto Rio Doce: Geologia da Parte Continental**. PETROBRAS. RPBA DIREX Salvador 1972.

PRESTRELO, R. C. **Aplicação do conceito de produção mais limpa ao gerenciamento do uso da água em atividades terrestres de exploração e produção de petróleo**. 2006.134 f. (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2006.

RAY, J. P.; ENGELHARDT, F. R. **Produced water: technological environmental issues and solutions**. New York: Plenum Press, 1992. 616p.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. England: John Wiley & Sons, 1997. 796p.

ROSEGRANT, M. W. Water resources in the twenty first century: challenges and implications for action. In: **Food, agriculture and environment discussion**. Washington: Internacional Food Policy Research Institute, 1997.

SACASA, RJV et al. **Aplicação de sondagens elétricas de resistividade no estudo dos recursos hídricos subterrâneos da localidade de Marabaixo III**. Macapá/AP: Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – IEPA, 2004.

SALATI, ENÉAS; LEMOS, HAROLDO MATTOS; SALATI ENEIDA. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Org.) **Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. São Paulo: Escrituras.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. Hidrogeologia - **conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-1997

SCHINO, J. P.; GIRÃO NERY, G. **Perfilagem geofísica em poços de água**. Apostila, 1997, Salvador, (Petrobrás), 25p.

TELFORD, W. M. et al. **Applied geophysics**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TRANSMAR, Consultoria Ltda. **Estudo de impacto ambiental**. Estação de Fazenda Alegre – Terminal Norte Capixaba. Estudo de Impacto Ambiental-EIA. Vitória, 65p

VELPEN, V. B. P. **Resist**: a computer processing package for dc resistivity interpretation for the ibm pc and compatibles. M.sc. thesis. ITC-Delft, The Netherlands, 1988.

WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. In: WARD, S. H. Geotechnical and environmental geophysics. 2nd ed. II v. Tulsa-Oklahoma, 1990.

ZOHDY, A. A. R. The auxiliary point method of electrical sounding interpretation and relationship to the Dar Zarrouck parameters. **Geophysics**, 1965. 30. v., Issue 4, pp. 493-667

ZOHDY, A. A. R.; BILDORF, R. J. Programs for the automatic processing and interpretation of Schlumberger sounding curves in QuickBasic 4.0. **USGS**, Open-File Report, 89-137