



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
MESTRADO EM GEOLOGIA

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS, GEOLÓGICOS E DE
SENSORES REMOTOS APLICADOS À PROSPECÇÃO DE
ÁGUA SUBTERRÂNEA EM MEIO FISSURAL
(DISTRITO DE JUÁ, IRAUÇUBA/CE)**

TERCYO RINALDO GONÇALVES PINÉO

ORIENTADOR: PROF. DR. RAIMUNDO MARIANO GOMES CASTELO BRANCO

FORTALEZA, SETEMBRO DE 2005

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Gilana Lourenço Ferreira, pelo apoio e compreensão durante a realização desta pesquisa e aos meus familiares por acreditarem no meu objetivo.

Ao meu orientador e amigo, professor Mariano Castelo Branco, que nunca mediu esforços para a concretização deste trabalho.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, pelo importante apoio financeiro através de bolsa de mestrado conforme processo 367/04.

Ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – LGPSR (UFC) e as instituições: PADCT III / MCT, FBB, FINEP (CTPETRO-GEOFAMB 2001-2004 – 01020012), CNPQ (476398/2003-7) e FUNCAP/FCPC (1256-44).

Ao geólogo Mauro Lisboa Souza pela atenção e colaboração em importantes etapas de campo e interpretação de dados geofísicos elétricos.

Ao geólogo Luciano Soares da Cunha e ao professor David Lopes de Castro por diversas contribuições e incentivo.

A mestrandia Maria Valfrida Ávila Cavalcante e aos alunos de graduação em geologia Diego Coutinho de Carvalho Alves, Jackson Alves Martins, Nilo Costa Pedrosa Junior, Magno Reges Barros de Oliveira, por me ajudarem na aquisição de dados geofísicos em etapas de campo.

Ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM (sede Fortaleza) pela concessão de dados geofísicos aéreos oriundos do Projeto PROASNE.

Aos amigos do LGPSR, aos professores e colegas do curso de Mestrado em Geologia e a todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao geólogo Carlos Marcelo Lôbo Maranhão pelo auxílio na interpretação das fotografias aéreas que abrangem a porção noroeste da área total.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação.....	1
1.2. Objetivo Geral.....	3
1.2.1. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Localização e Acesso à Área.....	4

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGIA DO TRABALHO	7
---	---

CAPÍTULO 3

3. ASPECTOS GERAIS	12
3.1. Aspectos Fisiográficos.....	12
3.1.1. Clima.....	12
3.1.2. Geomorfologia.....	14
3.1.3. Vegetação.....	15
3.1.4. Recursos Hídricos.....	17
3.1.4.1. Recursos Hídricos Subterrâneos da Área.....	17
3.1.5. Pedologia.....	22
3.2. Aspectos Geológicos.....	23
3.2.1. Comentários Iniciais.....	23
3.2.2. Geologia Regional.....	23
3.2.3. Geologia Local.....	25
3.2.4. Dados Geológicos de Campo.....	30

CAPÍTULO 4

4. HIDROGEOLOGIA DE MEIO FISSURAL	34
4.1. Fundamentação Teórica	34
4.2. Mecanismos de Fraturamento.....	37
4.3. Prospecção Hídrica em Meio Fissural.....	39

CAPÍTULO 5

5. SENSORIAMENTO REMOTO	43
5.1. Introdução.....	43
5.2. Processamento Digital de Imagens Orbitais.....	44
5.2.1. Técnicas de Processamento de Imagens Espectrais.....	45
5.3. Aplicação de Imagens de Sensores Remotos.....	49
5.3.1. Composição RGB_753.....	50
5.3.2. Modelo Digital do Terreno.....	54
5.3.3. Dados Vetoriais.....	56
5.4. Fotointerpretação.....	58

CAPÍTULO 6

6. GEOFÍSICA DE PROSPECÇÃO	62
6.1. Introdução	62
6.2. Métodos Eletromagnéticos.....	63
6.2.1. Sistema Eletromagnético Aéreo.....	65
6.2.2. Sistema Eletromagnético Terrestre (EM34-3XL)	65
6.3. Métodos Elétricos – Eletrorresistividade	70
6.3.1. Princípio Físico	71
6.3.2. Caminhamento Elétrico.....	72
6.4. Avaliação dos Dados Aeroeletromagnéticos.....	74
6.4.1. Aquisição e Tratamento dos Dados Aeroeletromagnéticos.....	74
6.4.2. Discussão dos Resultados Aeroeletromagnéticos.....	76
6.4.3. Aquisição e Tratamento dos Dados Eletromagnéticos Terrestre.....	80
6.4.4. Discussão dos Resultados Eletromagnéticos Terrestre.....	84
6.4.5. Aquisição e Tratamento dos Dados Elétricos Terrestre.....	95
6.4.6. Discussão dos Resultados Elétricos Terrestre.....	96
6.5. Prospecção Hídrica.....	97
6.5.1. Alvo 01 – Fazenda Livramento.....	99
6.5.2. Alvo 02 – Fazenda Cairu.....	102

CAPÍTULO 7

7. INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS	108
---	-----

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSÕES	116
9. RECOMENDAÇÕES	120

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização geográfica da área de estudo, com detalhe da mesma, segundo a composição colorida falsa-cor RGBI_4328.....	05
Figura 3.1 – Gráfico comparativo das precipitações anuais dos últimos dez anos. Para o ano de 2004 foram obtidas informações apenas dos quatro primeiros meses.....	13
Figura 3.2 – Fotografias exibindo o revelo e vegetação, característicos da área pesquisada.....	16
Figura 3.3 – Mapa de posicionamento dos poços profundos existentes na área.....	21
Figura 3.4 – Esboço simplificado da Província Borborema, com destaque do Domínio Ceará Central (DCC). Fonte: Modificado de Oliveira & Mohriak (2003). Visualização do mapa geológico da Folha de Irauçuba (SA. 24-Y-D-V) ressaltando a área pesquisada nesta dissertação. Fonte: Modificado De Souza Filho (1998).....	27
Figura 3.5 – Esboço geológico da área de estudo. Fonte: Mapa geológico da folha de Irauçuba – 1:100.000 (Souza Filho, 1998).....	28
Figura 3.6 – Mapa da área exibindo os pontos visitados em campo, as direções das estruturas rúpteis na forma de retas e as áreas selecionadas para levantamento geofísico de detalhe (círculos azuis). Observa-se ainda o diagrama de roseta que exhibe as direções preferenciais de fraturamento medidas em campo.....	31
Figura 3.7 – Prancha de fotografias referentes a alguns afloramentos visitados.....	32
Figura 4.1 – Tipos de aquífero segundo sua textura. A) Aquífero Poroso (Arenito); B) Aquífero Cárstico (Calcário); C) Aquífero Fissural (Granito).....	35
Figura 4.2 – Bloco diagrama exibindo os elementos que influem nas características hidrodinâmicas de um aquífero fissural. Fonte: Modificado de Costa e Braz da Silva (1997).....	37
Figura 4.3 – a) Bloco diagrama exibindo fraturas de cisalhamento formadas de acordo com os esforços representados pelo elipsóide ao lado. b) Fraturas de cisalhamento e de tração originadas conforme a orientação dos esforços representados pelo respectivo elipsóide.....	38
Figura 4.4 – Fraturas de tração e enrugamento associado a um dobramento.....	38
Figura 4.5 – Fotografia exibindo fraturas de alívio (representadas por setas vermelhas) com orientação paralela a superfície do maciço e perpendicular a tensão de tração σ_3	39
Figura 4.6 - Mapa do Estado do Ceará apresentando de modo simplificado áreas de abrangência das rochas sedimentares e dos terrenos cristalinos, aos quais estão relacionados respectivamente os aquíferos porosos e os aquíferos fissurais. Fonte : Modificado do Mapa Geológico do Estado do Ceará (Cavalcante, 2003).....	40
Figura 4.7 – Relação ângulo de mergulho de fratura x Distância x Profundidade. Fonte: Modificado de Costa Filho (2000).....	41
Figura 5.1 – Representação estrutural de uma imagem de SR, onde se observam as bandas espectrais, os <i>pixels</i> com seus respectivos níveis de cinza (DN) e a escala de cinza ao lado.....	44
Figura 5.2 – Histograma de uma imagem no eixo X submetido a uma função linear de aumento de contraste, resultando no histograma no eixo Y. <i>Pixels</i> com DN igual a 50 vão ter seu novo nível de cinza igual a 100 (DN') na imagem transformada.....	46
Figura 5.3 – Composição colorida falsa-cor RGB_753 ressaltando os limites dos corpos litológicos da área (contornos de cor preta), lineamentos estruturais pertinentes a estes e cursos de drenagem. As setas em azul representam o posicionamento do rio Juá e o polígono vermelho corresponde ao limite da área de pesquisa. Destacam-se ainda as duas áreas-alvo selecionadas para investigação geológica e geofísica de detalhe, com indicativo dos lineamentos por meio de setas.....	52
Figura 5.4 - Composição colorida falsa-cor RGB_753, com a implementação de um filtro de alta frequência, ressaltando lineamentos diversos e cursos de drenagem. Esta imagem foi utilizada para a extração vetorial de lineamentos de natureza geológica. O polígono vermelho corresponde ao limite da área de pesquisa.....	53

Figura 5.5 – Modelo Digital do Terreno ressaltando vales topográficos ao longo da drenagem. As setas em vermelho indicam o posicionamento do rio Juá.....	55
Figura 5.6 – a) Rede de drenagem característica da área. b) Lineamentos vetoriais com o diagrama de roseta exibindo a orientação principal destas feições.....	57
Figura 5.7 – Mosaico das fotografias aéreas correspondente a área de pesquisa, exibindo ainda as duas áreas que foram definidas para a prospecção hídrica por métodos geofísicos. As setas indicam as estruturas investigadas.....	59
Figura 5.8 – Mapa exibindo lineamentos oriundos das fotografias aéreas que abrangem a área.....	60
Figura 6.1 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética. (H) campo magnético, (E) campo elétrico.....	63
Figura 6.2 – Esquema simplificado da aquisição de dados com o EM34. Fonte: modificado de Reynolds (1997).....	64
Figura 6.3 - Ilustração do equipamento EM34-3 em modo dipolo horizontal (DH).....	66
Figura 6.4 – Relação entre resposta da condutividade versus profundidade. (A) dipolo vertical, (B) dipolo horizontal. Fonte: modificado de McNeill (1980).....	69
Figura 6.5 – Relação entre a condutividade real e a condutividade indicada do terreno, para os arranjos DH e DV.....	69
Figura 6.6 – Representação simplificada das técnicas referentes ao método da Eletrorresistividade...	70
Figura 6.7 – Representação esquemática de um Caminhamento Elétrico, sendo o arranjo Dipolo-Dipolo.....	73
Figura 6.8 – Mapa de condutividade aparente oriundo dos dados aeroeletromagnéticos (4.500 Hz) processados com o uso do <i>software</i> Oasis Montaj pela LASA (2001).....	75
Figura 6.9 – Mapa aeroeletromagnético cujos valores de condutividade foram obtidos em modo coaxial na frequência de 4.500 Hz. Os segmentos de cor preta correspondem aos locais onde foi feito o levantamento geofísico terrestre com o uso do EM34-3XL e as setas em azul indicam o posicionamento do rio Juá.....	77
Figura 6.10 – Mapa aeroeletromagnético referente ao modo coplanar (900 Hz).....	79
Figura 6.11 – Mapa da área de pesquisa exibindo o posicionamento e a direção dos perfis eletromagnéticos terrestres, com ampliação dos perfis realizados próximos aos poços profundos, de modo a facilitar a visualização destes.....	82
Figura 6.12 – Fotografias exibindo o levantamento geofísico terrestre com o uso do equipamento EM34-3XL.....	
Figura 6.13 – Pseudo_ seção referente ao Perfil_EM_01, representando a variação da condutividade aparente da subsuperfície.....	85
Figura 6.14 – Pseudo_ seção referente ao Perfil_EM_02, representando a variação da condutividade aparente da subsuperfície.....	87
Figura 6.15 – Pseudo_ seção referente ao Perfil_EM_03, representando a variação da condutividade aparente da subsuperfície.....	89
Figura 6.16 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos próximo ao poço 51 (Perfil_EM_51), ao longo de um caminhamento da direção leste-oeste.....	91
Figura 6.17 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos próximo ao poço 51 (Perfil_EM_51b), ao longo de um caminhamento da direção norte-sul.....	91
Figura 6.18 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos perto do poço 221.....	92
Figura 6.19 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos perto do poço 222.....	93
Figura 6.20 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos perto do poço 223.....	94

Figura 6.21 – Resultado da inversão para o caminhamento realizado na Fazenda Mandacaru.....	96
Figura 6.22 – Modelo geológico proveniente da seção geométrica de Mandacaru.....	97
Figura 6.23 – Mapa de posicionamento das estruturas geológicas analisadas e dos perfis geofísicos executados na Área_alvo_01 (Fazenda Livramento)	99
Figura 6.24 – Pseudo-seção exibindo a variação da condutividade aparente ao longo do perfil eletromagnético realizado na área da Fazenda Livramento.....	100
Figura 6.25 – Resultado da inversão dos dados adquiridos na área-alvo 01 (Faz. Livramento).....	101
Figura 6.26 - Modelo geológico proveniente da seção geométrica da Fazenda Livramento.....	102
Figura 6.27 – Mapa de posicionamento das estruturas geológicas analisadas e dos perfis geofísicos executados no alvo 02 (Fazenda Cairu).....	102
Figura 6.28 – Pseudo-seção exibindo a variação da condutividade aparente ao longo do perfil eletromagnético Cairu 01.....	103
Figura 6.29 – Resultado da inversão dos dados adquiridos na área-alvo 02, perfil 01 (Faz. Cairu).....	104
Figura 6.30 - Modelo geológico proveniente da seção geométrica da Fazenda Cairu (Perfil_ER_01).	104
Figura 6.31 – Pseudo-seção exibindo a variação da condutividade ao longo do perfil eletromagnético Cairu 02. Estão marcados ainda, os pontos referentes aos lineamentos identificados nas imagens orbitais.....	105
Figura 6.32 – Resultado da inversão dos dados adquiridos na área-alvo 02, perfil 02 (Faz. Cairu).....	106
Figura 6.33 - Modelo geológico proveniente da seção geométrica da Fazenda Cairu (Perfil_ER_02).	106
Figura 7.1 – Integração dos resultados.....	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Coordenadas Geográficas dos vértices limítrofes da área de interesse deste estudo.....	04
Tabela 3.1 – Cadastro dos poços profundos localizados na área de pesquisa, com destaque para a vazão de cada.....	19
Tabela 3.2 – Relação profundidade de fraturas e vazão para os poços 221, 222 e 223.....	20
Tabela 3.3 – Coluna Lito-Estratigráfica para a área de estudo. Fonte: modificado de Souza Filho (1998).....	29
Tabela 4.1 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em laboratório a partir de rochas cristalinas. Fonte: (Costa & Braz da Silva, 1997).....	36
Tabela 5.1 – Quadro comparativo de dois dados técnicos entre os principais sistemas sensores em órbita (satélites). A letra B corresponde a uma abreviação para banda espectral.....	45
Tabela 6.1 – Relação entre propriedades físicas dos materiais e métodos geofísicos associados.....	62
Tabela 6.2 – Relação entre configuração das bobinas e frequências utilizadas durante a aquisição dos dados.....	65
Tabela 6.3 - Profundidade teórica de investigação do EM34-3 em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo, e frequências aplicadas pelo equipamento.....	68
Tabela 6.4 – Profundidade investigação para o arranjo dipolo-dipolo em função de L.....	73
Tabela 6.5 – Apresentação das coordenadas UTM do início e do final de cada perfil eletromagnético.....	81
Tabela 6.6 – Coordenadas UTM dos perfis geofísicos elétrico e eletromagnético executados.....	99
Tabela 6.7 – Coordenadas UTM dos perfis geofísicos elétrico e eletromagnético executados na Fazenda Cairu.....	102

RESUMO

Esta pesquisa envolveu atividades de natureza geofísica, geológica e hidrogeológica, realizadas numa área localizada no município de Irauçuba-CE, mais especificamente no distrito de Juá. Esta região encontra-se bastante castigada pela seca, além de ser problemática em termos de recursos hídricos subterrâneos, pois aproximadamente 70% dos poços profundos existentes no local de pesquisa são improdutivos.

A referida área foi alvo de uma outra pesquisa relacionada ao Projeto Água Subterrânea do Nordeste do Brasil (PROASNE), na qual entre os anos de 2000 e 2004, pesquisadores canadenses e brasileiros de vários ramos das Geociências se empenharam para o desenvolvimento da pesquisa dos recursos hídricos da referida região. Uma das atividades realizadas durante o projeto foi um levantamento geofísico aéreo (magnético e eletromagnético – EM e VLF) com o intuito de mapear rapidamente zonas favoráveis à exploração de água subterrânea (aquíferos fissurais). O principal resultado deste levantamento corresponde ao mapa aeroeletromagnético, que exhibe lineamentos de condutividade elevada, orientados na direção norte-sul, interpretados, naquele projeto, como estruturas favoráveis ao acúmulo de água subterrânea. Porém, três poços profundos foram perfurados com base principalmente nesta informação e resultaram em poços improdutivos. Desta forma, a presente pesquisa foi desenvolvida com o intuito de avaliar os dados aeroeletromagnéticos no que se refere a sua aplicabilidade para prospecção hídrica subterrânea em terrenos de natureza cristalina, já que o custo envolvido neste tipo de aquisição é muito superior ao custo associado à prospecção geofísica terrestre.

Para a avaliação da informação aeroeletromagnética foram utilizados dados geológicos obtidos em campo (litologia e atitude de fraturas), hidrogeológicos (cadastro de poços profundos), produtos vetoriais oriundos de imagens de satélite e fotografias aéreas (lineamentos e rede de drenagem) e valores de condutividade aparente da subsuperfície, adquiridos com o uso de um equipamento eletromagnético EM34-3XL, ao longo de perfis regionais. Todos os dados foram integrados em plataforma SIG de modo a facilitar a análise e interpretação conjunta dos mesmos. Outro propósito foi a aplicação de uma metodologia prospectiva, que envolveu a análise de imagens de satélite, de fotografias aéreas e de informações geológicas de campo para a definição de duas áreas-alvo inseridas na área total e, em seguida, a aplicação dos métodos geofísicos elétrico (dipolo-dipolo) e eletromagnético

(EM34-3XL) de detalhe, com o intuito de definir um local propício ao armazenamento e exploração de água subterrânea.

Com base nos objetivos propostos nesta pesquisa e na metodologia utilizada para a execução da mesma, chegamos à conclusão que os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Inicialmente, verificamos que os dados eletromagnéticos aéreos, na forma como foram tratados, interpretados e utilizados, não são confiáveis para o seu principal propósito, necessitando portanto de um processamento mais adequado e posterior validação através de técnicas geofísicas terrestres e análise de imagens de sensores remotos. Por fim, através da metodologia prospectiva adotada, bem menos onerosa que a técnica geofísica aérea outrora utilizada, foi definido um local propício à captação de água subterrânea por meio de um poço profundo.

ABSTRACT

This research involved geophysical, geological and hydrogeological activities developed in the district of Juá, Irauçuba Country, Ceará State. This region is problematic in terms of groundwater resource, therefore approximately 70% of the existing deep wells in the research area are unproductive.

The referring area was the target of another research under the PROASNE project (Northeastern Brazil Groundwater Project) where in the period of 2000 to 2004, Canadian and Brazilian researchers worked together for the development of the groundwater resources. One of the activities developed during the project was an airborne geophysical survey (magnetic and electromagnetic – EM and VLF) with the purpose of detect favorable zones for the exploitation of groundwater (fissural aquifer). The main result of that survey was an airborne electromagnetic map showing north-south lineaments of high apparent conductivity interpreted as structures favorable to the accumulation of groundwater. However, three deep wells had been drilled based on that information and resulted unproductive wells. Therefore, this research was developed with the objective to evaluate the application of the airborne electromagnetic data for groundwater prospection in crystalline rocks.

For the evaluation of the airborne electromagnetic information, in this research was used geological and hydrogeological data, vectorial products of satellite images and aerial photography (lineaments and drainage) and the subsurface apparent conductivity data acquired using the electromagnetic ground equipment EM34-3XL. Another goal was the application of a prospect methodology to define a propitious site to the storage and exploitation of groundwater. This methodology involved the analysis of satellite images, aerial photography and geologic information that lead to the definition of two small areas inserted in total area and, where, geophysical electrical (electrical profiling) and electromagnetic methods (EM34-3XL) of detail were applied.

The most important conclusion of this research was that the airborne electromagnetic data are not trustworthy for their main objective. Also, through out the adopted prospect methodology, that is less expensive than the airborne geophysical technique, a favorable place to the groundwater exploitation was defined. The results revealed the importance of this type of methodology for prospecting groundwater in crystalline rocks.

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

A água potável é essencial à sobrevivência do ser humano, pois além do consumo doméstico (preparação de alimentos, asseio pessoal e ingestão diária) este bem mineral é ainda utilizado pelo homem em práticas agrícolas e no setor industrial, ressaltando assim sua importância na economia de uma região.

Resultados de pesquisas estatísticas e projeções futuras relacionadas aos recursos hídricos mundiais são realmente surpreendentes e preocupantes. Segundo publicações no boletim informativo nº 149 da ABAS (Associação Brasileira de Água Subterrânea), 97,6% da água disponível no planeta Terra está concentrada nos oceanos, do restante (2,19%) encontra-se na forma de geleiras localizadas nos pólos e apenas 0,31% está disponível para o consumo dos seres vivos. A Organização das Nações Unidas (ONU) prevê que no ano de 2050 mais de 45% da população mundial não poderá contar com a porção mínima de água para as necessidades básicas individuais. Outra informação interessante é que no Brasil, 3% da água doce existente são superficiais e os 97% restantes são subterrâneas.

Apesar do predomínio das águas subterrâneas em território brasileiro, a maioria dos programas políticos nacionais estão voltados para os reservatórios hídricos superficiais. Entretanto, estes reservatórios, que são importantes para a sociedade, estão mais sujeitos a ações naturais e antrópicas prejudiciais do que os subterrâneos; dentre estas ações podemos destacar a grande vulnerabilidade em relação aos agentes contaminantes e a elevada taxa de evaporação em relação à precipitação em algumas regiões.

No nordeste brasileiro, a exploração de água subterrânea vem se tornando uma alternativa eficaz para o combate a seca, porém, é necessário um maior interesse e participação por parte dos governos Federal, Estadual e Municipal, pois a população inserida no polígono da seca sofre quase que anualmente, vendo suas atividades agropecuárias não se desenvolverem e ter que depender de donativos ou se deslocar para as capitais à procura de sobrevivência; mendigar, morar em locais inapropriados, não propiciar saúde e educação aos filhos (alguns ingressam na marginalidade) e conviver diariamente com problemas sociais diversos.

Prospectar água subterrânea é uma tarefa difícil e o seu êxito depende, sobretudo, de um trabalho interdisciplinar e criterioso envolvendo principalmente a geologia básica, a hidrogeologia, a geofísica de prospecção, o sensoriamento remoto, a fotogeologia e o

geoprocessamento. No Estado do Ceará, onde se localiza a área referente a esta pesquisa, a prospecção hídrica tem como agravante os tipos litológicos constituintes, pois cerca de 70% do estado é caracterizado por rochas cristalinas, que tem como natureza o baixo potencial hidrogeológico, tendo em vista que neste contexto geológico a água só pode ser armazenada ao longo de discontinuidades propícias. A estes aspectos somam-se as atividades de pesquisas mal conduzidas e tecnicamente fracas, comprometendo ainda mais as atividades profissionais desta importante área de pesquisa.

Com intuito prospectivo, no período entre 2000 e 2004 esteve em operação em quatro áreas piloto, localizadas em três estados do semi-árido (Ceará, Pernambuco e Rio Grande do Norte) o PROASNE – Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil. Este projeto, financiado pela *Canadian International Development Agency (CIDA)* e gerenciado pelo Serviço Geológico do Canadá (GSC) e pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), teve como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos destas regiões. Dentre as atividades desenvolvidas pelo PROASNE, destacamos o levantamento aerogeofísico (magnético e eletromagnético – EM e VLF) realizado pela empresa LASA Engenharia e Prospecção S.A., com o intuito de mapear rapidamente zonas favoráveis ao armazenamento, fluxo, e exploração de água subterrânea.

No Estado do Ceará, o levantamento aerogeofísico foi feito numa área de aproximadamente 176 Km², localizada no município de Irauçuba, mais especificamente no distrito de Juá. Os resultados obtidos foram tratados e apresentados na forma de mapas de iso-valores para cada uma das técnicas geofísicas executadas (LASA, 2001). Dentre estes, um mapa eletromagnético aéreo (4.500 Hz) exhibe lineamentos de condutividade relativamente alta que foram interpretados, pelos profissionais integrantes do projeto, como estruturas geológicas propícias ao armazenamento de água subterrânea (zona de fraturas). Entretanto, três poços profundos foram perfurados com base nesta informação, integrada a dados geofísicos elétricos e eletromagnéticos (VLF) terrestres adquiridos na área, e resultaram em poços improdutivos (Oliveira *et. al.*, 2003).

Sensíveis aos problemas relacionados à escassez de água de uma região em vista aos resultados oriundos do PROASNE para a área do Juá, no tocante à hidrogeologia subterrânea e ao dado aerogeofísico eletromagnético, foi idealizada esta pesquisa na forma de uma Dissertação de Mestrado, que envolveu geologia, hidrogeologia, fotogeologia, produtos de sensores remotos orbitais (Landsat ETM-7) e prospecção geofísica elétrica e eletromagnética terrestre regional e de detalhe. Os dados adquiridos foram convertidos para meio digital e armazenados em plataforma SIG (Sistema de Informações Geográficas).

Esta pesquisa contemplou duas etapas principais, dependentes e consecutivas; a primeira foi voltada para a análise dos dados eletromagnéticos aéreos no tocante a sua aplicação prática para a determinação de pontos favoráveis à exploração de água subterrânea e a segunda está relacionada à aplicação de uma metodologia prospectiva para definir um local propício à captação de água subterrânea na área de pesquisa. Neste sentido, foram executados 3 perfis eletromagnéticos terrestres regionais (estações de leitura espaçadas de 40 m) com o uso de um equipamento EM34-3XL, perpendiculares às anomalias realçadas no mapa aeroeletromagnético, de modo a avaliar estes dados geofísicos. Além do mais, este mapa foi ainda comparado com dados vetoriais (rede de drenagem e lineamentos) oriundos das imagens espectrais e fotografias aéreas e com dados geológicos obtidos em campo (atitude de fraturas). Em consequência dos resultados obtidos para esta primeira fase procedeu-se a realização da segunda etapa.

Para a prospecção geofísica (segunda etapa) foram inicialmente definidas duas áreas menores dentro da área total de pesquisa, de acordo com condições geológicas favoráveis ao armazenamento hídrico subterrâneo. Em seguida foi realizado um levantamento geofísico de detalhe (estações de leitura espaçadas de 10 m) por meio de métodos elétricos e eletromagnéticos terrestres.

1.2. OBJETIVO GERAL

Avaliar os dados aeroeletromagnéticos provenientes do Projeto PROASNE no tocante a sua utilização para a prospecção hídrica subterrânea nos terrenos cristalinos do distrito de Juá (município de Irauçuba - CE) e identificar locais favoráveis à captação de água subterrânea, na mesma área, através da integração e interpretação de dados geofísicos, geológicos, hidrogeológicos e de sensores remotos.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as fotografias aéreas que recobrem a área, para extração de fotolineamentos;
- Processar e interpretar imagens do satélite Landsat ETM-7, que abrangem a região de estudo, extraindo das imagens feições de interesse para a pesquisa (rede de drenagem e lineamentos de natureza geológica);
- Reconhecer a lito-tectônica da área;

- Adquirir e tratar os dados geofísicos eletromagnéticos e elétricos terrestres, com o uso dos equipamentos EM34-3XL e Eletrorresistivímetros (PER-80 e DER-500X), respectivamente;
- Tratar os dados geofísicos aéreos (eletromagnético e pseudotopográfico) e avaliá-los com base nos dados provenientes do levantamento geofísico terrestre regional;
- Gerar um banco de dados em ambiente SIG com *software* específico;
- Determinar zonas favoráveis a exploração de água subterrânea no domínio da área de pesquisa.

1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA

A área de desenvolvimento desta pesquisa está localizada na porção noroeste do Estado do Ceará, mais especificamente no distrito de Juá, município de Irauçuba (figura 1.1), representando uma superfície de aproximadamente 176 Km², limitada pelos vértices da poligonal definida pelas coordenadas geográficas apresentadas na tabela 1.1. O acesso a partir da cidade de Fortaleza pode ser feito por meio da Rodovia Federal BR-222, por aproximadamente 160 Km, até a cidade de Irauçuba, percorrendo mais 6 Km em direção a cidade de Sobral, até uma estrada de revestimento solto, de onde se segue nesta no sentido Sul por mais 8 Km, até o início da área em apreço.

Tabela 1.1 - Coordenadas Geográficas dos vértices limítrofes da área de interesse deste estudo.

VÉRTICE	LATITUDE (S)	LONGITUDE (W)
A	3° 48' 54''	39° 54' 21''
B	3° 48' 54''	39° 47' 45''
C	3° 56' 41''	39° 47' 45''
D	3° 56' 41''	39° 54' 21''

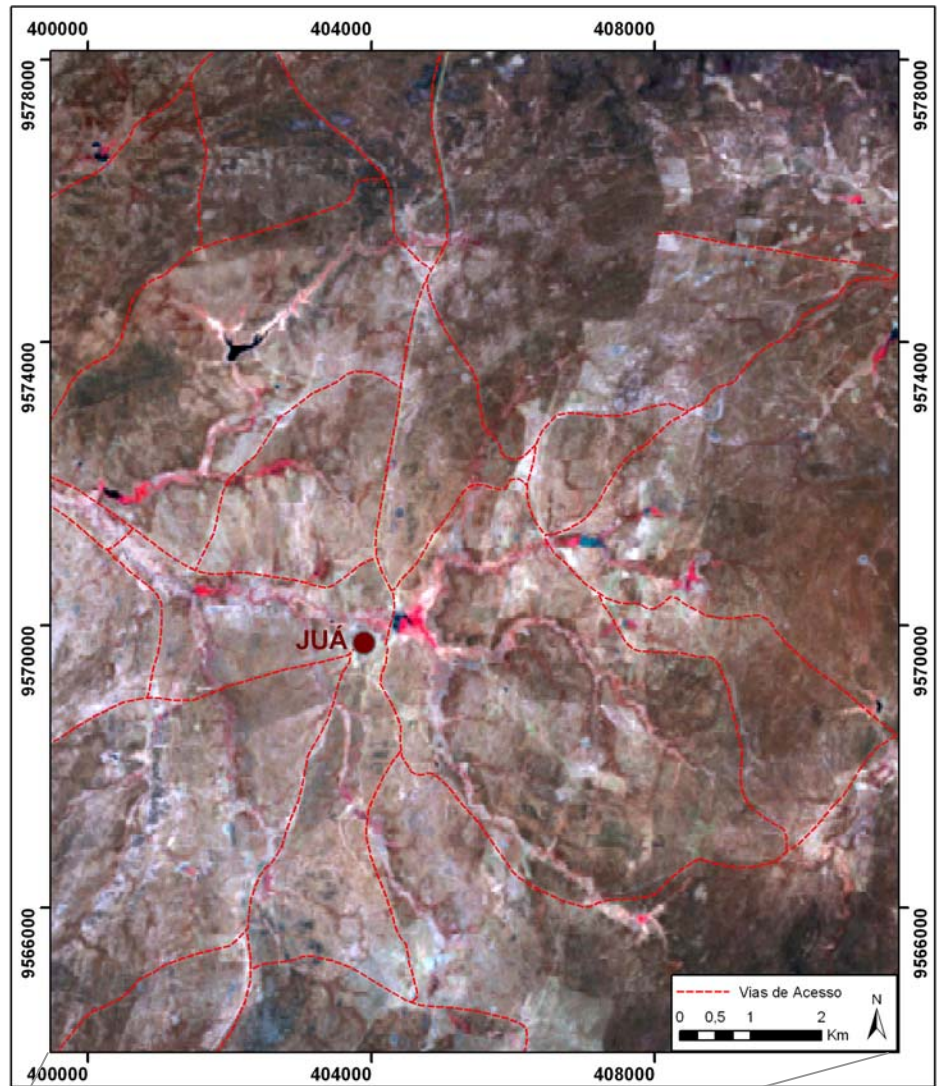


Figura 1.1 – Localização geográfica da área de estudo, com detalhe da mesma, segundo a composição colorida falsa-cor RGBI_4328.

Capítulo 2

2. METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi segmentada em três etapas principais, compreendendo uma etapa preliminar, uma de campo e uma outra de laboratório pós-campo. Estas etapas serão apresentadas neste capítulo obedecendo a uma ordem cronológica. É importante ressaltar que o trabalho foi desenvolvido de modo interdisciplinar e que os dados adquiridos foram armazenados em plataforma SIG (Sistema de Informações Geográficas) resultando assim num acervo digital de informações geológicas, geofísicas, hidrogeológicas e orbitais referentes à área pesquisada e aos objetivos propostos.

A etapa preliminar correspondeu ao curso de disciplinas, à pesquisa bibliográfica, ao tratamento e interpretação de imagens de sensoriamento remoto e dos dados aerogeofísicos (eletromagnéticos e pseudotopográfico), à interpretação de fotografias aéreas, à geração de mapas temáticos e à checagem dos instrumentos que foram utilizados em campo.

O curso de dez disciplinas curriculares (totalizando 32 créditos) dentre as oferecidas pelo Mestrado em Geofísica Aplicada à Hidrogeologia do Departamento de Geologia da UFC, foi de suma importância para o conhecimento da fundamentação teórica relacionada à pesquisa aqui proposta. Estas disciplinas corresponderam tanto a aulas teóricas quanto a aulas práticas relacionadas à hidrogeologia de um modo geral, principalmente no que se refere à prospecção geofísica, a contaminação e ao comportamento hídrico em aquíferos, além de práticas com *softwares* de tratamento de dados hidrogeológicos (Aquifertest, Modflow e Qualigraf) e de geração de banco de dados digitais e georreferenciados (ArcView).

O suporte conceitual à metodologia utilizada baseou-se, além dos conhecimentos adquiridos durante o curso das disciplinas, em publicações de cunho científico, ou seja, artigos publicados em periódicos científicos, Relatórios de Graduação, Dissertações de Mestrado, Teses de Doutorado e livros específicos foram pesquisados com este propósito. Temas diversos foram analisados (com enfoque principal à prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos) compreendendo: a fisiografia e a geologia da área de estudo, a hidrogeologia de aquíferos fissurais, ao processamento e interpretação de imagens de sensoriamento remoto, ao princípio de operação e aplicação de métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos, envolvendo ainda o tratamento e interpretação dos dados referentes, além de outros temas afins. Informações técnicas e hidrogeológicas referentes aos poços profundos existentes na área pesquisada foram concedidas pela CPRM e constituíram em uma importante fonte de informação para o direcionamento dos trabalhos de campo, uma vez que o

levantamento geofísico terrestre foi realizado nas proximidades de poços profundos produtivos e improdutivos objetivando a análise da resposta geofísica em diferentes situações.

Imagens de sensoriamento remoto correspondem a uma informação valiosa para a prospecção hidrogeológica em terrenos cristalinos. Por este motivo, produtos orbitais oriundos do satélite LandSat ETM-7 foram processados e interpretados nesta pesquisa com a utilização do *software* ER Mapper 5.5. A imagem utilizada corresponde à cena 217_063 e o processamento desta, correspondeu basicamente à composição colorida RGB entre bandas espectrais, o ajuste de contraste, à razão entre bandas e à aplicação de filtros de alta frequência. Assim, foi possível realçar e extrair na forma de vetores a configuração da rede de drenagem e os lineamentos estruturais da área, informações utilizadas na análise dos dados aeromagnetométrico (4.500 Hz) e na definição de um local propício para a prospecção de água subterrânea. Outro produto gerado foi o Modelo Digital do Terreno (MDT) da área, que contribuiu, substancialmente, na interpretação dos dados em conjunto e, por conseguinte, no desenvolvimento da pesquisa.

Ainda com o propósito prospectivo foram interpretadas fotografias aéreas que abrangem a área, tendo em vista que a escala destas é maior que a das imagens espectrais, favorecendo a extração de fotolineamentos diversos, os quais, em conjunto com os lineamentos provenientes das imagens espectrais, foram utilizados na seleção de duas áreas para a realização dos levantamentos geofísicos prospectivos.

Os dados aerogeofísicos oriundos do levantamento eletromagnético e pseudotopográfico foram adquiridos pela empresa LASA Engenharia e Prospecção S.A., com financiamento do projeto PROASNE e cedidos gentilmente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) residência de Fortaleza, para o desenvolvimento desta pesquisa. Estes dados foram aqui tratados através da exclusão de valores esdrúxulos, da conversão de coordenadas geográficas para coordenadas UTM (através de um aplicativo do *software* RockWare), da interpolação com a utilização do *software* Surfer e da sua representação na forma de mapas de iso-valores. Outras informações foram adquiridas durante o levantamento aerogeofísico, porém, por fugirem ao escopo desta pesquisa, não foram utilizadas. Processamentos mais específicos dos dados aerogeofísicos não foram implementados. No entanto, isso pode constituir um trabalho futuro, uma vez que o Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPRS/UFC) adquiriu muito recentemente o pacote do *software* Oasis Montaj, mais adequado para o processamento. Objetivando simplificar a apresentação e discussão dos resultados aeromagnetométricos e eletromagnéticos terrestre, adotou-se o termo anômalo para fazer referência às zonas de condutividade proporcionalmente elevada.

Ainda nesta etapa foram gerados mapas temáticos digitais e georreferenciados para a utilização em campo e apresentação no relatório final. A base cartográfica correspondeu à folha SA.24-Y-D-V (Irauçuba) desenvolvida pela Sudene/DSG em escala 1:100.000, sendo que a vetorização deste mapa para o referente trabalho foi realizada com a utilização do *software* AutoCad Map 2000. Informações recentes, referentes à drenagem e estradas extraídas das imagens espectrais, foram adicionadas aos mapas temáticos digitais aqui gerados.

A etapa de campo foi realizada em várias viagens a área, compreendendo principalmente o reconhecimento lito-estrutural e os levantamentos geofísicos terrestres regional e de detalhe.

Devido à existência de um trabalho envolvendo mapeamento geológico da região de Irauçuba na escala de 1:100.000 (Souza Filho, 1999), que serviu de base para o presente trabalho, o reconhecimento geológico foi feito de um modo regional apenas em afloramentos mais proeminentes e nas proximidades dos perfis geofísicos terrestres. Neste, foi feita uma descrição litológica de 57 afloramentos para checagem do mapa geológico base e a obtenção de atitudes das foliações e das estruturas rúpteis pertinentes aos litotipos. Os pontos analisados tiveram seu posicionamento geográfico adquirido (coordenadas UTM) com o uso de um GPS (Sistema de Posicionamento Global) e o registro fotográfico das feições geológicas e estruturas mais marcantes.

O Levantamento geofísico terrestre foi realizado com dois objetivos específicos, sendo o primeiro para correlacionar com os dados eletromagnéticos aéreos (4.500 Hz) e avaliar sua potencialidade na prospecção de água subterrânea em meios fissurais e o segundo, para definir um local favorável à captação de água subterrânea na área de pesquisa. Na primeira situação, foram utilizadas, para o posicionamento e orientação dos perfis geofísicos terrestres, as informações oriundas do mapa aeroeletromagnético. Já para o outro caso, foram utilizadas em conjunto o resultados das imagens de satélite e fotografias aéreas (lineamentos), do cadastro de poços (posicionamento e vazão) e dos dados de campo (fraturas e foliações). As técnicas geofísicas empregadas foram a eletromagnética e a elétrica.

Para a técnica eletromagnética, foi utilizado o equipamento EM34-3XL fabricado pela *Geonics Limited*, que mede a condutividade aparente da subsuperfície do terreno até uma profundidade de 60 m (profundidade teórica de investigação). A técnica elétrica correspondeu à eletrorresistividade por meio de caminhamento elétrico com o arranjo Dipolo-Dipolo. Os equipamentos utilizados foram dois eletrorresistímetro (PER-80 e DER-500X) fabricados pela DPM Engenharia.

Informações mais específicas e completas acerca dos levantamentos realizados em campo, envolvendo tanto a geologia quanto a geofísica, são apresentadas posteriormente nos capítulos referentes.

A etapa de laboratório pós-campo correspondeu ao tratamento e interpretação dos dados geofísicos e geológicos obtidos em campo, integrados aos extraídos das imagens de satélite e fotografias aéreas e aos mapas geofísicos aeroeletromagnéticos (900 e 4.500 Hz). Para tanto, inicialmente foi feita a conversão dos mesmos para meio digital e, em seguida, foram implementados processamentos adequados de acordo com a natureza das informações adquiridas. Em paralelo, foi realizada a confecção do relatório final referente a esta pesquisa, de modo a contribuir para a realização de futuros trabalhos científicos de aspectos regionais e/ou locais, bem como servir de subsídio para trabalhos de prospecção hidrogeológica em regiões caracterizadas por terrenos cristalinos.

Os dados eletromagnéticos foram interpolados com a utilização do *software* Surfer 8 e interpretados na forma de pseudo-seções, portanto, as profundidades apresentadas correspondem a profundidades teóricas e não reais. Desta forma, a interpretação destas foi de forma qualitativa, tendo em vista que estes dados não passaram por processos de modelagem ou de inversão. Já os dados de eletrorresistividade (ER) foram invertidos através do *software* RES2DINV, permitindo a geração de seções geoeletricas e interpretação quantitativa destas. Quanto às informações de natureza geológica, foi gerado um diagrama de rosetas das discontinuidades medidas em campo e, comparado com o *trend* regional oriundo dos vetores extraídos das imagens orbitais.

A integração de todos os dados trabalhados nesta pesquisa foi realizada no *software* ARCMAP 8, compondo assim um SIG. O capítulo 7 desta dissertação apresenta os dados que compõem este SIG, bem com as discussões necessárias e importantes dos dados em conjunto, ou seja, integrados.

Capítulo 3

3. ASPECTOS GERAIS

Fatores exógenos e endógenos influenciam no processo de infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea, contribuindo tanto na quantidade quanto na qualidade deste bem mineral (Costa e Braz da Silva, 1997). Os fatores exógenos correspondem aos agentes que atuam na superfície da Terra, dentre eles o clima, o relevo, a cobertura pedológica, a hidrografia e a vegetação, mencionados genericamente por aspectos fisiográficos. Já os fatores endógenos correspondem aos agentes que atuaram e ainda atuam no interior do globo terrestre e que são responsáveis pela composição mineralógica dos litotipos, bem como pelos elementos estruturais pertinentes a estes.

Com base nessas afirmativas, são descritos, neste capítulo, os aspectos fisiográficos e geológicos característicos da região de Irauçuba, dando enfoque, quando possível, na importância destes fatores à hidrogeologia do meio cristalino.

3.1. ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

3.1.1. CLIMA

O clima é um fator muito importante tanto para a qualidade quanto para a quantidade das águas subterrâneas. Grandes precipitações influenciam positivamente nas vazões de aquíferos, por fornecer água em abundância para infiltração, além de gerar solos espessos que acabam funcionando como um aquífero poroso ou como uma zona de recarga para as fraturas. Entretanto, em regiões de clima semi-árido, como é o caso do nordeste brasileiro, a baixa pluviosidade e a elevada taxa de evaporação, propicia a concentração de sais nas discontinuidades, resultando em elevados índices de salinidade das águas subterrâneas (Costa e Braz da Silva, 1997).

De acordo com o IPLANCE (1997), a região em estudo apresenta um clima do tipo semi-árido, no qual o regime térmico caracteriza-se por temperaturas elevadas e baixas amplitudes térmicas anuais ($< 5^{\circ}\text{C}$) sendo a média das temperaturas máximas de 32°C e das temperaturas mínimas de 21°C . Na Serra de Uruburetama, o clima se encontra sob influência direta da altitude, apresentando assim, a média das temperaturas mais baixas da região, em torno de 22° e 26°C .

Dados pluviométricos mostram que as precipitações na região são irregulares e escassas, devido principalmente sua localização geográfica ser a sotavento da Serra de Uruburetama. O período chuvoso ocorre no verão, entre dezembro e março, e a pluviometria média normal para o município de Irauçuba é de aproximadamente 539,5 mm/ano. De acordo com os dados pluviométricos fornecidos pela FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), somente nos três primeiros meses do ano de 2004, choveu aproximadamente 634,4 mm, superando o período chuvoso dos últimos dez anos, excetuando o ano de 1994 (figura 3.1). Desta forma, houve uma grande contribuição volumétrica de água tanto para os reservatórios superficiais quanto para os aquíferos da região de Irauçuba no ano de 2004.

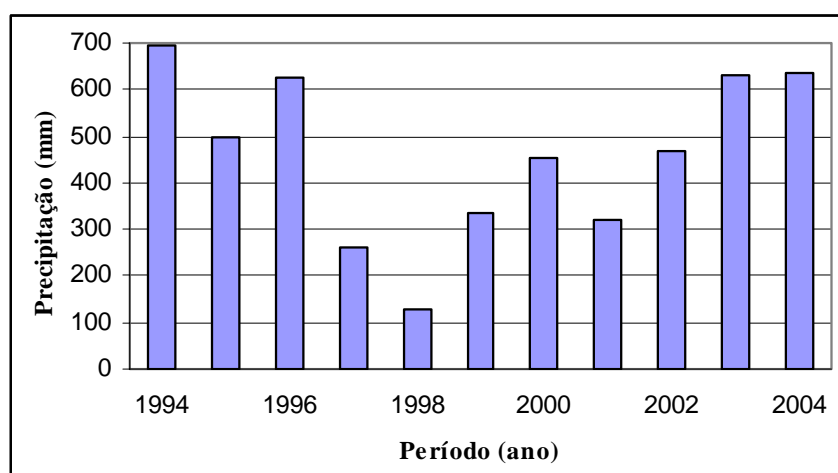


Figura 3.1 – Gráfico comparativo das precipitações anuais dos últimos dez anos. Para o ano de 2004 foram obtidas informações apenas dos quatro primeiros meses.

Dias (1998) identificou vários fatores, relacionados a atividades agrícolas, que confirmam o atual processo de desertificação do município de Irauçuba, frisando o descaso do governo com a região em relação à degradação ambiental da mesma. Dentre estes fatores podemos destacar: a destruição da floresta nativa para a formação de pastos, a destruição seguinte destes pastos expondo o solo ao pisoteio e comprometendo-o a resiliência e a prática da agricultura de subsistência e das queimadas, todos realizados de modo descontrolado.

3.1.2. GEOMORFOLOGIA

Segundo Costa e Braz da Silva (1997), o relevo exerce grande influência na quantidade de água num aquífero fissural. Com base em dados estatísticos mencionados por estes autores, a pior situação morfológica para a locação de um poço é no topo de uma elevação seguido dos flancos ou vertentes, já a melhor situação corresponde às depressões. Quanto à influência para a qualidade da água, Costa e Braz da Silva (1997) relatam que a prática tem demonstrado no semi-árido do Nordeste brasileiro, que os poços localizados nos vales dos rios principais tendem a possuir maior salinidade do que nos rios distributários, devido a tendência de captar água salinizada de alguma região com grande quantidade de sais solúveis. Por outro lado, poços localizados nas vertentes e nas porções menos elevadas apresentam em geral salinidade mais reduzida, ao contrário dos poços localizados nos topos das elevações, onde a salinidade aumenta. Estes fatos devem-se possivelmente aos problemas de dinâmica de fluxo e, conseqüentemente, à renovação dessas águas.

De acordo com o Atlas do Ceará (IPLANCE - 1997), a região de Irauçuba é constituída por duas unidades geomorfológicas principais e distintas: os Maciços Residuais e as Depressões Sertanejas. Os Maciços Residuais predominam na região, sendo caracterizados principalmente pela Serra de Uruburetama, Serra do Missi e pela Serra Manoel Dias, possuindo altitude máxima de aproximadamente 1.080 m. As características mais marcantes desta unidade geomorfológica são: dissecação em forma de topos agudos, pequenas manchas dissecadas em forma convexa, litotipos cristalinos e drenagem densa de padrão dendrítico. A Depressão Sertaneja se evidencia através de vastas rampas pedimentadas, que partem da base dos maciços residuais, com caimento no sentido dos fundos de vales. As características principais desta unidade geomorfológica são: topografia plana, densidade de drenagem fraca, grande variação litológica e pequena espessura do manto de alteração das rochas.

A área pesquisada está inserida na unidade geomorfológica denominada Depressão Sertaneja (figura 3.2), sendo caracterizada por um relevo relativamente plano com alguns serrotes dispersos e vales de origem fluvial conforme representado no MDT representativo da área (figura 5.5).

3.1.3. VEGETAÇÃO

A influência da vegetação é pequena tanto para a qualidade quanto para a quantidade da água subterrânea. Segundo Costa e Braz da Silva (1997), a atuação da vegetação para propiciar o armazenamento de água em aquíferos se dá de forma indireta, pois à medida que dificulta o escoamento superficial, propicia condições de maior infiltração. Além disso, quanto maior a cobertura vegetal maior é a evapotranspiração e, conseqüentemente, maiores serão as precipitações que irão propiciar melhores condições de recarga aos aquíferos. Para tanto, se faz necessária à existência de uma vegetação abundante, o que não ocorre nas regiões do semi-árido.

A vegetação característica da região de Irauçuba é do tipo Estepe (Projeto RADAMBRASIL, 1981). Compreende as formações xerófitas lenhosas, em geral espinhosas, entremeadas de plantas suculentas, com tapete herbáceo estacional. Tem como características dominantes às folhas pequenas, muitas vezes providas de espinhos e umas poucas plantas com órgãos de reserva subterrâneo. A composição florística é heterogênea, mas apresenta um certo número de dominantes arbóreos típicos, entre os quais: *Astronium urundeuva* (aroeira), *Schinopsis brasiliensis* (braúna) e várias espécies do gênero *Aspidosperma*, *Caesalpineia*, *Mimosa* e *Piptadenia*. Das suculentas, destacam-se as cactáceas colunares dos gêneros *Cereus* e *Pilosocereus*.

Na área pesquisada a composição florística é dominada por: *Auxemma onocalyx* Taub. (pau-branco), *Mimosa* (jurema-preta, jurema-branca e sabiá), *Copernicia cerifera* (carnaúba), *Zizyphus joazeiro* (juazeiro) e Algaroba, além de gramíneas e de culturas antrópicas (figura 3.2).



Vista geral da porção norte da área, exibindo duas unidades geomorfológicas: Depressão Sertaneja, predominante na área pesquisada e os Maciços Residuais ao fundo, caracterizado pela Serra de Uruburetama.

Porção centro-sul da área pesquisada, caracterizada por um relevo relativamente plano. Fotografia adquirida da barragem do açude São Gabriel, estando o Distrito de Juá, no extremo sul deste açude.



Vegetação tipo caatinga, característica desta região. Esta fotografia foi adquirida no mês de julho, pouco tempo após ao período chuvoso, por este motivo observa-se a presença de folhas verdes.

Fotografia adquirida poucos meses antes do período chuvoso, motivo pelo qual observa-se os arbustos secos, sem folhas.



Figura 3.2 – Fotografias exibindo o relevo e vegetação, característicos da área pesquisada.

3.1.4. RECURSOS HÍDRICOS

O riacho-fenda, termo definido por Siqueira 1963 (*in* Costa e Braz da Silva, 1997) como a situação onde ocorre a coincidência da drenagem superficial com zonas fraturadas, proporciona uma melhor condição de infiltração e armazenamento de água nos aquíferos fissurais. Por conseguinte, a qualidade da água subterrânea dependerá da qualidade da água superficial.

A região de Irauçuba está inserida na Bacia Hidrográfica do rio Curu (Projeto RADAMBRASIL, 1981) que ocupa uma área de aproximadamente 3.323 Km² e apresenta uma drenagem predominantemente dendrítica e subparalela. O rio Curu tem uma direção aproximada N-S e o arranjo espacial de seu curso está intimamente relacionado à geologia e aos processos estruturais. Esta bacia hidrográfica contribui com o volume médio de 211.500 m³/Km²/ano de água, disponível ao escoamento superficial e à recarga dos aquíferos subterrâneos.

O rio Juá representa a drenagem mais importante presente na área estudada, possuindo um caráter intermitente e direção aproximada NW-SE. De menor importância, tem-se os riachos: Urubu, Brito, Armador, Livramento, Ipueira Comprida, Favela e outros. Como área de captação d'água superficial existem os açudes São Gabriel, Cairu e outros menores, além de poços profundos para a captação de água subterrânea (figura 3.3).

3.1.4.1. Recursos Hídricos Subterrâneos da Área

Como já mencionado, a área de pesquisa é caracterizada por litotipos de natureza cristalina, portanto, nesta situação a água subterrânea só pode se concentrar ao longo de descontinuidades abertas pertinentes a estes litotipos, formando assim os aquíferos fissurais. A exploração de um aquífero fissural se dá por meio de poços profundos que interconectam as descontinuidades propícias, permitindo assim a captação da água subterrânea.

De acordo com dados fornecidos pela CPRM, a área pesquisada possui 20 poços profundos, sendo que mais três foram cadastrados nesta pesquisa (P.01, 02 e 03), totalizando assim 23 poços (figura 3.2, tabela 3.1). Destes, apenas seis são privados (P.01, 02, 45, 46, 51 e 72) e o restante é de utilização pública. Atualmente, apenas sete poços profundos estão sendo utilizados (P.03, 45, 50, 51, 66, 67, 72 e 74) do restante, alguns se encontram desativados, outros abandonados e três não foram instalados (P.221, 222 e 223). A profundidade média atingida pelos poços profundos é de aproximadamente 60 m. Já em relação à produtividade

destes, a vazão média é da ordem de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, ressaltando a inexistência desta informação para nove poços profundos. Três poços localizados próximos ao distrito de Juá (P.65, 66 e 67) possuem a melhor vazão da área de pesquisa, em torno de $6 \text{ m}^3/\text{h}$ cada, porém, estão posicionados na calha do rio Juá e a entrada d'água ocorre numa profundidade de aproximadamente 8 m (compatível com a espessura do aluvião).

A inexistência de dados hidroquímicos na planilha fornecida pela CPRM impossibilitou uma análise qualitativa das águas oriundas dos poços em apreço e, por fugir ao escopo desta pesquisa, não foram realizados levantamentos desta natureza.

Os poços profundos 221, 222 e 223 foram locados e perfurados no ano de 2003 como uma etapa do projeto PROASNE, tendo como base as zonas de condutividade anômalas de direção aproximada N-S, exibidas no mapa aeroeletromagnético da figura 6.8. Desta forma, algumas informações referentes e sucintas serão aqui tratadas.

O levantamento geofísico terrestre para a locação dos poços 221 e 222, foi realizado com base no método geofísico de eletrorresistividade, sendo utilizados os arranjos Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger (Oliveira *et. al.*, 2003). Já para a locação do poço 223 foi utilizado apenas o arranjo Dipolo-Dipolo, além do método eletromagnético (VLF) (Cordeiro *et.al.*, 2004). A direção das seções foi transversal aos eixos anômalos norte-sul conforme os evidenciados pelos dados aeroeletromagnéticos.

Dados técnicos referentes à perfuração dos poços em apreço estão apresentados na tabela 3.2. Os poços 221 e 223 foram considerados como improdutivos, já o poço 222 apresentou uma vazão de $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$, porém, segundo Ubaldo de Sá (2003) esta capacidade pode ser bem inferior. O posicionamento das fraturas em subsuperfície não foi determinado por meio de perfilagem geofísica, correspondendo portanto, a observações do sondador responsável pelas perfurações.

Tabela 3.1 – Cadastro dos poços profundos localizados na área de pesquisa, com destaque para a vazão de cada.

Referência do Poço	Localidade	Coordenada X	Coordenada Y	Vazão (m³/h)
01	Faz. Urubu	400.823	9.568.694	-
02	Faz. Urubu	401.308	9.569.267	-
03	Riacho do Meio	406.318	9.571.170	3.00
45	São Pedro	407.098	9.566.096	-
46	Santa Luiza	406.191	9.564.363	-
47	Santa Luiza	406.181	9.564.651	-
48	Santa Luiza	406.292	9.564.704	-
50	Caibro	402.279	9.566.800	1.10
51	Caibro	401.980	9.567.836	4.50
53	Cairo	402.415	9.572.975	1.20
54	Brito	404.626	9.575.022	0.70
65	Juá	403.992	9.570.014	6.00
66	Juá	404.103	9.569.989	6.00
67	Juá	404.281	9.570.005	6.00
72	Juá	407.543	9.570.890	0.70
74	Mandacaru	409.294	9.575.356	-
105	Juá	403.582	9.569.714	-
106	Juá	403.986	9.569.965	-
195	Mandacaru	408.927	9.576.417	0.10
196	Juá de Cima	407.004	9.568.256	0.38
221	Mandacaru	409.298	9.575.381	0.00
222	Faz. Situação	403.104	9.567.834	1.25
223	Faz. Cidade	402.491	9.566.603	0.00

Tabela 3.2 – Relação profundidade de fraturas e vazão para os poços 221, 222 e 223.

Poço Profundo	Profundidade de Ocorrência de Fraturas (m)	Vazão (L/h)	Condutividade elétrica (µS/cm)
221	4,5	300	5.730
	7	0	-
	11	0	-
	13	0	-
	20	0	-
	27 a 28	0	-
	33	0	-
	41	0	-
	53 a 60	30	2.600
222	19	50	6.000
	23 a 25	0	-
	43	0	-
	60	0	-
	63 a 63,5	1200	3.500
223	4,5	2000	10.240
	14	0	-
	19	0	-
	27 a 29	50	-
	46 a 48	0	10.500

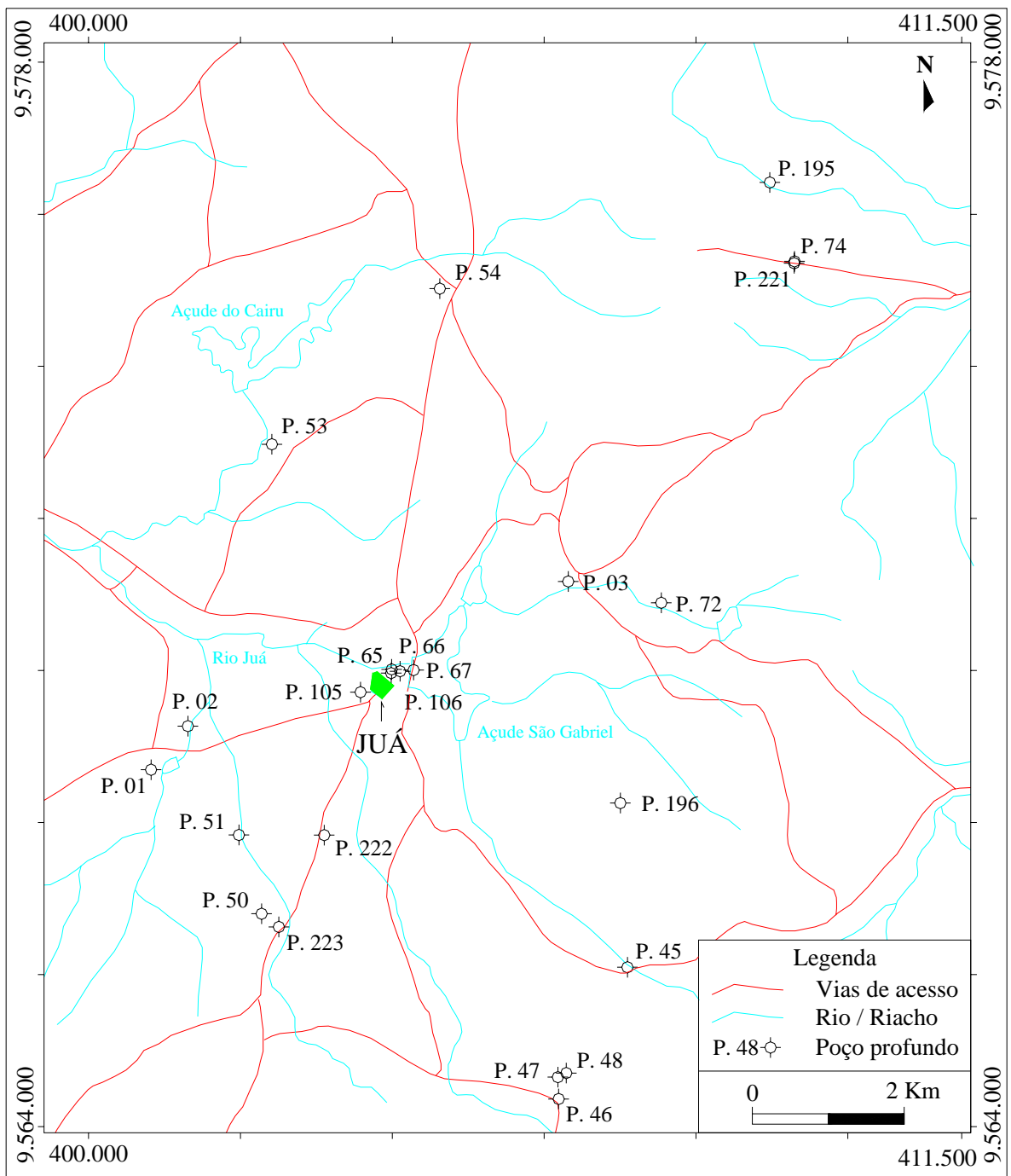


Figura 3.3 – Mapa de posicionamento dos poços profundos existentes na área.

3.1.5. PEDOLOGIA

Os solos exercem importante papel na quantidade de água infiltrada, para tanto é necessário que estes se apresentem espessos e porosos. Nas regiões do semi-árido, onde está inserida a área de estudo, os tipos pedológicos são geralmente pouco espessos, principalmente quando o substrato rochoso é de natureza ígnea ou metamórfica, o que acarreta numa pequena contribuição ao volume de água subterrânea.

De acordo com o Projeto RADAMBRASIL (1981) a região concentra quatro tipos principais e distintos de solos: Podzólico vermelho-amarelo eutrófico, Bruno não-cálcico, Planossolo solódico e solos Litólicos eutróficos.

Os Podzólicos são solos minerais, não hidromórficos, apresentando horizonte A com textura areia a argilo-arenosa, granular e moderado a fracamente desenvolvido, o horizonte B é textural com estrutura geralmente pequena em blocos subangulares. Este solo é muito utilizado na pecuária extensiva e no cultivo de milho, mandioca, algodão e café.

Os solos Bruno não-cálcicos variam de ácidos a praticamente neutros, são rasos a medianamente profundos, com seqüência de horizonte A, B e C. São muito utilizados para o cultivo de algodão e na pecuária extensiva.

Os Planossolos Solódicos possuem seqüência de horizontes A, B e C, apresentam baixa permeabilidade, são medianamente profundos a rasos, muito susceptíveis a erosão e apresentam mudança textural abrupta. Estes solos são utilizados como pastagem natural para pecuária extensiva e ocasionalmente para plantio de algodão.

Os solos Litólicos Eutróficos são pouco desenvolvidos, rasos a muito rasos, possuindo um horizonte A diretamente assentado sobre a rocha. Normalmente são bem a fortemente drenados e apresentam pedregosidade e rochosidade na superfície. A utilização agrícola destes solos é muito prejudicada, decorrente das limitações impostas por deficiência de água, pedregosidade, pouca profundidade e elevada susceptibilidade à erosão.

Através das características de cada tipo pedológico citado acima, observa-se que os mesmos não contribuem significativamente na quantidade de água que infiltra para os aquíferos da região, tendo em vista que são em geral pouco espessos, além de apresentarem textura argilosa e por conseguinte baixa permeabilidade.

3.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS

3.2.1. COMENTÁRIOS INICIAS

Para uma melhor compreensão a respeito dos aspectos geológicos da área de interesse desta pesquisa, este item será apresentado de duas maneiras. Inicialmente será ressaltada, de um modo geral, a evolução dos conhecimentos geológicos partindo-se de toda uma unidade geotectônica até a região correspondente ao município de Irauçuba. Em seguida, uma abordagem de maior detalhe e com base sobretudo no trabalho desenvolvido por Souza Filho (1998), será feita para a área de estudo, ressaltando os principais litotipos, a relação geológica entre eles e a geologia estrutural.

Com relação à influência de litotipos na capacidade dos aquíferos fissurais, Costa e Braz da Silva (1997) relatam, com base em dados estatísticos, que os micaxistos são as rochas que proporcionam as melhores vazões, seguidos dos gnaisses, migmatitos e granitos em ordem decrescente. Isto se deve ao fato de que a intensidade de fraturamento é maior nas rochas de orientação planar. Entretanto, em relação à qualidade, os micaxistos apresentaram um grau elevado de salinização, seguido dos migmatitos, granitos e gnaisses.

3.2.2. GEOLOGIA REGIONAL

A Província Borborema, formada no Ciclo Orogênico Brasileiro como resultado da convergência dos Crátons Amazônico, São Luiz – Oeste Africano e São Francisco, corresponde a um complexo mosaico de cinturões dobrados Neoproterozóicos e um embasamento cristalino que exhibe litotipos da colagem Paleoproterozóica/Transamazônica (Brito Neves *et. al.*, 1999). Estes autores definem ainda quatro domínios geológico/tectônicos principais para esta unidade geotectônica: Domínio Médio Coreauá, Domínio Setentrional (Ceará Central), Domínio Transversal e Domínio Sul (figura 3.4).

Segundo Arthaud *et. al.* (1998), o Domínio Ceará Central (DCC), limitado a noroeste pelo Lineamento Sobral-PedroII e a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu, é petrograficamente constituído por um embasamento Transamazônico gnáissico-migmatítico, por seqüências meta-sedimentares subordinadas compostas por quartzitos, pelitos, carbonatos e meta-vulcânicas ricas em potássio datadas de 780 Ma (Fetter *et. al.*, 1997), além do núcleo Arqueano com idade U-Pb de 2,78 Ga, denominado de Maciço Tróia-Tauá. Este maciço é caracterizado por um *Greenstone Belt* com meta-basaltos de composição toleítica e

komatiítica e uma seqüência vulcano-sedimentar caracterizada por meta-vulcânicas, meta-cherts, quartzitos, margas e outras. Segundo estes autores, o DCC foi submetido a uma tectônica tangencial ocorrida durante o Ciclo Brasileiro, a qual foi responsável pela formação de *nappes* que envolveu o embasamento gnáissico policíclico e a seqüência Neoproterozóica.

A área de estudo localiza-se na porção noroeste do Domínio Ceará Central. De acordo com Braga *et. al.*, 1977 (*In* Castro, 1982), esta área é constituída por três unidades geológicas Pré-cambrianas distintas e rochas plutônicas. Estas unidades geológicas foram definidas como: Complexo Caicó, caracterizado por gnaisses dominantes e migmatitos, além de quartzitos, calcários cristalinos e anfibolitos subordinados; Complexo Tamboril-Santa Quitéria, composto por gnaisses migmatizados e migmatitos e o Grupo Ceará, constituído por rochas para-metamórficas do fácies anfibolito ao fácies xisto-verde (quartzitos, gnaisses, xistos e filitos com níveis de rochas carbonáticas).

Castro (1982), através de um mapeamento geológico na escala de 1:25.000 realizado numa área de 100Km² localizada a Sul da localidade de Irauçuba, não identificou nenhuma discordância geológica entre os Complexos Tamboril-Santa Quitéria e Caicó, concluindo que as relações originais entre estas unidades foram mascaradas pelo metamorfismo e migmatização atuantes. Desta forma, o referido autor utilizou a divisão proposta por Crandall 1910 (*In* Castro, 1982) que corresponde ao Complexo Fundamental e Série Ceará. Vale ressaltar que a região mapeada por Castro (1982) abrange a porção centro-leste da área referente a esta pesquisa.

Como resultado do seu mapeamento geológico, Castro (1982) definiu para o Complexo Fundamental uma seqüência basal constituída por migmatitos, sotoposta por gnaisses diversos (biotita-gnaiss, muscovita-biotita-gnaiss, granada-biotita-gnaiss e anfibólio-gnaiss) com mármore e quartzitos intercalados. Referente a Série Ceará, foram definidos filitos-quartzosos de textura cataclástica submetidos ao fácies metamórfico xisto-verde. Ademais foram mapeados diques ácidos Eocambrianos, diques básicos de idade Jurássica e sedimentos aluvionares Quaternários.

Souza Filho (1998) identificou sete unidades geológicas na região referente à Folha SA.24-Y-D-V (Irauçuba) utilizando uma nomenclatura própria para diferenciá-las. Estas unidades são caracterizadas, da base para o topo, pelo Terreno Ortognáissico-Migmatítico (**P_{1ogn}**), submetido ao fácies metamórfico anfibolito alto e correlacionável ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria; pelos Terrenos Supracrutais de médio a alto grau metamórfico (biotita-gnaiss, quartzitos, mármore, calciossilicáticas, xistos e anfibolitos) representado pelas subunidades **U_B**, **U_M**, **U_S**, **U_{NW}** e **P_{smig}** (subunidade migmatítica); unidade Granitóides

Sin a Tarditectônicos (**P_{sgrd}**, **P_{sgrdgn}** e **P_{sgrdt}**) e granitos anatóticos (**P_{sgra}**); unidade Granitóides Pós-Tectônicos (**P_{sgr}**); Diques Ácidos (**da**); Diques Básicos (**J_{db}**) e Coberturas Cenozóicas (**Qal**). A unidade migmatítica (**P_{smig}**), anteriormente denominada de Complexo Tamboril-Santa Quitéria, foi diferenciada pelo mesmo autor e relacionada a seqüências paraderivadas.

Segundo Souza Filho (1998), o evento orogênico Brasileiro atuou na região através de duas fases deformacionais dúcteis (**D₁** e **D₂**) de caráter tangencial. A deformação **D₁** promoveu o cavalgamento de toda a porção centro e norte da área (embasamento) sobre os Terrenos Supracrustais localizados a sul, enquanto na porção oeste da área, o cavalgamento foi de oeste para leste. A deformação **D₂** agiu de sul para norte, foi provavelmente originada devido ao relaxamento dos esforços que resultou de **D₁** e os seus indicadores estão presentes em alguns litotipos que formam as seqüências paraderivadas.

Por meio de um mapeamento geológico numa área de 50 Km² localizada na porção oeste da Folha SA.24-Y-D-V, Pinéo (2003) correlacionou os litotipos da unidade migmatítica (**P_{smig}**) de Souza Filho (1998) ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria. Segundo aquele autor, a área mapeada é constituída predominantemente por ortognaisses finos e porfiríticos, estando os migmatitos subordinados e relacionados a intrusões de pequenos corpos graníticos de composição granodiorítica.

Fetter *et. al.*(2003) discute, por meio de dados geológicos, geocronológicos e isotópicos, a idéia de que a porção noroeste da Província Borborema se desenvolveu a partir de uma margem continental ativa e que o processo de subducção resultou na formação de uma seqüência litológica típica de *back-arc* e *fore-arc* relacionada ao desenvolvimento do Batólito Santa Quitéria.

3.2.3. GEOLOGIA LOCAL

Dentre as sete unidades litológicas propostas por Souza Filho (1998) três delas compõem a área pesquisada: os Terrenos Supracrustais, que caracterizam a unidade basal, os Granitóides Sintectônicos e Granitos Anatóticos seguidos dos Diques Ácidos (tabela 3.3, figura 3.5).

Os Terrenos Supracrustais, datados do Proterozóico Médio-Superior, são constituídos pelos litotipos pertencentes às subunidades **U_m**, **U_s** e **P_{smig}**.

A subunidade psamito-carbonática **U_m** aflora apenas na porção sudeste da área e em pequena proporção superficial. Esta subunidade é constituída litologicamente por xistos

quartzosos, biotita xistos granatíferos e variações gnáissicas (**P_sxt**). O contato geológico com a subunidade sobreposta é de natureza tectônica, sendo caracterizado por uma falha de empurrão de direção aproximada Norte-Sul.

A subunidade **U_s** (pelito-carbonática) predomina na área de pesquisa e é constituída litologicamente por biotita-gnaisses diversos (**P_sbtgn**), com lentes de mármore (**P_scc**), de quartzitos (**P_sqt**), calciossilicáticas (**P_scs**), camadas com mármore e gnaisses associados (**P_sccgn**), hornblenda-biotita gnaiss (**P_shbgn**) e gnaisses graníticos (**P_sgngr**).

Associada tectonicamente as Sequências Supracrustais, encontra-se a subunidade **P_smig**, que é constituída litologicamente por migmatitos bandados ou estromáticos de caráter orto e paraderivado, ortognaisses de composição granítica, granitos anatéticos, gnaisses aluminosos, rochas calciossilicáticas e lentes de anfibolitos. Através da paragênese mineral silimanita + K-feldspato + plagioclásio ± cordierita, Souza Filho (1998) concluiu que esta subunidade foi submetida ao fácies anfibolito alto a granulito durante o metamorfismo atuante. Os litotipos pertencentes a **P_smig** afloram na porção norte da área e apresentam um contato tectônico, por meio de uma falha de empurrão, com os litotipos da subunidade sotoposta.

A segunda unidade litológica constituinte da área corresponde aos Granitóides Sintectônicos, os quais se apresentam gnaissificados e são de composição granítica e granodiorítica (**P_sgrdgn**), além dos granitos anatéticos (**P_sgra**) que correspondem a fundidos de composição granítica e a migmatitos formados devido o alto grau metamórfico atuante sobre as rochas Pré-cambrianas. Os litotipos acima mencionados afloram como pequenos corpos na porção norte da área e possuem um contato intrusivo com os litotipos adjacentes.

O topo da seqüência lito-estratigráfica é caracterizado pelos diques ácidos (**da**) Eocambrianos de composição riolítica e sienogranítica e por veios graníticos.

Castro (1982) definiu quatro fases de dobramento na área, onde a primeira corresponde a dobras recumbentes isoclinais, originadas por uma compressão de norte para sul. A segunda originou dobras recumbentes isoclinais com falhamentos inversos associados, a partir de uma compressão de oeste para leste. A terceira fase gerou um dobramento suave com plano axial subvertical e a quarta foi responsável pelo recurvamento das estruturas préteritas. Quanto à tectônica rúptil, este autor definiu planos de fraturas de *trend* principal N-S e ENE-WSW, além do falhamento inverso associado ao dobramento de segunda fase.

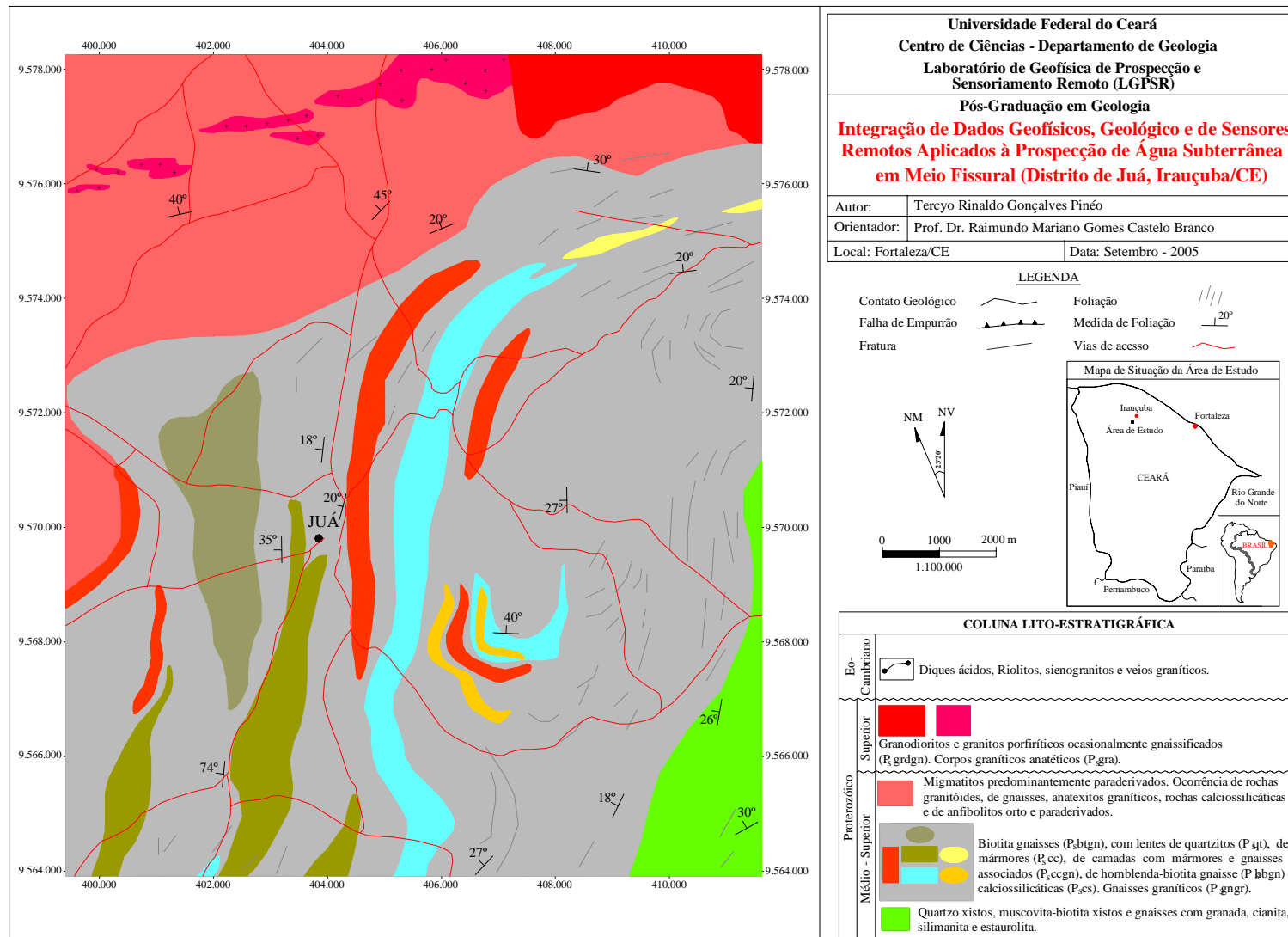


Figura 3.5 - Esboço Geológico da Área de Estudo. Fonte: Mapa Geológico da Folha de Irauçuba - 1:100.000 (Souza Filho, 1998).

Tabela 3.3 – Coluna Lito-Estratigráfica para a área de estudo. Fonte: modificado de Souza Filho (1998).

Proterozóico Superior Eo-Cambriano		(da) Diques ácidos: Riolitos, sieno-granitos e veios graníticos.	
Proterozóico	Superior	Granodioritos e granitos porfiríticos ocasionalmente gnaissificados (P_{sgrdgn}). Granitos anatóticos (P_{sgra})	
	Médio – Superior		
	P_smig	Unidade migmatítica predominantemente paraderivada contendo migmatitos bandados, estromáticos, com paleossomas de granada-biotita gnaiss e de silimanita-biotita gnaiss. Ocorrência de rochas granitóides quartzo-dioríticas, de gnaisses aluminosos, anaxitos graníticos, de rochas calciossilicáticas e de anfibolitos orto e paraderivados.	
	Unidade Superior	Unidade pelito-carbonática (U_S), parcialmente migmatizada, com biotita gnaisses a silimanita, granada e muscovita (P_{sbtgn}), com intercalações da base para o topo de lentes quartzíticas (P_{sqt}), de mármore (P_{scc}), de camadas com mármore e gnaisses associados (P_{sccgn}), de hornblenda-biotita gnaiss (P_{sbbgn}) e de rochas calciossilicáticas (P_{sccs}). Gnaisses graníticos (P_{sngnr}) estão tectonicamente associados as rochas paraderivadas.	
Unidade Média	Unidade psamito-carbonática (U_M), com quartzo xisto, muscovita-biotita xistos e gnaisses com granada, silimanita, estauroлита e cianita no topo (P_{sxt}).		

3.2.4. DADOS GEOLÓGICOS DE CAMPO

O objetivo principal deste levantamento geológico foi o de reconhecer e caracterizar as estruturas dúcteis e principalmente as rúpteis pertinentes aos litotipos aflorantes na área de pesquisa. Em paralelo, foi realizada uma checagem do mapa geológico base a partir da análise dos afloramentos visitados em campo (figura 3.6).

Inicialmente, foi realizada uma análise de fotografias aéreas e imagens de satélite de modo a compreender a orientação geral dos lineamentos e em seguida checar esta informação com base em medidas de atitude feitas em campo. Assim foi possível comparar as estruturas geológicas (orientação preferencial) com a direção das anomalias aeroeletromagnéticas (4.500 Hz) e definir se estas anomalias geofísicas têm um controle de origem estrutural (capítulo 7).

A caracterização destas estruturas rúpteis em conjunto com o dados oriundos das fotografias aéreas e imagens espectrais que abrangem a área foi também importante para a definição dos locais onde foram realizados os levantamentos geofísicos elétricos e eletromagnéticos de detalhe, com o objetivo de definir um local favorável à captação de água subterrânea por meio de poço profundo.

Com os propósitos mencionados, observou-se uma boa correlação do mapa geológico base com os afloramentos visitados em campo, mesmo considerando a escala regional do mapa base utilizado (1:100.000). Quanto às feições estruturais de natureza dúctil, verificou-se uma inflexão da foliação, tendo na porção centro-sul da área uma direção aproximada leste-oeste, com mergulho para oeste, e na porção centro-norte passando para norte-sul e nordeste-sudoeste, com mergulho respectivo para norte e noroeste. Tal padrão está de acordo com a evolução geotectônica proposta por Souza Filho (1998) para a região de Irauçuba, como foi discutido no item 3.2.2 (Geologia Regional).

Nesta etapa de campo, foram visitados 57 afloramentos e obtidos aproximadamente 116 medidas de atitude de fraturas, que estão apresentadas na forma de um diagrama de roseta e no mapa da figura 3.6. De acordo com este diagrama existem duas direções preferências de fraturamento, uma aproximadamente norte-sul e outra leste-oeste, seguidas das direções secundárias noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste (figura 3.7). No geral, estas estruturas apresentam mergulhos verticais à subverticais.

Destacamos aqui as duas áreas que foram selecionadas para a prospecção hídrica por meio de geofísica terrestre, uma posicionada nas adjacências do ponto 56, caracterizada por lineamentos de direção norte-sul e leste-oeste, sendo que algumas estruturas norte-sul apresentam uma abertura de aproximadamente 1 m (figura 3.7), e outra localizada na porção

centro-leste da área, onde não foram identificados afloramentos significativos (ponto 58), porém identificaram-se lineamentos expressivos a partir das fotografias aéreas e imagens de satélite. No ponto 33 foram identificadas fraturas de direção leste-oeste com abertura de até 10 cm, porém sem concordância com os lineamentos oriundos das fotografias aéreas e imagens de satélite, ao contrário das duas áreas selecionadas.

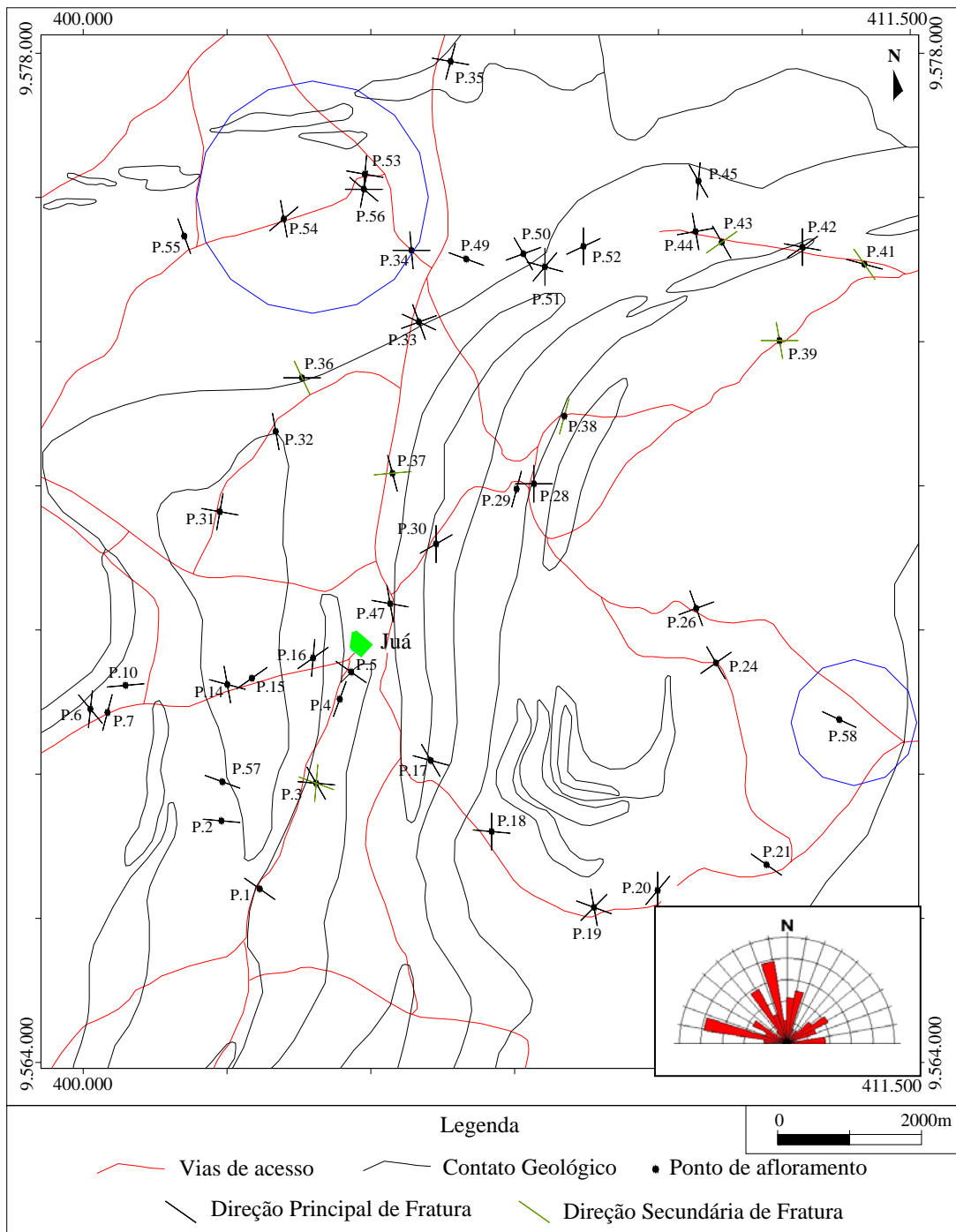


Figura 3.6 – Mapa da área exibindo os pontos visitados em campo, as direções das estruturas rúpteis na forma de retas e as áreas selecionadas para levantamento geofísico de detalhe (círculos azuis). Observa-se ainda o diagrama de roseta que exhibe as direções preferenciais de fraturamento medidas em campo.

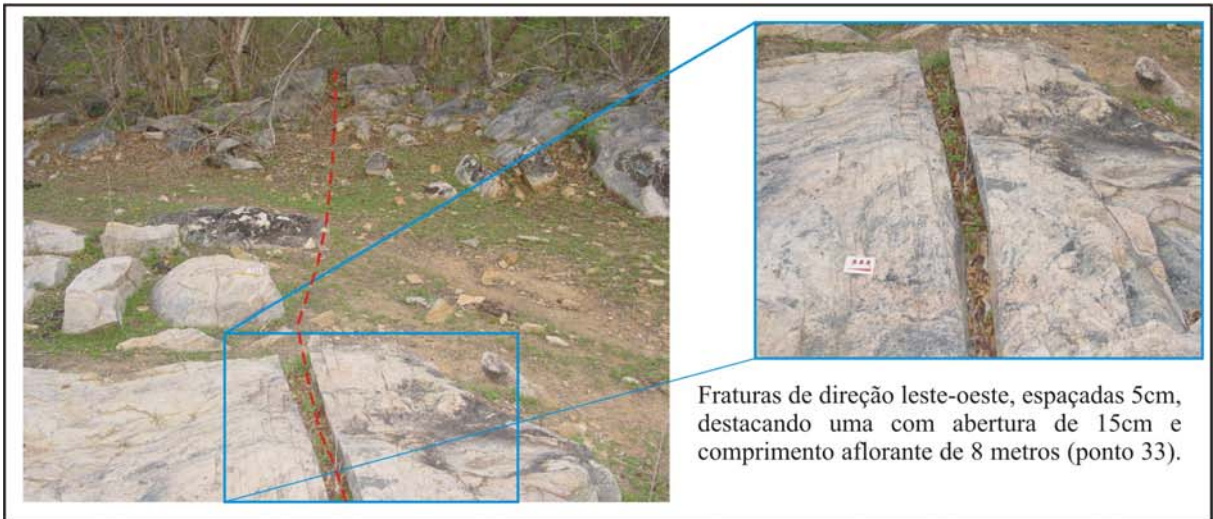
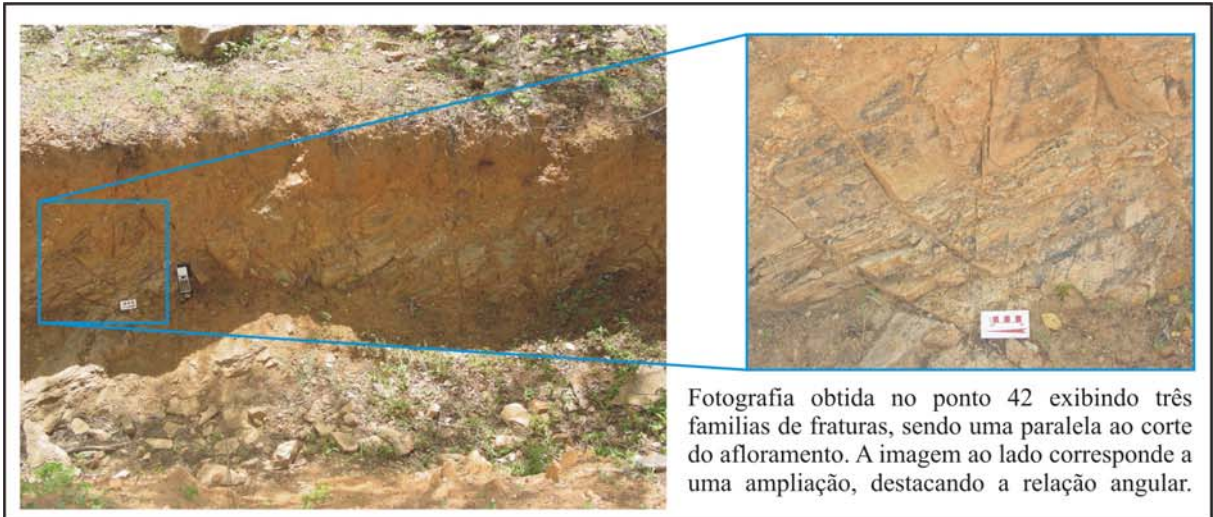


Figura 3.7 – Prancha de fotografias referentes a alguns afloramentos visitados.

Capítulo 4

4. HIDROGEOLOGIA DE MEIO FISSURAL

Pesquisas científicas voltadas a recursos hídricos subterrâneos somadas ao desenvolvimento de equipamentos diversos e *softwares* específicos, tem ampliado substancialmente o conhecimento em Hidrogeologia. Atualmente, como resultado destes estudos, é possível definir áreas propícias à captação de água subterrânea com um menor percentual de erro em termos de produtividade, definir parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero em estudo, desenvolver o modelo hidrogeológico característico de um aquífero, bem como outros trabalhos referentes. Conseqüentemente e naturalmente, termos específicos foram gerados em paralelo a estas pesquisas e serão tratados neste capítulo com enfoque principal à hidrogeologia de meio fissural, com o intuito de facilitar a compreensão do presente trabalho tendo em vista que serão constantemente aqui mencionados.

4.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A origem de quase toda água subterrânea existente no planeta Terra está relacionada ao ciclo hidrogeológico, processo pelo qual a natureza propicia a circulação das águas superficiais (oceano, lagos, rios...) para a atmosfera através da evaporação e daí para os continentes por meio de precipitações, de onde retorna superficial e subterrâneamente aos rios, lagos e oceanos (Manoel Filho, 1997). Parte da água que infiltra no solo pode percolar até o nível freático, constituindo a recarga ou recursos renováveis dos aquíferos.

A água infiltrada flui através de solos e rochas com velocidade dependente da permeabilidade do meio. A permeabilidade pode ser primária, quando o fluxo d'água ocorre através de poros interconectados de uma rocha de natureza sedimentar, ou secundária, quando o meio é maciço e o fluxo de água ocorre ao longo de discontinuidades existentes (fraturas, cavernas...). Formações geológicas permeáveis, susceptíveis de armazenar e transmitir água são denominadas de aquíferos (Vallejo *et. al.*, 2002), que podem ser classificados em três tipos principais (figura 4.1):

- Aquíferos Porosos – Correspondem a formações geológicas constituídas por rochas sedimentares clásticas consolidadas ou não, sendo que a água fica retida nos espaços intergranulares;

- Aquíferos Cársticos – Correspondem às rochas sedimentares e metamórficas carbonáticas, onde a atuação dos processos de dissolução gera feições propícias ao armazenamento de grandes quantidades de água (cavernas, dolinas...);
- Aquíferos Fissurais – Característicos do embasamento cristalino (rochas magmáticas e metamórficas) onde a água se localiza em meio às discontinuidades pertinentes (fraturas, juntas, falhas, vesículas, aberturas de dissolução...).

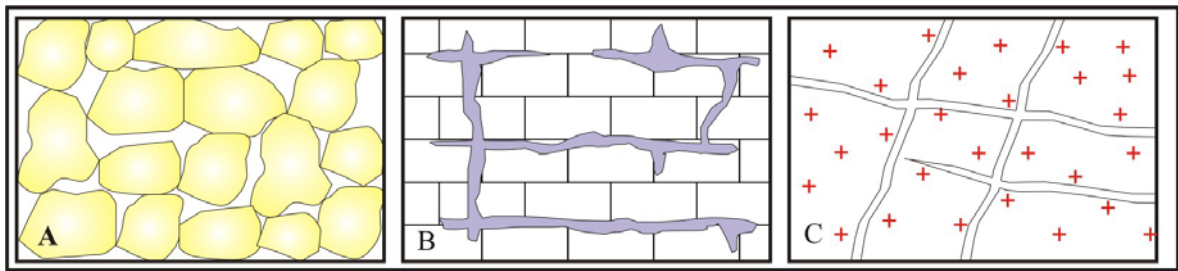


Figura 4.1 – Tipos de aquífero segundo sua textura. A) Aquífero Poroso (Arenito); B) Aquífero Cárstico (Calcário); C) Aquífero Fissural (Granito).

As formações geológicas que caracterizam um tipo de aquífero, possuem parâmetros hidrodinâmicos além de outras características hidrogeológicas, que são importantes para a sua classificação em termos de potencial hidrogeológico. Dentre estas características podemos destacar:

- Porosidade – Refere-se à relação entre o volume de espaços vazios e o volume total de uma rocha, podendo ser primária, quando associada aos poros originais da rocha, ou secundária, referente a fissuras e cavidades desenvolvidas após a formação de um litotipo;
- Condutividade Hidráulica – Corresponde à velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário. Refere-se à facilidade de um aquífero de exercer a função de um condutor hidráulico;
- Transmissividade – Corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Sendo dada pela expressão:

$$T = Kb \text{ eq. 4.1, sendo:}$$

T = Transmissividade; K = Condutividade hidráulica; b = Espessura do aquífero

- Anisotropia – Ocorre quando a condutividade hidráulica de um aquífero é diferente para cada uma das direções dos eixos coordenados;

- Heterogeneidade – Quando um aquífero é formado por materiais de condutividade hidráulica diferente.

Os aquíferos fissurais, alvos desta pesquisa, caracterizam-se por ser um meio hidraulicamente descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. Desta forma, não apresentam parâmetros hidrodinâmicos constantes, pois a porosidade é meramente função das fissuras, que não se distribuem homogeneamente por todo aquífero, a condutividade hidráulica dependerá do fraturamento e a transmissividade não se aplica ao caso, uma vez que a condutividade hidráulica não pode ser extrapolada para uma determinada espessura do aquífero onde predominam zonas não fraturadas (Costa & Braz da Silva, 1997). Dados oriundos de ensaios em laboratório e referentes à condutividade hidráulica e porosidade dos dois grupos principais de rochas cristalinas, estão exibidos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em laboratório a partir de rochas cristalinas.
Fonte: (Costa & Braz da Silva, 1997).

	Rochas Ígneas	Rochas Metamórficas
Porosidade	0,05% - 4%	0,2% - 0,5%
Condutividade Hidráulica	$10^{-10} - 10^{-12}$ m/s	

Segundo Costa & Braz da Silva (1997) os fatores que influem nas características hidrodinâmicas do aquífero fissural são (figura 4.2):

- Amplitude das fissuras (L);
- Abertura das fissuras (a);
- Forma e rugosidade das paredes das fissuras (R);
- Frequência ou espalhamento das fissuras;
- Número de famílias ou sistemas de fissuras (n);
- Orientação e posição das fissuras;
- Porosidade e permeabilidade da matriz rochosa;
- Propriedade do material que preenche as fissuras;
- Distribuição da amplitude da fissura no sistema, que determina a heterogeneidade e anisotropia.

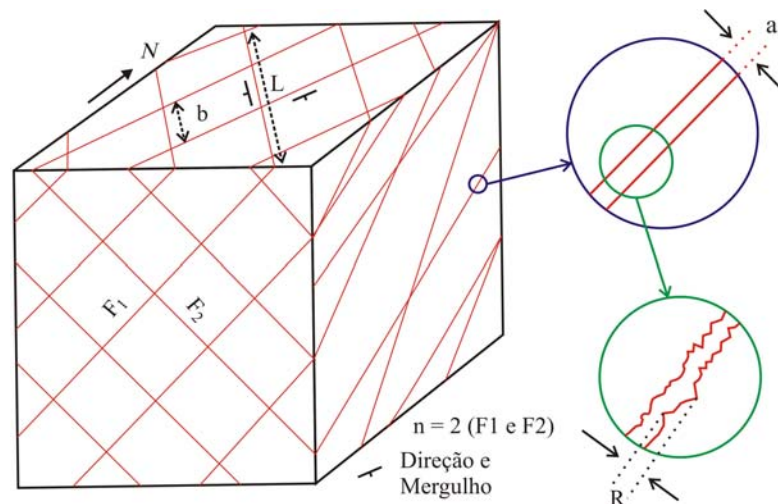


Figura 4.2 – Bloco diagrama exibindo os elementos que influem nas características hidrodinâmicas de um aquífero fissural. Fonte: Modificado de Costa e Braz da Silva (1997).

4.2. MECANISMO DE FRATURAMENTO

Os materiais geológicos se encontram submetidos a esforços naturais como conseqüência de sua história geológica. Estes esforços estão relacionados à pressão litostática, em conseqüência do peso dos materiais sotopostos e principalmente à tectônica de placas, onde o movimento de placas litosféricas constitui a fonte principal dos esforços atuantes nas rochas e, através de uma análise estrutural é possível estimar a orientação e a magnitude destes esforços.

Como conseqüência da atuação de esforços tectônicos a um maciço rochoso qualquer, considerando-se ainda a profundidade deste maciço, feições estruturais distintas são originadas. Assim, em maiores profundidades, onde reinam altas pressões e temperaturas, o meio rochoso se comporta de maneira dúctil e as estruturas geradas são caracterizadas por dobras e recristalização de minerais. Nas porções mais superficiais da crosta, devido à pressão e temperatura serem mais amenas, os litotipos sofrem uma deformação rúptil representadas por fraturas diversas (descontinuidades). Estudos hidrogeológicos em terrenos cristalinos concentram-se na porção da crosta onde atua a deformação rúptil, tendo em vista que a deformação que envolve a plastificação dos maciços rochosos (dúctil) piora as condições de permeabilidade destes.

As tensões tectônicas atuam no sentido tangencial à crosta terrestre (Costa & Braz da Silva, 1997) promovendo estruturas distintas em um corpo rochoso segundo a orientação e tipo de esforço (tracional e compressivo). Num primeiro caso, quando o esforço compressivo

(σ_1) é horizontal e o esforço tracional (σ_3) é vertical, ocorrem rupturas de cisalhamento (figura 4.3a). Em outra situação, representada pela tração (σ_3) na horizontal, podem ser geradas rupturas verticais de tração e de cisalhamento (figura 4.3b). O esforço σ_2 é intermediário podendo corresponder a uma tração, a uma compressão ou ser neutro. Importante ressaltar que a ruptura por tração tende a ser aberta, enquanto que por cisalhamento tende a ser fechada.

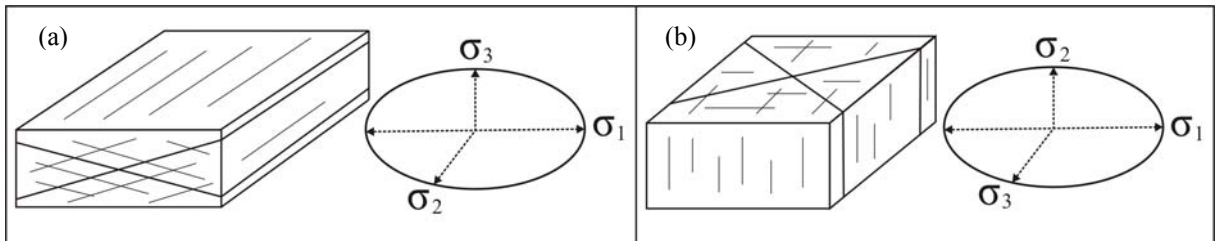


Figura 4.3 – a) Bloco diagrama exibindo fraturas de cisalhamento formadas de acordo com os esforços representados pelo elipsóide ao lado. b) Fraturas de cisalhamento e de tração originadas conforme a orientação dos esforços representados pelo respectivo elipsóide.

Outra característica comum é a associação de uma deformação ruptural a uma deformação de dobramento (figura 4.4). Neste caso, durante o dobramento de um litotipo em condições ideais, tensões de tração (σ_t) na parte externa da dobra e de compressão (σ_c) na parte interna são geradas, formando respectivamente rupturas de tração paralelas ao eixo da dobra e enrugamento.

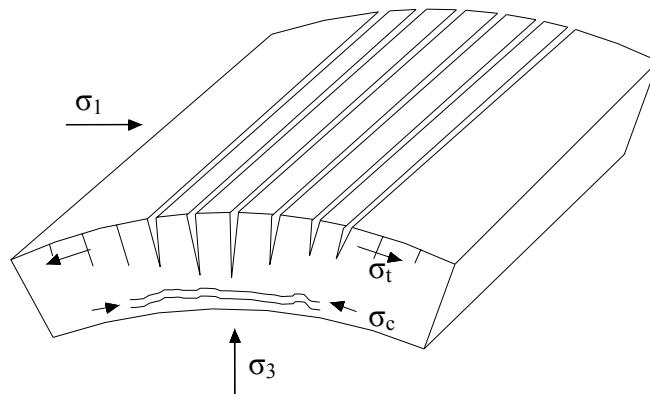


Figura 4.4 – Fraturas de tração e enrugamento associado a um dobramento.

Um corpo rochoso com alguma orientação planar (estratificação, foliação ou xistosidade) geralmente se comporta de modo diferente ao apresentado na figura 4.3, quando submetido a uma tectônica rúptil, uma vez que estes planos possuem resistência inferior ao do restante da rocha. Nesta situação a ruptura é favorecida por estas zonas de fraqueza e ocorre paralelamente a direção dos planos pré-existentes.

Os meios rochosos podem ainda sofrer um fraturamento associado ao alívio de tensões, devido à atuação de processos exógenos (erosão). Quando o recobrimento de um maciço rochoso é retirado pelo efeito da erosão, tensões compressivas passam a ser tracionais, promovendo a formação de planos de ruptura perpendiculares à tensão de tração (σ_3) e paralelas a superfície topográfica (figura 4.5). Estas estruturas são denominadas de juntas de alívio e podem ser favorecidas também pela existência de descontinuidades pretéritas (foliação, xistosidade, fraturas, etc).

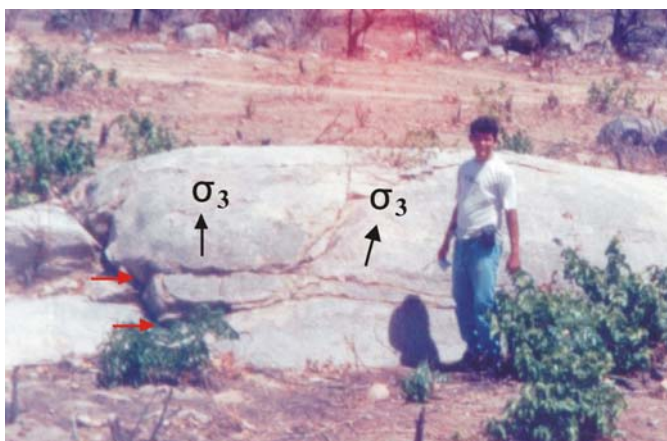


Figura 4.5 – Fotografia exibindo fraturas de alívio (representadas por setas vermelhas) com orientação paralela a superfície do maciço e perpendicular a tensão de tração σ_3 .

4.3. PROSPECÇÃO HÍDRICA EM MEIO FISSURAL

Prospectar água subterrânea consiste em um conjunto de operações ou estudos que permitem a localização e a caracterização de aquíferos, dos quais se pode obter água em quantidade e qualidade adequadas ao fim pretendido (Feitosa, 1997). Em terrenos de natureza cristalina, estes estudos estão voltados ao mapeamento de descontinuidades, que correspondem a qualquer plano de separação de um maciço rochoso que pode permitir o fluxo e o armazenamento de água entre estes planos, quando abertos e não preenchidos por sólidos (Vallejo *et. al.*, 2002).

Como já referido, o sistema cristalino é bastante problemático em termos de recursos hídricos subterrâneos, no entanto, como cerca de 70% do Estado do Ceará é constituído por litotipos desta natureza (Cavalcante, 2003) (figura 4.6) é inevitável a realização de trabalhos prospectivos na região, tendo em vista a necessidade da população por água.

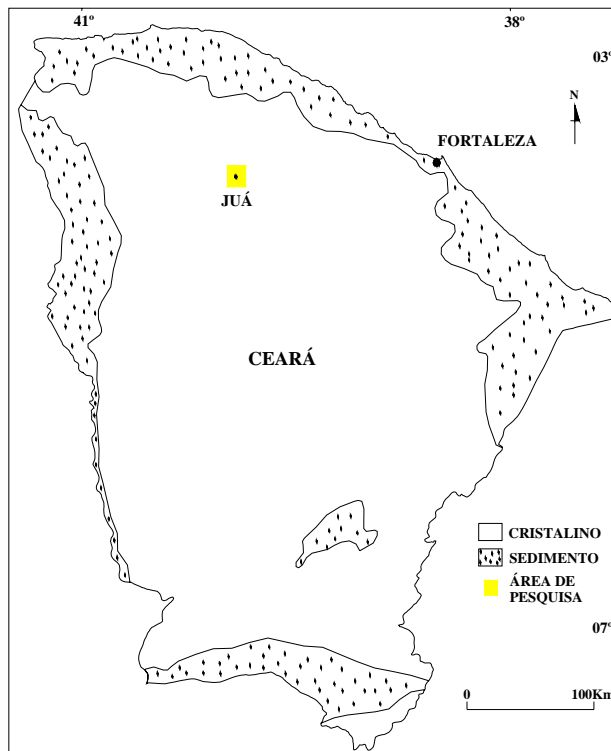


Figura 4.6 - Mapa do Estado do Ceará apresentando de modo simplificado áreas de abrangência das rochas sedimentares e dos terrenos cristalinos, aos quais estão relacionados respectivamente os aquíferos porosos e os aquíferos fissurais. Fonte : Modificado do Mapa Geológico do Estado do Ceará (Cavalcante, 2003).

Trabalhos de prospecção hídrica subterrânea em terrenos cristalinos envolvem basicamente três etapas principais. A primeira etapa corresponde a uma análise de mapas temáticos (topográfico, geológico, hídrico) e de fotografias aéreas e/ou de imagens de satélite da região de interesse, objetivando identificar áreas prioritárias para investigação em campo. O exame dos mapas mencionados é de suma importância para o conhecimento das características que são intrínsecas a área pesquisada, tendo em vista a influência da topografia, da geologia, da drenagem e do clima, dentre outros fatores, na quantidade e qualidade de água que infiltra num aquífero (ver capítulo 3). A análise de fotografias aéreas e/ou imagens de satélite diz respeito principalmente à identificação e extração de lineamentos diversos. A distinção entre lineamentos estruturais e lineamentos de outra natureza, sem importância para a pesquisa hidrogeológica, só pode ser realizada na etapa seguinte, que corresponde aos trabalhos executados em campo.

A segunda etapa consiste na checagem em campo das informações adquiridas na etapa anterior e na aquisição de dados geológicos e geofísicos. O primeiro caso corresponde basicamente em comparar o *trend* das discontinuidades pertinentes aos litotipos com os lineamentos visualizados nas fotografias aéreas ou imagens espectrais, em paralelo é realizado um reconhecimento geológico identificando os tipos litológicos e estruturas relacionadas,

principalmente as favoráveis à captação de água subterrânea. Algumas características destas estruturas que devem ser consideradas são: dimensão, direção, penetratividade, abertura, preenchimento, espaço entre elas, quantidade de famílias de fraturas e frequência. O posicionamento de um poço profundo deve levar em consideração também o mergulho das fraturas, assim quanto maior o ângulo de mergulho entre uma fratura e a superfície, mais próximo deve ser o ponto de perfuração da referida fratura (Costa Filho, 2000) (figura 4.7).

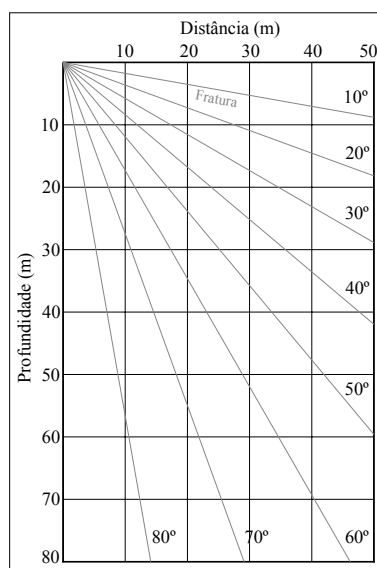


Figura 4.7 – Relação ângulo de mergulho de fratura x Distância x Profundidade.
 Fonte: Modificado de Costa Filho (2000).

Os métodos geofísicos prospectivos são implementados em trabalhos hídricos com o objetivo de mapear o comportamento de fraturas ou zona de fraturas em subsuperfície e assim identificar zonas favoráveis à captação hídrica. Atualmente, os principais métodos geofísicos aplicados à prospecção de água subterrânea em meio fissural são os elétricos, através do caminhamento e elétrico e os eletromagnéticos, através das técnicas EM34-3XL e VLF (*Very Low Frequency*). Excetuando a técnica VLF, as demais foram utilizadas nesta pesquisa e serão discutidos com mais detalhes nos capítulos referentes. É importante ressaltar que o levantamento geofísico deve ser realizado perpendicularmente à direção das estruturas rúpteis, necessitando portanto de um levantamento estrutural pretérito.

A última etapa consiste na análise e comparação de todos os dados adquiridos nas duas fases anteriores. Desta forma, é possível identificar locais favoráveis a exploração de água subterrânea. A transferência de dados analógicos para o meio digital facilita consideravelmente a integração destes, os quais podem ainda compor um banco de dados em ambiente SIG e serem utilizados em outros trabalhos de cunho científico na mesma região.

Capítulo 5

5. SENSORIAMENTO REMOTO

5.1. INTRODUÇÃO

Sensoriamento Remoto corresponde à utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações (Moraes Novo, 1995).

A técnica de sensoriamento remoto tem sido largamente utilizada em pesquisas do ramo das geociências, envolvendo principalmente: a avaliação de recursos hídricos, a prospecção hidrogeológica subterrânea de aquíferos fissurais, a confecção de mapas temáticos, a análise e monitoramento ambiental, a agricultura através de levantamento e caracterização dos solos ou de identificação e mapeamento de culturas, a integração com informações oriundas de metodologias geofísicas, a geologia em aplicações voltadas ao mapeamento geológico básico e à pesquisa mineral e, sobretudo, nos estudos e pesquisas interdisciplinar.

Vários pesquisadores têm desenvolvido e publicado trabalhos científicos voltados à prospecção hídrica subterrânea, dando ênfase à utilização conjunta de métodos geofísicos, geológicos e imagens de sensoriamento remoto (Martini, 1985; Janardhana Raju & Reddy, 1998; Srinivasa Rao *et. al.*, 2000; Coriolano, 2002 e Babiker & Gudmundsson, 2004...). Dentro deste contexto, para a pesquisa em apreço, as imagens de sensoriamento remoto (SR) foram utilizadas com o objetivo de definir fraturas e um local propício a captação de água subterrânea. Para tanto, estes dados foram integrados (em ambiente SIG) com informações obtidas em campo e resultados de levantamento geofísico aéreo e terrestre, conforme apresentado no capítulo 6.

Neste capítulo não objetivamos apresentar técnicas complexas de processamento e extração de informações diversas a partir de imagens espectrais, nem mesmo abordar em detalhe informações sobre Sensoriamento Remoto, já que o presente trabalho é voltado para prospecção hidrogeológica subterrânea com a aplicação de métodos geofísicos e devido a pouca experiência do autor no assunto. Entretanto, devido a técnica de sensoriamento remoto ser bastante empregada e apresentar bons resultados neste tipo de pesquisa, optamos por utilizá-la e, por isso, trabalhos diversos referentes à utilização de imagens de satélite no auxílio à prospecção hídrica subterrânea, bem como o *tutorial* do *software* ER Mapper 5.5 foram pesquisados e estudados minuciosamente.

5.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS ÓRBITAIS

O processamento digital de imagens de SR trata especificamente das técnicas utilizadas para identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinados fins a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem essas imagens (Crosta, 1992). Neste sentido, sistemas de computação envolvendo *hardwares* adequados e *softwares* específicos para processamento de imagens digitais (ER Mapper, Envi, Spring...) são utilizados em atividades interativas de análise e manipulação das imagens.

Imagens de SR possuem algumas características que as diferenciam de outras imagens digitais, como estrutura e resolução, além de quase sempre serem multi-espectrais, ou seja, adquiridas em diferentes porções do espectro eletromagnético, geralmente variando da porção visível até microondas. A estrutura de uma imagem de sensoriamento remoto corresponde a uma matriz, caracterizada por um *grid* regular com a origem no canto superior esquerdo e, onde cada célula deste *grid*, definida como pixel (*Picture Element*), é posicionada na imagem de acordo com um sistema de coordenadas do tipo linha (eixo-X) e coluna (eixo-Y) (figura 5.1). Neste contexto, um pixel representa uma área da superfície da Terra e possui um atributo numérico (Z) que representa um nível de cinza, ou DN de *Digital Number*, que varia do preto ao branco. Desta forma, o DN de um pixel representa a média da intensidade da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes neste pixel, medida pelo sensor remoto (Crosta, 1992).

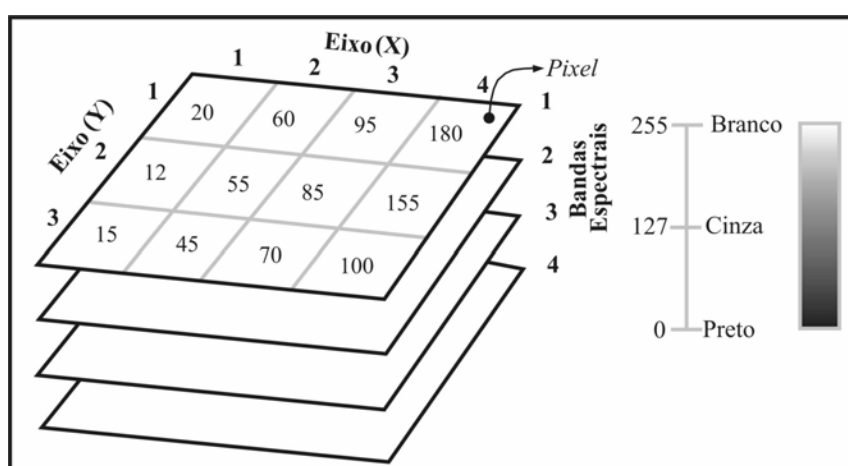


Figura 5.1 – Representação estrutural de uma imagem de SR, onde se observam as bandas espectrais, os *pixels* com seus respectivos níveis de cinza (DN) e a escala de cinza ao lado.

Em termos de resolução do sistema sensor, existem três tipos diferentes em sensoriamento remoto, que implicará diretamente na qualidade da imagem adquirida: a resolução espacial, a resolução espectral e a resolução radiométrica. A primeira corresponde à capacidade do sistema sensor em abranger objetos, assim quanto menor a área da superfície terrestre representada por um pixel, maior é a resolução espacial. A resolução espectral é definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto por cada banda. Assim, quanto maior o número de bandas espectrais e menor a largura do intervalo de comprimento de onda, maior é a resolução espectral da imagem. A resolução radiométrica corresponde ao número de níveis digitais representados pelos DN's. O satélite Landsat possui resolução radiométrica de 256 níveis de cinza, que varia do preto (DN = 0) ao branco (DN = 255). A tabela 5.1 apresenta uma comparação entre as resoluções espaciais e espectrais dos principais satélites atualmente em órbita, com base em informações técnicas contidas no *site*: www.engesat.com.br.

Tabela 5.1 – Quadro comparativo de dois dados técnicos entre os principais sistemas sensores em órbita (satélites). A letra B corresponde a uma abreviação para banda espectral.

	Landsat 7	Spot 5	Aster	Ikonos	Quickbird
Nº de bandas espectrais	8	5	14	5	4
Resolução espacial	B1 a 5 e B7 = 30m	Pancromática = 2.5 a 5m	B1 a 3= 15m	Pancromática = 1m	2,44 a 2,88m
	B6 = 60m	B1 a 4= 10m	B4 a 9 =30m	B2 a 4 = 4m	
	B8 = 15m		B10 a 14= 90m		

5.2.1. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS ESPECTRAIS

De acordo com Crosta (1992), as principais técnicas de processamento de imagens SR são: aumento de contraste, composição colorida, filtragem de frequências, operações aritméticas, classificação, análise por principais componentes, correção geométrica e registro de imagens. Estas técnicas são implementadas às imagens por métodos digitais conforme o objetivo do trabalho; para tanto, é necessário que o *software* utilizado seja fundamentado em algoritmos que permitam estas operações.

Os subitens a seguir apresentam informações sucintas, porém indispensáveis para a compreensão do trabalho em apreço, a respeito das técnicas utilizadas no tratamento das imagens de sensoriamento remoto que abrangem a área pesquisada. Estas informações são baseadas em Crosta (1992).

AUMENTO DE CONTRASTE

O contraste de uma imagem é uma medida do espalhamento dos níveis de intensidade que nela ocorrem, sendo representado por histogramas, gráfico que exhibe a informação sobre quantos *pixels* na imagem possuem cada valor possível de DN. Quanto maior o espalhamento ao longo do eixo dos DN's, maior o contraste da imagem. Portanto o aumento de contraste consiste numa importante técnica de processamento para extração de informações e objetiva apresentar a mesma informação contida na imagem bruta, porém de uma forma mais visível.

O processamento em apreço é possível por meio de Funções de Transferência de Contraste, uma curva plotada em relação a dois eixos (X, Y) que representam as intensidades da imagem original e modificada. A aplicação deste processo ocorre da seguinte forma: Plota-se a intensidade original de um *pixel* no eixo X, em seguida traça-se uma linha vertical a partir deste ponto até a curva de função de transferência; uma linha horizontal a partir desta interseção até o eixo Y define a intensidade modificada (figura 5.2).

As funções de transferência de contraste são divididas em dois tipos principais: o aumento linear e bilinear de contraste e as técnicas de aumento não linear (Função de Equalização, Função Gaussiana, Função Logarítmica e Função Exponencial).

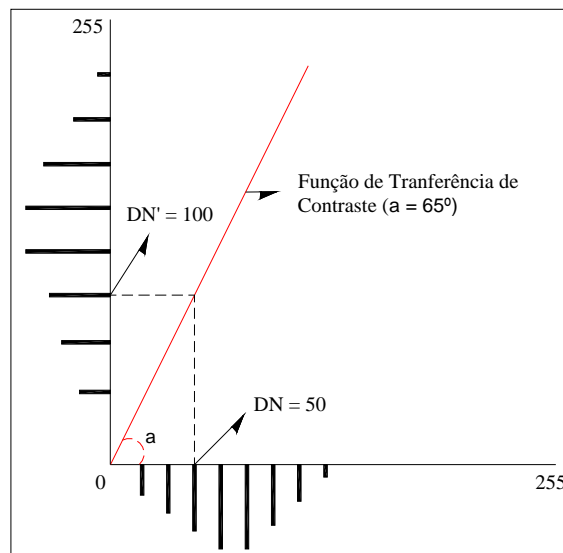


Figura 5.2 – Histograma de uma imagem no eixo X submetido a uma função linear de aumento de contraste, resultando no histograma no eixo Y. *Pixels* com DN igual a 50 vão ter seu novo nível de cinza igual a 100 (DN') na imagem transformada.

COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA-COR

Esta técnica consiste na combinação entre três bandas espectrais com cada uma das três cores primárias aditivas: vermelho (*red* – R), verde (*green* – G) e azul (*blue* – B), formando assim o sistema RGB. Desta forma, obtém-se numa única imagem, uma grande quantidade de informação em cores distintas, o que facilita a interpretação da imagem digital ao intérprete, tendo em vista que o sistema visual humano tem uma maior capacidade em distinguir cores do que tons de cinza. Para a obtenção de bons resultados por meio desta técnica é necessário selecionar as bandas a serem combinadas de acordo com as características espectrais dos alvos de interesse.

O termo cores primárias aditivas foi definido por Thomas Young (1773 – 1829) quando a partir de seus experimentos com luz e filtros descobriu que a combinação, em diferentes proporções entre as cores vermelha, verde e azul, resulta em uma grande quantidade e tonalidades de cores. Este é um dos motivos da ampla utilização do sistema RGB, como é mundialmente conhecido, na composição colorida entre três bandas distintas de uma imagem de satélite.

FILTRAGEM DE FREQUÊNCIAS ESPECTRAIS

Imagens de sensoriamento remoto apresentam dois tipos de limites entre áreas com diferentes respostas à energia eletromagnética, representados pela mudança de um intervalo de nível de cinza (DN) para outro. Limites caracterizados por uma brusca variação do intervalo de DN's são conhecidos como bordas ou feições de alta frequência, representados por senóides de pequeno comprimento de onda. Exemplos deste tipo de feição são: contato entre litotipos distintos, rede de drenagem, estruturas geológicas (fraturas, falhas...), limite entre vegetações e outros. Já os limites de baixa frequência variam gradativamente com a distância, sendo, portanto, menos perceptíveis e representados por senóides de grande comprimento de onda.

As feições de alta frequência são as mais comumente utilizadas na extração de informações, entretanto, devido a enorme mistura de frequências em uma mesma imagem, que dificulta a interpretação de tais feições, utiliza-se a filtragem de frequências. Esta técnica consiste em realçar estruturas de alta, média ou baixa frequência de acordo com o objetivo do trabalho a ser realizado.

Através da operação matemática conhecida por convolução, que opera no domínio espacial de uma imagem, é possível implementar três tipos de filtros: filtro passa baixa, que realça as informações de baixa frequência; filtro passa alta, que realça as informações de alta frequência e filtros direcionais, para o realce de bordas em direções pré-definidas. Os *softwares* atualmente utilizados para o processamento de imagens digitais possuem um acervo com tais filtros, ademais permitem que outros filtros sejam desenvolvidos.

OPERAÇÕES ARITMÉTICAS

Informações pertinentes às bandas espectrais de uma mesma imagem digital ou de imagens diferentes podem ser condensadas numa só banda por meio de operações aritméticas (adição, subtração, multiplicação e divisão) que são realizadas *pixel a pixel*.

Operações de adição e multiplicação realçam similaridades espectrais entre bandas de uma imagem ou de diferentes imagens, já as operações de subtração e de divisão são utilizadas para realçar as diferenças espectrais. Vale ressaltar que o resultado de tais operações ultrapassa o intervalo 0-255, devendo ser redimensionado para que a imagem possa ser visualizada em monitores de microcomputador.

O resultado geral obtido por meio desta técnica, corresponde a uma só banda contendo dados espectrais de duas ou mais bandas. Desta forma, as oito bandas espectrais do sensor Landsat ETM-7 podem, por exemplo, ser representadas no sistema RGB em três bandas, desde que realizadas anteriormente operações aritméticas adequadas ao escopo do trabalho.

5.3. APLICAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS

A imagem de SR utilizada nesta etapa do trabalho pertence à cena 217_063 e foi obtida pelo satélite LandSat ETM-7 no mês de outubro do ano de 1999. De acordo com os dados climáticos e pluviométricos apresentados no capítulo 3, esta cena foi adquirida num período de clima seco (sem chuvas), o que proporcionou uma melhor exposição do solo e dos litotipos existentes, devido à escassez de vegetação.

As feições extraídas a partir da imagem de sensoriamento remoto que abrange a área corresponderam à rede de drenagem e aos alinhamentos de cristas e vales topográficos, que podem estar associados a descontinuidades. Desta forma, composições coloridas diversas com a utilização da banda pancromática, ajustes de contraste, razões entre bandas espectrais, aplicação de filtros passa alta e geração do Modelo Digital do Terreno (MDT) foram implementados como processamento digital, com o intuito de realçar as informações de interesse contidas na imagem para posterior extração. Ademais, os resultados oriundos destes processamentos foram comparados com o mapa aeroeletromagnético (4.500 Hz), de modo a definir alguma correlação das estruturas rúpteis com a orientação das anomalias aerogeofísicas. Outra aplicação foi a definição de duas áreas para atividades de prospecção hídrica por métodos geofísicos e conseguinte definição de um local favorável à captação hídrica por meio de um poço profundo.

O *software* utilizado no processamento e na extração de informações das imagens SR foi o ER Mapper 5.5, o qual, além de várias aplicabilidades, possui recursos de edição que permitiram a vetorização de lineamentos diversos e posterior exportação das feições interpretadas em formato DXF, facilitando a criação de um SIG. As bandas espectrais processadas também foram incorporadas ao SIG, tendo em vista que o *software* de banco de dados utilizado é compatível com a extensão característica do *software* ER Mapper 5.5.

As composições coloridas utilizadas no processamento correspondem ao RGBI_4328, RGB_753, e RGB_321, aos quais foram implementadas transformações lineares (Ajuste Linear de Contraste) e não lineares de contraste (Gaussiano e Equalização de histograma). No entanto, será apresentada e discutida neste capítulo, apenas a composição RGB_753, a qual reúne e apresenta de modo legível, todas as feições de interesse analisadas e extraídas.

5.3.1. COMPOSIÇÃO RGB_753

O realce das informações de natureza geológica foi mais proeminente na composição colorida falsa-cor RGB_753 (figura 5.3) a qual facilitou a visualização e a extração vetorial de estruturas lineares. A utilização da banda pancromática nesta composição não proporcionou um bom resultado tonal à imagem, mesmo após ajustes de contraste, por este motivo esta banda espectral não foi usada nesta combinação.

Razão entre as bandas 7/1, 5/1 e 3/1 foi implementada no processamento da composição em apreço, entretanto sem resultado satisfatório no tocante ao realce de estruturas lineares. Porém, a aplicação de um filtro do tipo passa-alta foi utilizado, seguido de um ajuste de contraste, proporcionando assim um realce textural na imagem e por conseguinte das estruturas de alta frequência espectral (lineamentos estruturais, contatos entre litotipos e cursos de drenagem) (figura 5.4). Dentre os filtros passa-alta contidos nos arquivos do *software ER Mapper 5.5*, o que proporcionou uma melhor resposta textural foi o *Sharpen2*, que possui uma matriz de três linhas por três colunas conforme apresentado abaixo.

Filtro *Sharpen2* (3x3)

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 14 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

O filtro *Sharpen2* causou uma perda da informação espectral (DN's) nas bordas da imagem, fato conhecido como efeito de borda (crosta, 1992), porém, devido a matriz deste filtro ser de 3x3, apenas a primeira e última linha e coluna de *pixels* da imagem foi afetada. Consciente deste fato, a área da imagem foi delimitada com dimensões um pouco maiores do que a área proposta para esta pesquisa, objetivando a preservação da informação de interesse.

Esta composição realça bem os corpos litológicos das principais unidades apresentadas no mapa geológico (figura 3.5) bem como de alguns corpos menos expressivos, exibindo assim o bom grau de correlação entre estes dados. Desta forma, se observa perfeitamente fácies que correspondem a lentes de hornblenda-biotitas gnaisses (**Pshbgn**) e mármores (**P_{scc}**) pertencentes à unidade superior – **U_s** (porção sudeste), o contato entre os litotipos da unidade média – **U_M** e superior (porção sudeste), o contanto geológico entre a unidade superior e a unidade migmatítica - **P_{smig}** (porção norte) e os corpos graníticos (**P_{sgrdgn}** e **P_{sgra}**) posicionados a norte da área de pesquisa (figura 5.3). Ademais é possível perceber feições estruturais marcantes, como o fraturamento norte-sul nos corpos graníticos e um dobramento marcado pela inflexão da foliação na porção centro-oeste da área

Por fugirem ao escopo da presente pesquisa e por já existir um mapa geológico básico da região, estes dados não foram extraídos (delimitação dos fácies litológicos), porém, foram de suma importância para a visualização de lineamentos e conferência das informações geológicas (litotipos aflorantes) existentes em material bibliográfico pesquisado. Na figura 5.3 estão sobrepostos à imagem, os contornos dos fácies litológicos, porém sem simbologia para não carregar excessivamente a figura e para não prejudicar a visualização de algumas feições importantes, como lineamentos e até mesmo a resposta espectral destes fácies.

Nesta imagem, além da caracterização de corpos litológicos, foi possível compreender o comportamento espacial da rede de drenagem pertinente à área de pesquisa e compará-la com mapas temáticos analógicos já existentes. Desta forma, observa-se na figura 5.3 que o comportamento de alguns drenos são controlados por descontinuidades, como é o caso da linearidade do rio Juá na porção central da área (direção NW-SE) e de riachos posicionados a sul deste rio (com direções NW-SE e NE-SW) que deságuam no mesmo. Outro indício deste controle são as mudanças bruscas na direção dos cursos d'água (“cotovelos”).

Com base no RGB_753 e no MDT (figuras 5.3 e 5.5, respectivamente), percebe-se que o rio Juá recebe água dos riachos subordinados, caracterizando a porção central da área como a fundamental zona de acumulação de água superficial. Desta forma, esta área pode corresponder à principal zona de recarga para os aquíferos fissurais mais próximos e, por conseguinte, a uma zona favorável à captação hídrica subterrânea. Três poços profundos localizados próximos ao rio e ao distrito Juá, possuem as maiores vazões da área de pesquisa, em torno de $6\text{m}^3/\text{h}$, sendo que estas vazões devem estar relacionadas ao fraturamento responsável pela configuração espacial deste rio.

A interpretação e vetorização das feições estruturais lineares foram realizadas com a utilização das composições RGB_753 com filtro e sem filtro em conjunto, ambas visualizadas ao mesmo instante no monitor de vídeo. Por meio de uma função de *link* entre as imagens (comando contido no ER Mapper 5.5) operações de *zoom* realizadas numa imagem eram imediatamente acompanhadas pela outra, portanto, a extração das estruturas lineares foi facilitada devido à comparação entre duas informações espectrais da mesma área, porém com padrão textural diferente. De acordo com as figuras 5.3 e 5.4, as estruturas lineares são mais expressivas nos corpos graníticos aflorantes na região nordeste e nas rochas supracrustais localizadas na porção sudeste da área.

Além dos lineamentos estruturais foram extraídas também na forma de vetores, a rede de drenagem característica da área. A figura 5.6 apresenta o dados vetoriais oriundos destas imagens (rede de drenagem e lineamentos).

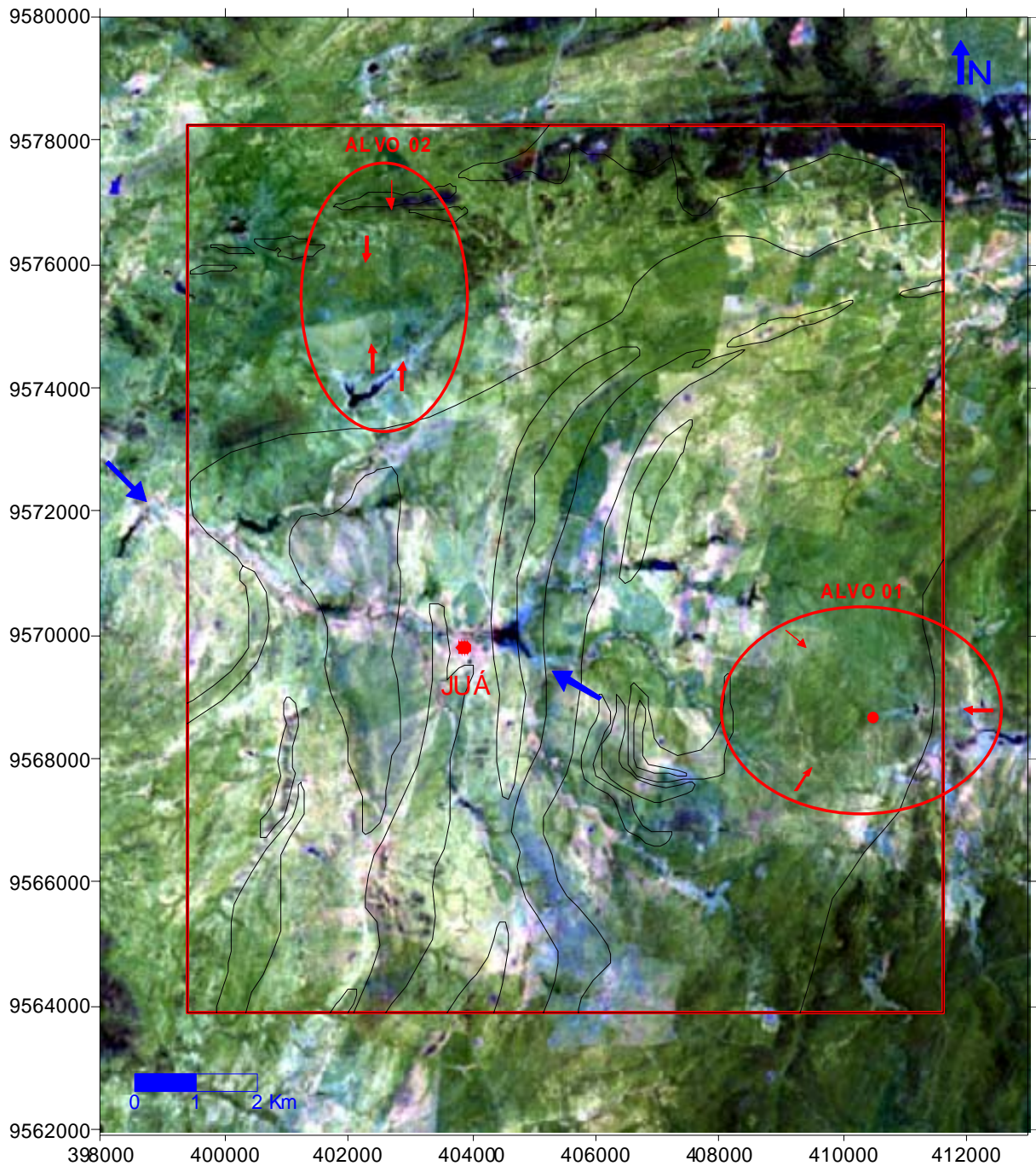


Figura 5.3 – Composição colorida falsa-cor RGB_753 ressaltando os limites dos corpos litológicos da área (contornos de cor preta), lineamentos estruturais pertinentes a estes e cursos de drenagem. As setas em azul representam o posicionamento do rio Juá e o polígono vermelho corresponde ao limite da área de pesquisa. Destacam-se ainda as duas áreas-alvo selecionadas para investigação geológica e geofísica de detalhe, com indicativo dos lineamentos por meio de setas.

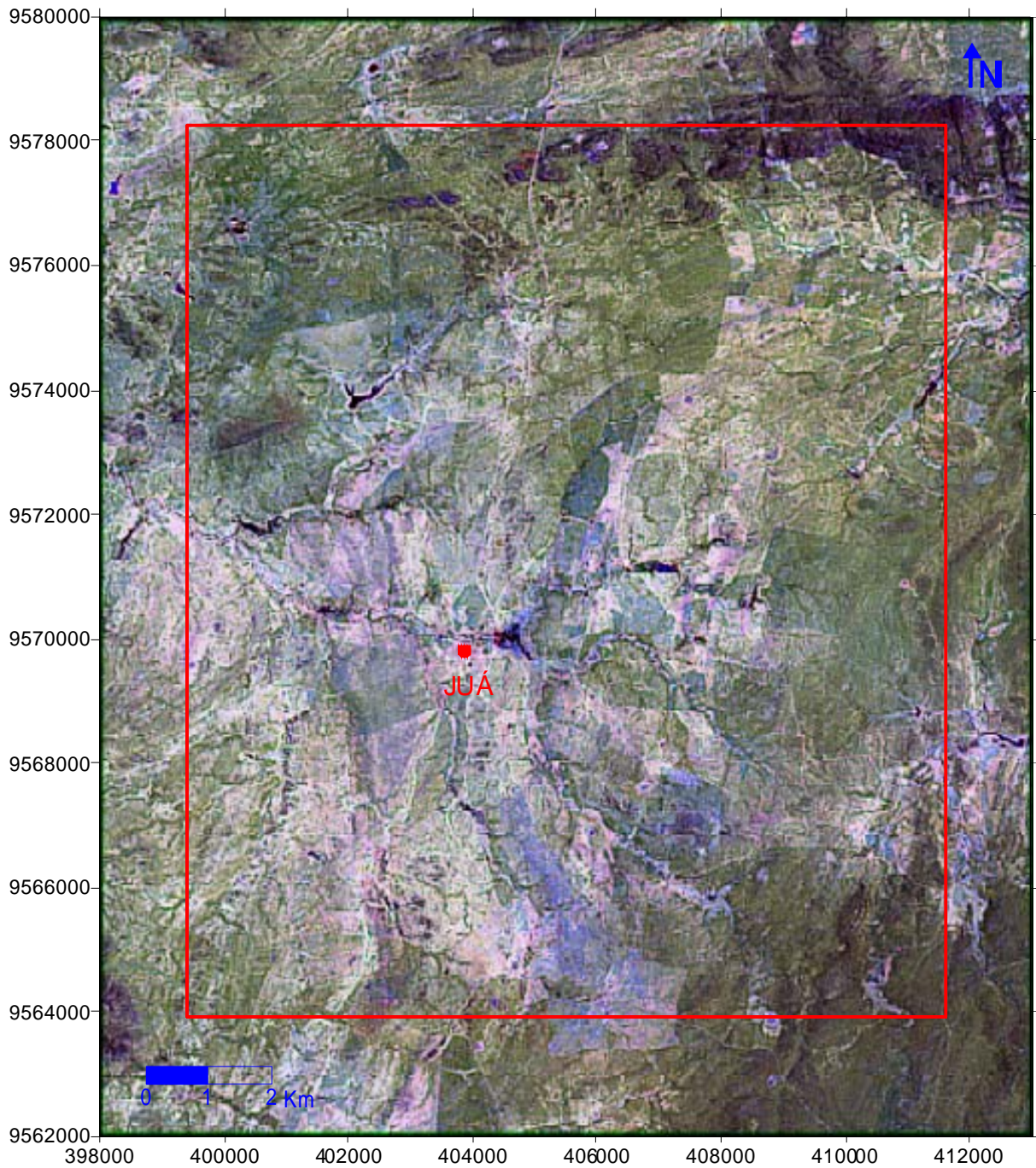


Figura 5.4 - Composição colorida falsa-cor RGB_753, com a implementação de um filtro de alta frequência, ressaltando lineamentos diversos e cursos de drenagem. Esta imagem foi utilizada para a extração vetorial de lineamentos de natureza geológica. O polígono vermelho corresponde ao limite da área de pesquisa.

5.3.2. MODELO DIGITAL DO TERRENO

Um Modelo Digital do Terreno (MDT) corresponde a uma informação valiosa e de grande importância para uma pesquisa científica, pois através deste, é possível visualizar de maneira geral as feições geomorfológicas características de uma dada região de estudo, o que auxilia na interpretação de dados diversos como espectrais, geológicos, hidrogeológicos, geofísicos e outros.

A geração do MDT da área pesquisada foi possível graças a utilização dos dados pseudotopográficos obtidos pelo projeto PROASNE. Por fugir ao escopo desta pesquisa, informações referentes ao modo de aquisição destes dados, equipamentos utilizados durante a aquisição, modo de processamento e outros, não serão aqui abordados. Porém, todas estas informações estão contidas no Relatório Final elaborado pela empresa LASA - Engenharia e Prospecção S.A. (2001) (responsável pelo levantamento aéreo) e que pode ser adquirido no site: www.proasne.net.

Os dados pseudotopográficos totalizam aproximadamente 578.000 valores no formato XYZ e na extensão .DAT, onde XY representam as coordenadas geográficas de cada ponto de medida e Z representa a pseudoaltitude em metros, também de cada ponto. O tratamento destes dados correspondeu à conversão destas coordenadas para o sistema UTM (*Universal Transversal de Mercator*) com o intuito de padronizar o geoposicionamento de todas as informações adquiridas nesta pesquisa para a geração de um SIG. Em paralelo a este tratamento foi feita uma checagem dos dados de Z, o que levou a eliminação de alguns valores esdrúxulos.

Após o tratamento, os dados foram inicialmente interpolados com o uso do *software* Surfer 8 na forma de um malha regular (*grid*) com espaçamento de 25 m. Em seguida, este *grid* foi importado para o ER Mapper. Neste *software*, a informação pseudotopográfica foi combinada com o RGB_321 e gerado o MDT da área (figura 5.5). Através deste modelo pseudotopográfico, é possível perceber três feições morfológicas principais: Vales topográficos ressaltados pela erosão fluvial (áreas relativamente estreitas e compridas de cor azul escuro) onde se destaca o vale do rio Juá e dos seus afluentes; regiões mais planas nas proximidades e entre alguns destes vales, representadas no MDT por tonalidades verde-claro e azul-claro e feições topograficamente elevadas localizadas principalmente nas porções sudeste e nordeste da área pesquisada (área com tonalidades variando de laranja a vermelho). Este modelo foi crucial na definição dos lineamentos, tendo em vista a perfeita correlação de alguns destes com feições topográficas negativas visualizadas no MDT.

Algumas características de destaque presentes na figura 5.5, compreendem aos topos planos de algumas feições morfológicamente elevadas e a alinhamentos topograficamente positivos de direção norte-sul, sendo que o primeiro caso está provavelmente associado a ruídos do dado original. De acordo com o relatório final apresentado pela LASA - Engenharia e Prospecção S.A. (2001), este último corresponde a ruídos associados às linhas de controle durante a aquisição do dado.

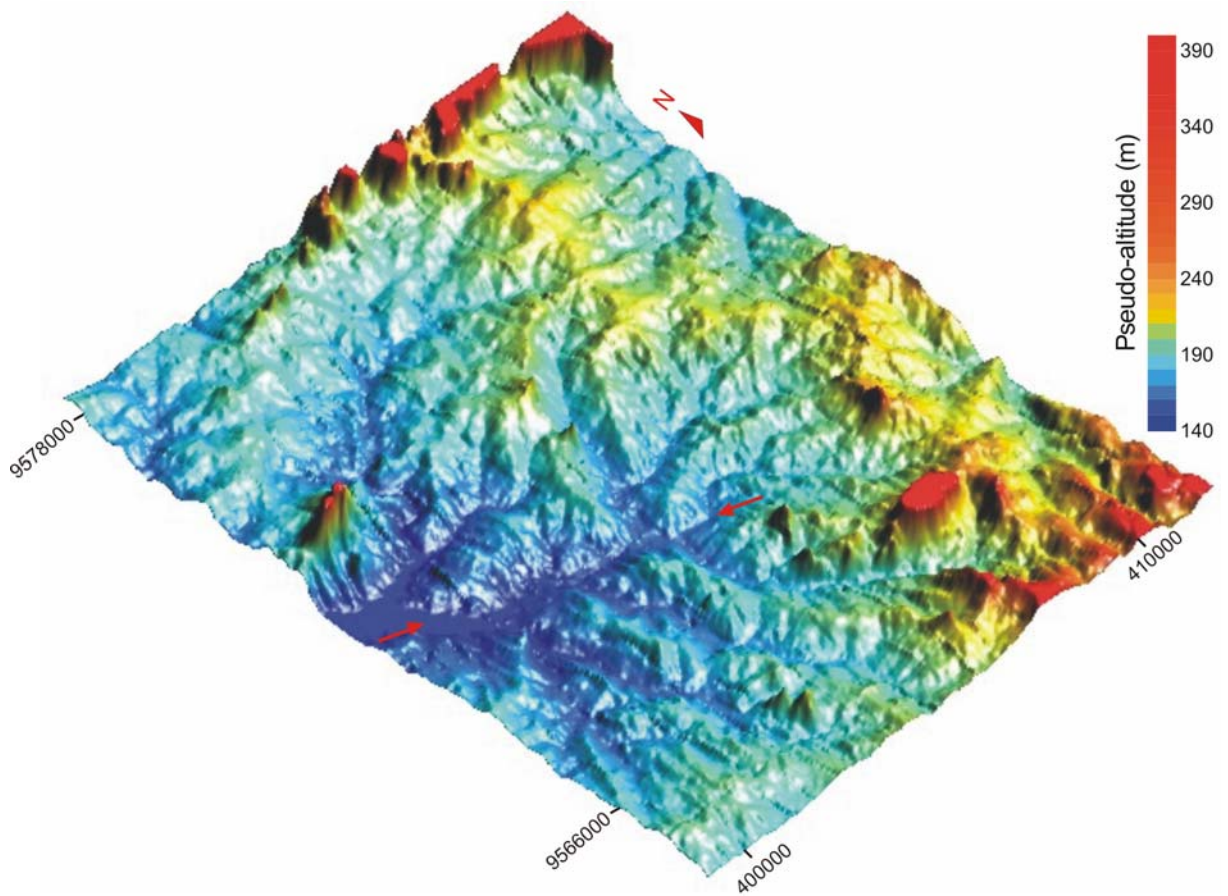


Figura 5.5 – Modelo Digital do Terreno ressaltando vales topográficos ao longo da drenagem. As setas em vermelho indicam o posicionamento do rio Juá.

5.3.3. DADOS VETORIAIS

A figura 5.6 exhibe os vetores oriundos da interpretação das composições espectrais apresentadas. Este produto corresponde a informações de natureza geológica (lineamentos estruturais) e rede de drenagem pertinente à área pesquisada. Inicialmente, foi realizada a vetorização da rede de drenagem que contribuiu significativamente na identificação seguinte de alguns lineamentos, tendo em vista que o curso de rios ou riachos pode ser controlado por zonas fraturadas do cristalino, conceito definido como Riacho-Fenda (Siqueira, 1963 *in* Coriolano, 2002). O Riacho-Fenda é facilmente reconhecido em imagens espectrais e fotografias aéreas através de trechos retilíneos e mudanças bruscas na direção (“cotovelos”) ao longo da drenagem.

A rede de drenagem da área é caracterizada principalmente pelo rio Juá (figura 5.6a) de direção noroeste-sudeste flexionando para leste-oeste, pelos seus afluentes, dispostos numa direção aproximada norte-sul e noroeste-sudeste, além de outros riachos que estão orientados nas direções nordeste-sudoeste, leste-oeste, norte-sul e noroeste-sudeste. O principal objetivo da vetorização da rede de drenagem foi de compará-la com o mapa eletromagnético aéreo de modo a avaliar sua influência neste dado geofísico, conforme apresentado e discutido no capítulo 7.

Vetores correspondentes aos lineamentos (figura 5.6b) foram exportados em formato DXF para ambiente CAD (*software* AutoCad Map 2000) onde foi medida a direção de cada lineamento em azimute, para posterior geração de um diagrama de roseta de modo a facilitar a visualização do *trend* regional destas estruturas. Desta forma, observa-se que estes lineamentos estão orientados em quatro direções predominantes: N15°Az, N50°Az, N70°Az e N320°Az.

Os lineamentos foram integrados em ambiente SIG com o mapa eletromagnético aéreo com o intuito de verificar a correlação destes com a direção das anomalias geofísicas. Dados estruturais obtidos em campo também foram utilizados nesta integração e serviram tanto para checar sua relação com as anomalias geofísicas, quanto para diferenciar os lineamentos estruturais extraídos das imagens espectrais, de outros sem importância para esta pesquisa.

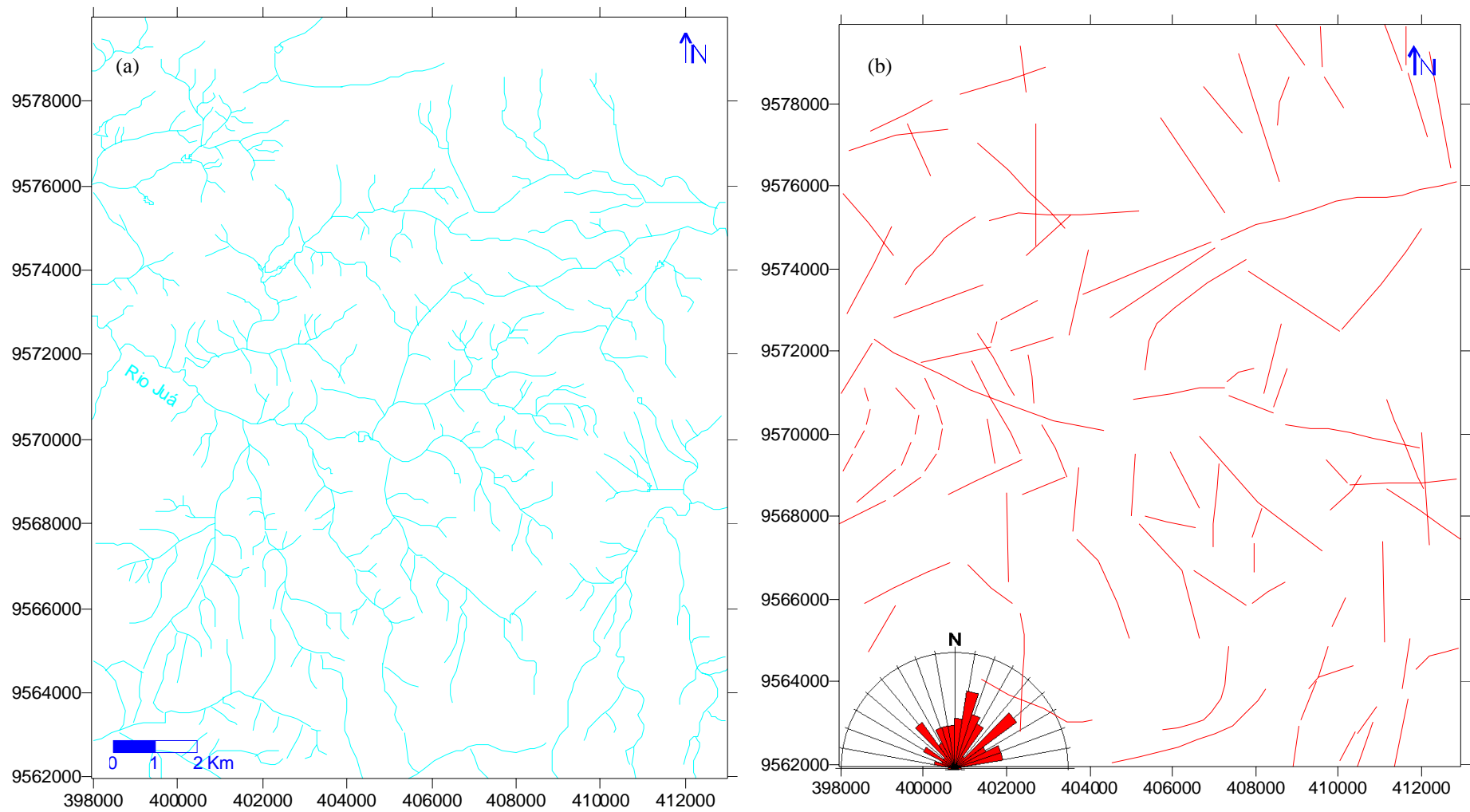


Figura 5.6 – a) Rede de drenagem característica da área. b) Lineamentos vetoriais com o diagrama de roseta exibindo a orientação principal destas feições.

5.4. FOTOINTERPRETAÇÃO

A análise de fotografias aéreas é imprescindível numa campanha de prospecção hídrica subterrânea em terrenos cristalinos, sendo realizada com o objetivo de identificar lineamentos diversos, os quais devem ser checados em campo para determinar os que correspondem realmente a estruturas geológicas rúpteis e desprezar os que representam outras feições. Como esta técnica funciona apenas como uma ferramenta auxiliar, devem ser aplicados em seguida, métodos geofísicos prospectivos ao longo dos lineamentos associados a descontinuidades mais proeminentes.

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

Para a área de estudo foram interpretadas as fotografias aéreas fornecidas pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) em escala de 1:25.000, conforme as seguintes referências: 11907, 11908, 11909, 11910, 11911, 11912, 11913, 11819, 11820, 11821, 11822, 11823, 11824, 11825, 11796, 11797, 11798, 11799, 11800, 11801 e 11802. A figura 5.8 representa um mosaico das fotografias mencionadas, as quais permitiram uma boa visualização do padrão regional de fraturamento da área. Em conjunto com o produto oriundo das imagens espectrais foram selecionadas duas áreas para prospecção hídrica por meio de métodos geofísicos, conforme mostrado na figura 5.7.

A importância da interpretação de fotografias aéreas para a referida área, deve-se ao fato de que uma feição linear distinguível em imagens de satélite, pode corresponder na realidade a diversos lineamentos perceptíveis em fotografias aéreas, isto graças a diferença de escala entre as duas informações. Portanto, foi realizado uma interpretação e extração de lineamentos em duas escalas distintas, sendo perceptível a diferença de comprimento e frequência destes lineamentos entre os mapas das figuras 5.6b e 5.8.

Após a extração dos lineamentos foi realizada a vetorização destes, com o uso do *software* AutoCad Map 2000 e de uma mesa digitalizadora tamanho A3. Em seguida, foi obtida a direção em azimute de cada lineamento, para posterior geração de um diagrama de

roseta, objetivando assim facilitar a interpretação do *trend* dos lineamentos e compará-los com os dados vetoriais oriundos das imagens espectrais.

Conforme a figura 5.8 observa-se, como esperado, uma boa correlação da direção entre os lineamentos desta com os apresentados na figura 5.6b. Desta forma, ocorre uma predominância de lineamentos de direção nordeste seguidos pelos de direção noroeste.

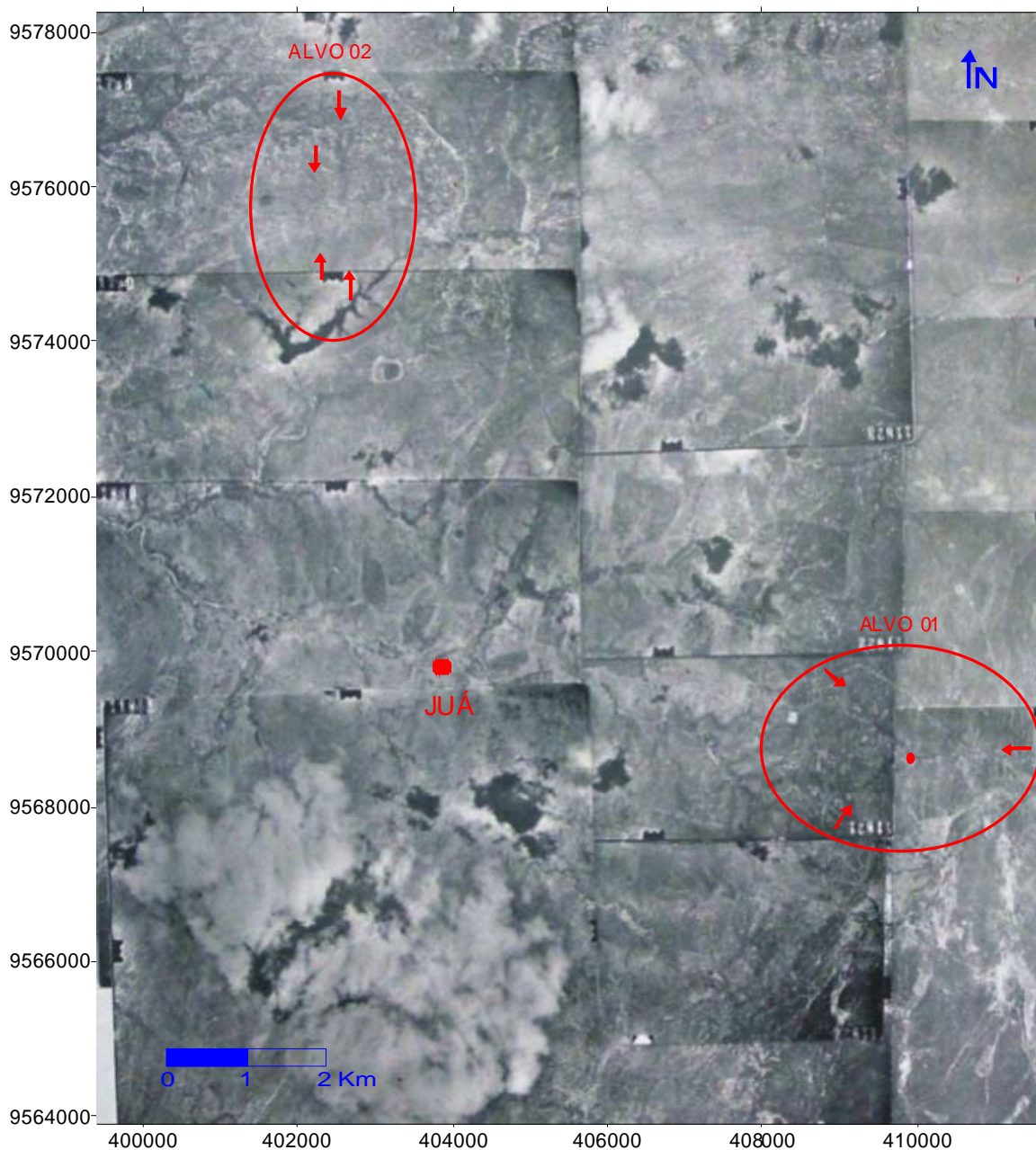


Figura 5.7 – Mosaico das fotografias aéreas correspondente a área de pesquisa, exibindo ainda as duas áreas que foram definidas para a prospecção hídrica por métodos geofísicos. As setas indicam as estruturas investigadas.

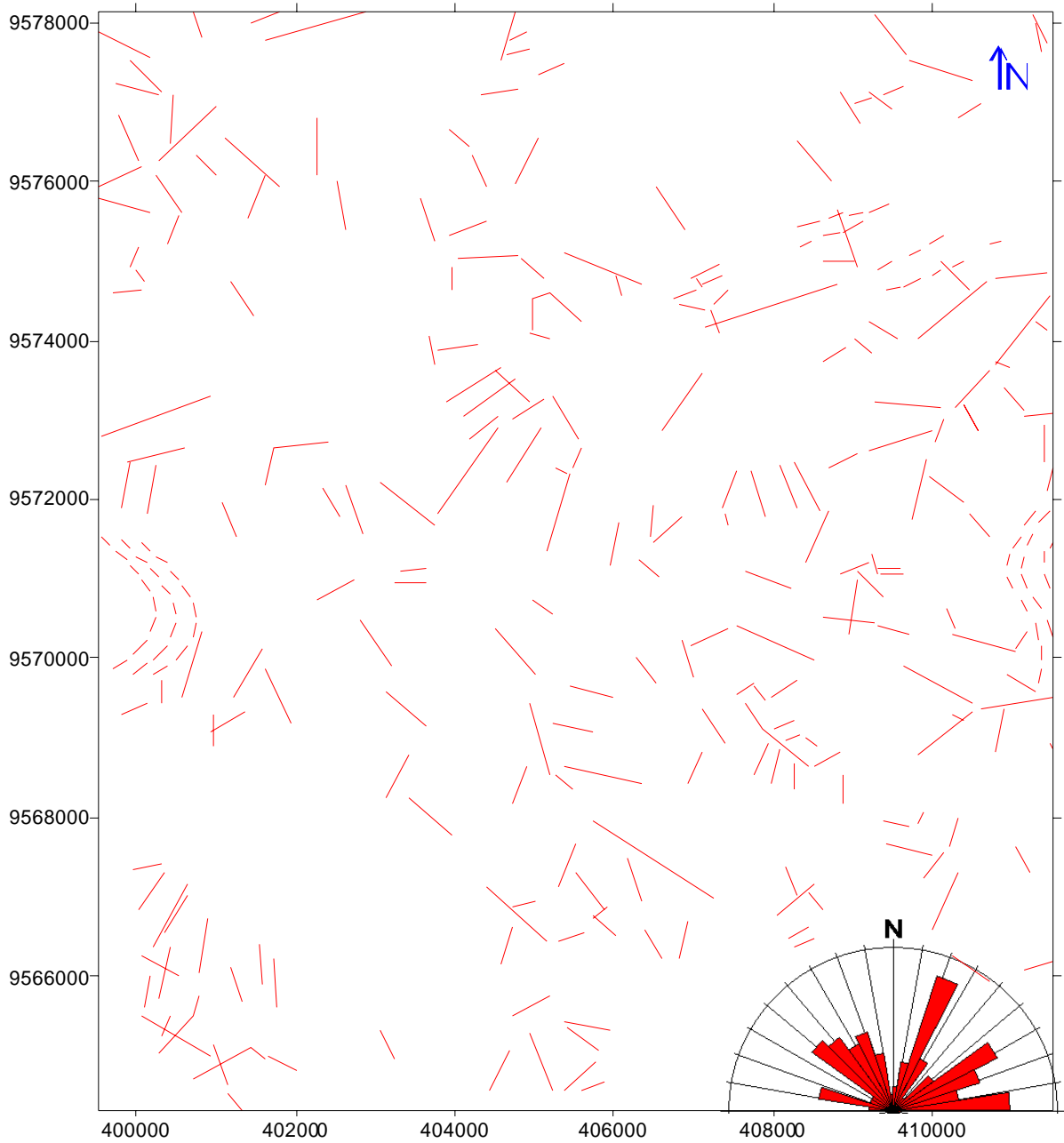


Figura 5.8 – Mapa exibindo lineamentos oriundos das fotografias aéreas que abrangem a área.

Capítulo 6

6. GEOFÍSICA DE PROSPECÇÃO

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão inicialmente apresentadas informações referentes à teoria dos métodos geofísicos aqui aplicados (eletromagnético e elétrico) e, em seguida, serão discutidos a aquisição dos dados e os resultados obtidos a partir destas técnicas, tendo em vista os dois propósitos prospectivos referidos no início desta Dissertação. O primeiro corresponde à análise dos dados aeroeletromagnéticos (adquiridos nas frequências de 4.500 Hz e 900 Hz) através da sua comparação com os dados de condutividade aparente, obtidos nesta pesquisa com o uso do equipamento EM34-3XL (geofísica terrestre), e através dos valores de resistividade aparente, oriundos de um levantamento de eletrorresistividade por meio de caminhamento elétrico, com o uso do arranjo Dipolo-Dipolo (item 6.4). Já o segundo propósito, corresponde a uma prospecção hídrica subterrânea por meio dos métodos geofísicos terrestres citados, além da análise de vetores oriundos de imagens de satélite, fotografias aéreas e dados geológicos de campo (item 6.5). Objetivando simplificar a apresentação dos resultados, adotou-se o termo anômalo para fazer referência a zonas de condutividade proporcionalmente elevada e resistividade relativamente baixa.

A geofísica de prospecção tem como finalidade investigar feições da subsuperfície, de dimensões relativamente pequenas, a partir da observação de seus efeitos nos campos físicos e na propagação de ondas (Luiz & Costa e Silva, 1995). As propriedades físicas, intrínsecas aos materiais naturais, utilizadas pela geofísica de prospecção e os métodos geofísicos associados, estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 6.1 – Relação entre propriedades físicas dos materiais e métodos geofísicos associados.

PROPRIEDADE FÍSICA	MÉTODO GEOFÍSICO
Densidade	Método Gravimétrico ou Gravimetria
Susceptibilidade Magnética	Método Magnético ou Magnetometria
Condutividade Elétrica	Métodos Elétricos e Eletromagnéticos
Radioatividade	Método Radiométrico ou Radiometria
Elasticidade	Método Sísmico ou Sísmica
Condutividade Térmica	Método Térmico ou Termometria
Luminescência	Método da Luminescência

6.2. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

De acordo com Reynolds (1997), os métodos eletromagnéticos (EM) recebem duas classificações principais: Sistemas que operam no domínio do tempo (TEM), onde os equipamentos adquirem os dados em função do tempo e Sistemas que operam no domínio da frequência (FEM), onde os instrumentos envolvidos usam uma ou mais frequências para adquirir o dado. Estes métodos podem ser ainda Passivo, caracterizado por registrar sinais naturais oriundos do terreno, ou Ativo, onde se utiliza um transmissor eletrônico para dar início ao processo de indução eletromagnética.

A aquisição dos dados de condutividade elétrica do terreno pode ser realizada de três modos distintos: Levantamento Terrestre, onde os instrumentos de aquisição são posicionados diretamente sobre a superfície do terreno; Levantamento Aéreo, no qual os equipamentos são acoplados a aeronaves e em seguida é realizado um voo sobre o alvo de interesse e Levantamento Marinho, onde os instrumentos geofísicos são transportados por embarcações.

Os métodos EM são fundamentados no princípio de indução eletromagnética e registram a resposta oriunda da interação entre uma onda eletromagnética e a subsuperfície do terreno (Reynolds, 1997). Esta onda EM é composta por um campo elétrico (E) e por um campo magnético (H) (figura 6.1) e pode ser gerada através do fluxo de corrente alternada ao longo de uma bobina transmissora constituída por fios condutores.

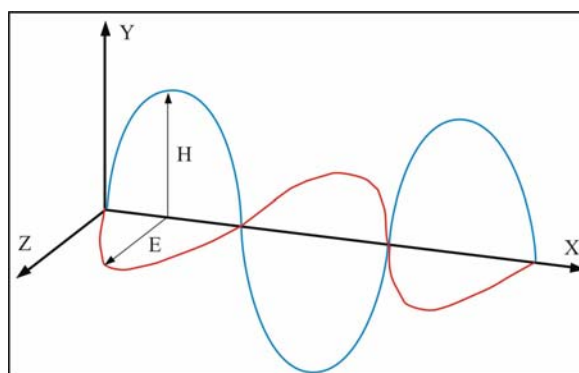


Figura 6.1 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética.
(H) campo magnético, (E) campo elétrico.

Na aplicação do método EM, uma corrente elétrica alternada com frequência definida e proveniente da unidade de transmissão, circula pela bobina transmissora produzindo um campo magnético primário alternado (H_p), que por sua vez induz correntes elétricas secundárias no subsolo, sendo estas responsáveis pela geração de um campo magnético

secundário (H_s). Parte deste campo magnético é sentida pela bobina receptora, que também recebe da bobina transmissora, por meio do cabo de referência, parte do campo magnético primário (figura 6.2). Embora os dois campos, primário e secundário, oscilem com a mesma frequência, eles atingem seus máximos em tempos diferentes, significando que eles apresentam-se defasados em tempo. Comumente, os sistemas eletromagnéticos são desenhados para separarem o campo secundário em duas componentes, uma delas perfeitamente em fase com o campo primário e a outra fora de fase, com atraso de $\frac{1}{4}$ de período em relação ao campo primário.

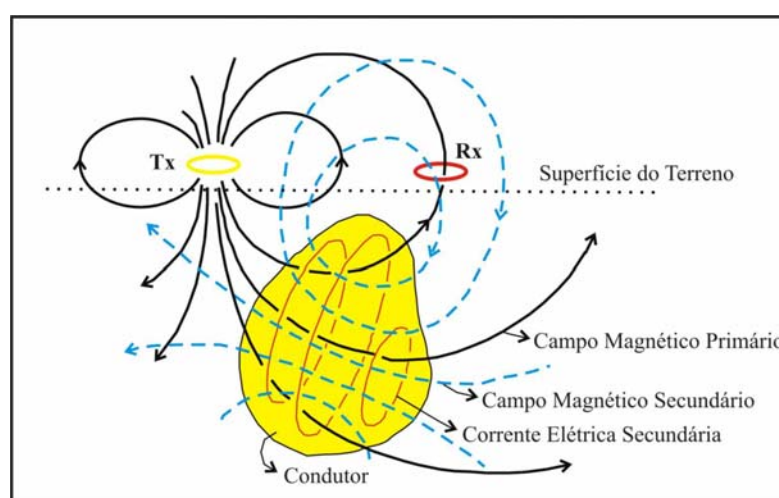


Figura 6.2– Esquema simplificado da aquisição de dados com o EM34. (Modificado de Reynolds, 1997).

A profundidade de investigação corresponde a um dos principais fatores de um levantamento EM, sendo uma função da frequência utilizada e do valor médio da condutividade dos materiais por onde a radiação eletromagnética passa.

Dentre todos os métodos geofísicos existentes, o eletromagnético possui a maior variedade de instrumentos, devido principalmente a notável quantidade de aplicações desta técnica. As principais aplicações deste método, independente do instrumento utilizado, são:

1. Exploração mineral;
2. Pesquisa de água subterrânea;
3. Mapeamento de plumas contaminantes;
4. Mapeamento de aterros;
5. Detecção de cavidades naturais e artificiais;
6. Localização de falhas geológicas, etc;
7. Mapeamento geológico.

6.2.1. SISTEMA ELETROMAGNÉTICO AÉREO

Os dados aeroeletromagnéticos (condutividade aparente) foram adquiridos pelo equipamento modelo Aerodat-DSP-99, que opera em cinco faixas de frequência. Este sistema é composto por dois pares de bobinas (transmissora/receptora) em modo coaxial (DH – Dipolo Horizontal) e por três pares de bobinas em modo coplanar (DV – Dipolo Vertical), sendo o espaçamento entre as bobinas de 6,4 m. No modo coaxial, as bobinas ficam na posição vertical e a profundidade de investigação é mais superficial, já em modo coplanar as bobinas posicionam-se na horizontal e o campo eletromagnético alcança uma maior profundidade. A tabela 6.2 exibe a relação entre bobinas e frequências utilizadas.

Tabela 6.2 – Relação entre configuração das bobinas e frequências utilizadas durante a aquisição dos dados.

Configuração das Bobinas	Frequência (Hz)
Baixa frequência - Coaxial (DH)	900
Baixa frequência - Coplanar (DV)	900
Média frequência - Coaxial	4.500
Média frequência - Coplanar	4.500
Alta frequência - Coplanar	33.000

O sistema de bobinas foi rebocado por uma aeronave (Helicóptero modelo Esquilo HB350) a uma distância de 30 m da superfície. O voo foi realizado na direção leste-oeste numa velocidade de 144 Km/h, sendo a distância entre as linhas de voo de 100 m e o intervalo de aquisição dos dados de condutividade de 0,1 segundo. As linhas de controle foram na direção norte-sul, com espaçamento de 500 m entre elas. Desta forma, foram adquiridos mais de 570.000 valores de condutividade para cada configuração das bobinas e frequência relacionada. Estes valores estão dispostos no formato XYZ, sendo XY as coordenadas geográficas de cada ponto de medida e Z, a condutividade aparente também de cada ponto.

6.2.2. SISTEMA ELETROMAGNÉTICO TERRESTRE (EM34-3XL)

O equipamento EM34-3XL, utilizado na aquisição terrestre dos dados de condutividade aparente do subsolo, corresponde a um sistema FEM *Slingram* e foi desenvolvido pela *Geonics Limited* com o objetivo de aplicar técnicas eletromagnéticas de indução como uma alternativa aos levantamentos elétricos que empregam técnicas galvânicas

para medir a resistividade elétrica aparente. Desta forma, com a utilização deste equipamento, é possível mapear a condutividade da subsuperfície do terreno de maneira célere, ao contrário da outra técnica mencionada. Ademais, este equipamento é capaz de abranger uma gama de profundidades interessantes para Geofísicos, Geólogos e outros profissionais de áreas afins (Mcneill, 1980).

Atualmente o equipamento EM34-3XL tem sido largamente empregado na prospecção hidrogeológica e em estudos de natureza ambiental, como na identificação e mapeamento de contaminantes diversos. Entretanto, além das aplicações mencionadas acima, este instrumento tem outras aplicabilidades como listado abaixo:

- Mapeamento de intrusão salina;
- Mapeamento do topo do embasamento em subsuperfície;
- Exploração arqueológica;
- Localização de tubos e condutores metálicos.

Conforme ilustra a figura 6.3, o equipamento em apreço, já montado para operação, é constituído por uma bobina transmissora e por uma bobina receptora conectadas respectivamente a uma unidade de transmissão e a uma de recepção, por meio de cabos específicos. Ambos os conjuntos citados (transmissor - Tx e receptor - Rx) são interconectados por um cabo de referência, cujo comprimento pode ser de 10, 20 ou 40 m.

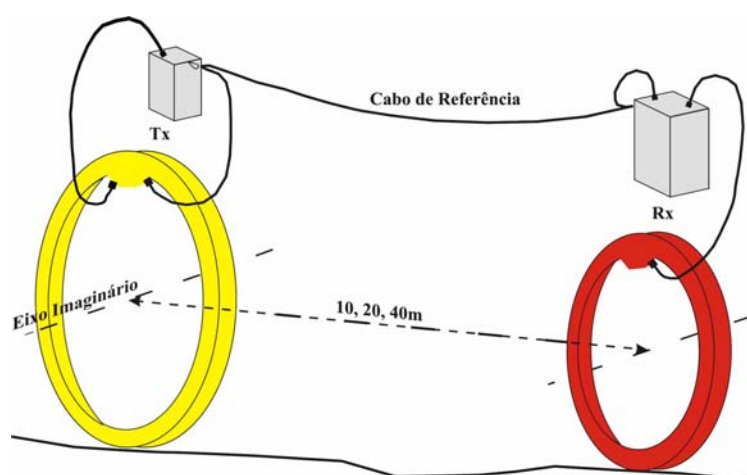


Figura 6.3 - Ilustração do equipamento EM34-3 em modo dipolo horizontal (DH).

Com o sistema EM34-3XL é medida a componente fora de fase da razão entre os campos primário e secundário.

Em geral, o campo magnético secundário é uma função do espaçamento entre as bobinas (s), da frequência de operação (ω) e da condutividade do terreno (σ). Entretanto,

quando se opera dentro de uma faixa de Baixos Números de Indução (*Low Induction Numbers*) em que o produto ($\omega\sigma s^2$) é menor do que 1000, a equação abaixo pode ser empregada (Mcneill, 1980):

$$\frac{H_p}{H_s} \approx \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \dots \text{eq. 6.2}$$

Onde: H_p = Campo Magnético Primário; μ_0 = Permeabilidade Magnética do Espaço;
 H_s = Campo Magnético Secundário; σ = Condutividade Elétrica do Terreno (mS/m);
 $\omega = 2\pi f$; s = Distância entre as Bobinas (m);
 f = Frequência (Hz); $i = \sqrt{-1}$

Determinada a razão entre o campo magnético secundário e o primário (H_s/H_p) e partindo da equação apresentada acima, pode-se definir a condutividade aparente (indicada pelo instrumento) por meio da seguinte equação:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \dots \text{eq. 6.3}$$

O EM34-3XL permite aos operadores realizarem seis leituras de condutividade aparente do subsolo em cada estação de medida, uma vez que este equipamento foi desenvolvido para obter os dados de condutividade, combinando três diferentes espaçamentos entre as bobinas (10, 20, 40 m) e dois modos de dipolos: Dipolo Horizontal (DH), onde os eixos das bobinas posicionam-se na horizontal e Dipolo Vertical (DV), onde os eixos das bobinas posicionam-se na vertical.

Em estudos geofísicos de caráter prospectivo, um dos fatores de grande importância corresponde à profundidade de investigação intrínseca ao equipamento. Como já mencionado, o EM34-3XL possibilita uma gama de profundidades que são dependes do espaçamento e da orientação das bobinas (modo de dipolo). No modo dipolo horizontal (DH) a profundidade de investigação é cerca de 0,75 vezes o espaçamento entre as bobinas, enquanto que no modo dipolo vertical (DV), a profundidade de investigação é de 1,5 vezes o espaçamento entre as bobinas.

Como o referido instrumento permite a aquisição dos dados em três diferentes espaçamentos entre as bobinas (10, 20 e 40 m) é possível investigar teoricamente as

profundidades de 7,5m, 15m e 30m para o dipolo DH e 15m, 30m e 60m para o dipolo DV (tabela 6.3). Os valores de condutividade aparente são expressos em milisiemens por metro (mS/m).

A profundidade de penetração é entendida como sendo a profundidade realmente obtida em um levantamento deste tipo, assim, é diretamente controlada pelo meio. Em condições ideais de operação, a profundidade de penetração será igual à profundidade de investigação do equipamento (Cunha, 2002).

Tabela 6.3 - Profundidade teórica de investigação do EM34-3 em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo, e frequências aplicadas pelo equipamento.

Distância entre as Bobinas (m)	Frequência (Hz)	Profundidade Teórica de Investigação (m)	
		Dipolo Horizontal (DH)	Dipolo Vertical (DV)
10	6.400	7.5	15
20	1.600	15	30
40	400	30	60

Segundo a função $\phi_V(z)$ (eq. 6.4), desenvolvida para o dipolo DV, é possível determinar quanto uma camada qualquer (Dz) localizada a uma profundidade (z) contribui para o campo magnético secundário (figura 6.4a). Observa-se ainda nesta figura que o material localizado a uma profundidade de 0,4s apresenta uma maior contribuição, entretanto na profundidade de 1,5s a contribuição para o campo magnético secundário ainda pode ser considerada significativa. É importante ressaltar que, para esta configuração (DV), mudanças de condutividade próximas à superfície são imperceptíveis pelo EM34-3XL, tendo em vista que a contribuição é insignificante. Para o dipolo horizontal (DH) a função $\phi_H(z)$ (eq. 6.5) exibe uma resposta diferente, na qual pode-se observar que materiais próximos à superfície contribuem para o campo magnético secundário de maneira expressiva e que com o aumento da profundidade esta contribuição diminui progressivamente (figura 6.4b) (Mcneill,1980).

$$\phi_V(z) = \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{\frac{3}{2}}} \dots \text{eq.6.4}$$

$$\phi_H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \dots \text{eq. 6.5}$$

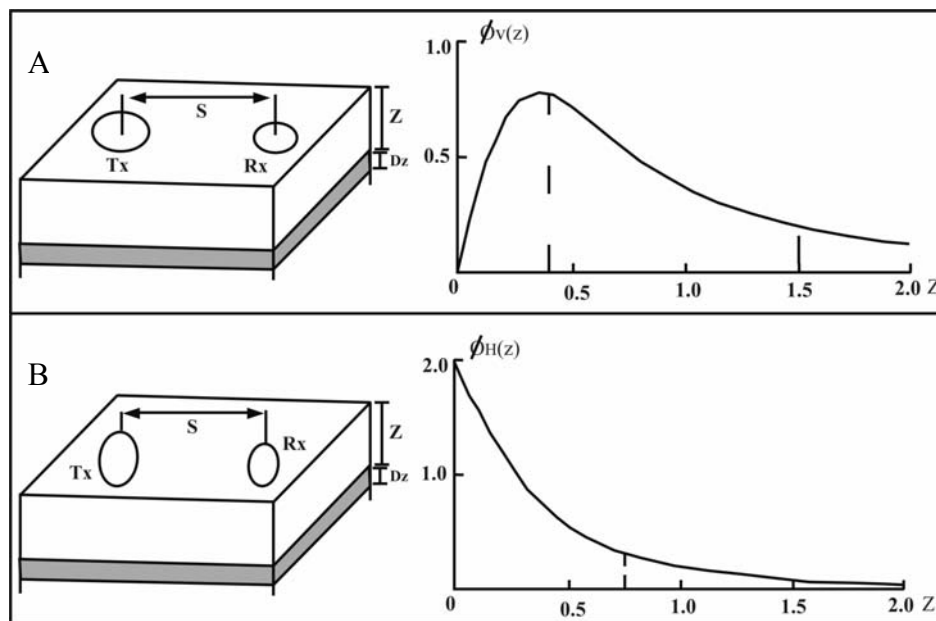


Figura 6.4 – Relação entre resposta da condutividade versus profundidade. (A) dipolo vertical, (B) dipolo horizontal. (Modificado de Mcneill, 1980).

Segundo Mcneill (1980), a relação entre a condutividade indicada pelo instrumento e a condutividade real não é linearmente proporcional para terrenos com altos valores de condutividade. Desta forma, quando a condutividade do terreno é superior a 700 mS/m, a condutividade indicada para o dipolo vertical tende a zero, podendo chegar a valores negativos (figura 6.5).

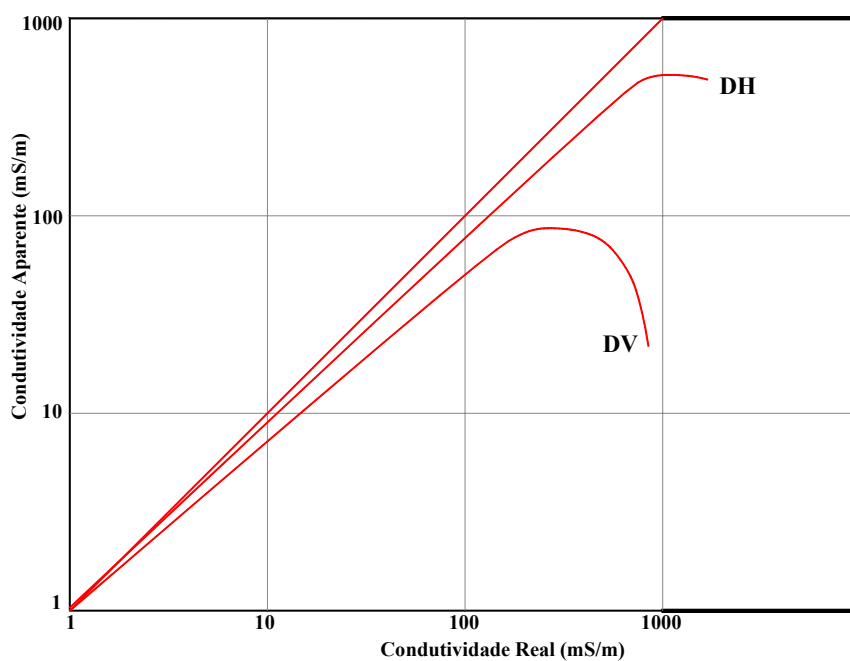


Figura 6.5 – Relação entre a condutividade real e a condutividade aparente do terreno, para os arranjos DH e DV.

6.3. MÉTODOS ELÉTRICOS - ELETRORRESISTIVIDADE

A Eletrorresistividade é um método geoeletrico que consiste em medidas de impedância com subsequente interpretação, em termos da resistividade elétrica da estruturação geológica em subsuperfície, baseado na resposta de cada material ao fluxo de uma corrente elétrica (Ward, 1990). Quando uma corrente elétrica é introduzida no solo através de dois eletrodos (A-B) usando equipamento característico (eletrorresistivímetro), esta produz uma diferença de potencial que é medida pelo equipamento através de um segundo par de eletrodos (M-N). 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).

Qualitativamente, resistividade é uma medida de dificuldade que um determinado material impõe a passagem de uma corrente elétrica, correspondendo ao inverso da condutividade. A resistividade é designada por (ρ) dada em ohm.m e a condutividade (σ) é dada em S/m, sendo a relação entre elas: $\rho = 1/\sigma$.

A aquisição da resistividade aparente do subsolo pode ser feita através da combinação de uma das três técnicas com um dos diversos arranjos propostos para o método da Eletrorresistividade (Braga, 2005). Estas técnicas consistem em (figura 6.6): **Sondagem Elétrica Vertical** (SEV), caracterizada pela investigação vertical pontual das variações do parâmetro físico com a profundidade; **Caminhamento Elétrico** (CE), que corresponde à investigação lateral das variações do parâmetro físico a uma ou várias profundidades determinadas e **Perfilagem Elétrica** (PERF), referente à investigação lateral e vertical das variações do parâmetro físico efetuadas no interior de furos de sondagens. Já os arranjos correspondem à disposição dos eletrodos na superfície do terreno (*Schlumberger*, *Wenner*, *Dipolo-Dipolo*, etc).

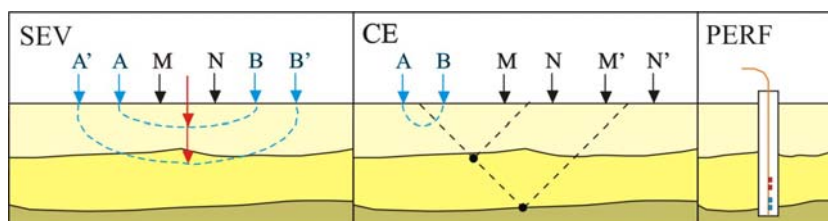


Figura 6.6 – Representação simplificada das técnicas referentes ao método da Eletrorresistividade.

6.3.1. PRINCÍPIO FÍSICO

A Lei de Ohm define uma relação empírica entre a corrente fluindo através de um condutor e o potencial de voltagem requerido para conduzir esta corrente, sendo que a corrente (I) é proporcional à voltagem (V). A constante de proporcionalidade é chamada de resistência (R) do material, assim:

$$V = R \cdot I \dots \text{eq. 6.6}$$

A propriedade responsável pela transmissão da corrente elétrica independente dos fatores geométricos associados a resistência, corresponde a resistividade (ρ), que depende da natureza e do estado físico do corpo considerado. Desta forma, pode-se definir a resistividade de um corpo através da equação 6.7.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \dots \text{eq. 6.7}$$

sendo: L = comprimento do corpo; S = área do corpo; R = resistência.

No substrato geológico ou em um corpo qualquer, a corrente elétrica não flui em apenas uma direção, sua propagação ocorre de modo radial, perpendicular às superfícies denominadas equipotenciais, sendo que em três dimensões elas formam um hemisfério centralizado nos eletrodos. As linhas de equipotenciais mais distantes dos eletrodos, indicam menores potenciais entre os eletrodos considerados.

A partir da combinação entre as equações 6.6 e 6.7, temos que a voltagem de um condutor pode ser definida como:

$$V = \rho \cdot I \frac{L}{S} \dots \text{eq. 6.8}$$

Considerando um semi-espaço de resistividades, temos:

$$R = \frac{\rho \cdot r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \dots \text{eq. 6.9}$$

Substituindo 6.9 em 6.8, temos:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \dots \text{eq. 6.10}$$

sendo: ρ = Resistividade; V = Potencial; I = Corrente;
r = Distância entre o eletrodo de corrente e o ponto de medida do potencial.

Considerando agora dois pontos de injeção de corrente (A, B) e dois pontos de medida de potencial (M, N) e, ainda, considerando que o meio investigado é homogêneo e isotrópico, temos que os potenciais medidos nos pontos M e N são dados por:

$$VM = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad VN = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \dots \text{eq. 6.11}$$

Portanto, a diferença de potencial medida pelo equipamento para determinada posição dos eletrodos MN, será:

$$\Delta V_{MN} = VM - VN \text{ assim:}$$

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \dots \text{eq. 6.12}$$

Em levantamentos geofísicos com o método da eletrorresistividade, o meio investigado (subsolo) é heterogêneo e anisotrópico, resultando em modificações do campo elétrico introduzido neste meio. Desta forma, o valor medido corresponde a uma espécie de média ponderada de todas as resistividades verdadeiras do material em subsuperfície investigado, sendo representado pela **resistividade aparente** (ρ_a) (eq. 6.13), onde a unidade de medida é dada em ohm.m.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \dots \text{eq. 6.13}$$

em que:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \dots \text{eq. 6.14}$$

sendo: K = constante que depende do arranjo geométrico dos eletrodos.

6.3.2. CAMINHAMENTO ELÉTRICO

A técnica utilizada no referido levantamento correspondeu ao caminhamento elétrico, através do qual é possível investigar, ao longo de uma seção, a variação vertical da resistividade aparente da subsuperfície a uma ou mais profundidades determinadas, ou seja, realizar um imageamento de detalhe da subsuperfície. Dentre as características, destacamos:

- O centro dos dipolos AB e MN se deslocam ao longo da linha a ser levantada;
- O espaçamento entre os eletrodos AB é igual ao MN;
- O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar;

- Cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

A figura 6.7 exemplifica a técnica e o arranjo em apreço. Nesta configuração, a resistividade aparente é calculada através da equação 6.13, porém a constante K é dada pela seguinte fórmula:

$$K = 2\pi Gx \dots \text{eq. 6.15} \quad \text{sendo:} \quad G = \frac{n(n+1)(n-1)}{2} \dots \text{eq.6.16}$$

sendo: x = Espaçamento entre os eletrodos AB ou MN

n = nível de investigação

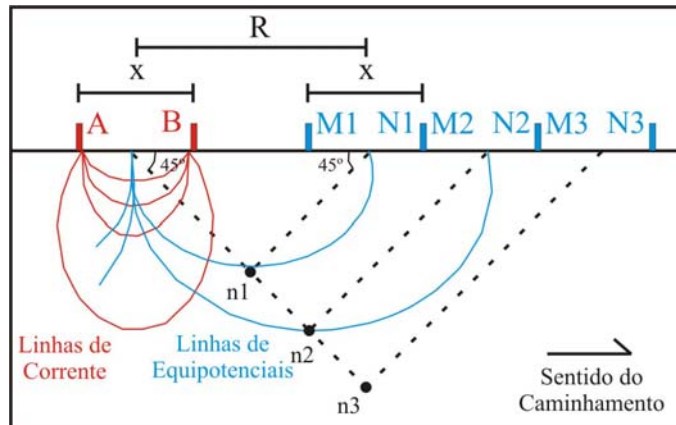


Figura 6.7 – Representação esquemática de um Caminhamento Elétrico, com o arranjo Dipolo-Dipolo.

A profundidade de investigação corresponde à profundidade na qual uma camada fina horizontalizada tem a maior contribuição no sinal total medido na superfície do terreno (Campos, 2004). Edwards (1977) utilizou coeficientes empíricos para profundidades de penetração e propôs uma pseudo-seção modificada para o arranjo dipolo-dipolo. A tabela 6.4 apresenta as profundidades de investigação em função de L (abertura entre os eletrodos extremos do arranjo utilizado).

Tabela 6.4 – Profundidade investigação para o arranjo dipolo-dipolo em função de L.

NÍVEL DE INVESTIGAÇÃO (N)	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO
1	0.139L
2	0.174L
3	0.192L
4	0.203L
5	0.211L
6	0.216L
∞	0.250L

Assim para determinar a profundidade máxima de investigação para um determinado nível, multiplica-se o valor da maior distância entre os eletrodos extremos do arranjo (L) pelo fator correspondente ao nível de investigação.

6.4. AVALIAÇÃO DOS DADOS AEROELETROMAGNÉTICOS

6.4.1. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS AEROELETROMAGNÉTICOS

Os dados aéreos de condutividade aparente da região de Juá foram adquiridos pela empresa LASA Engenharia e Prospecção S.A., através do projeto PROASNE e cedidos gentilmente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM – sede Fortaleza) para a realização desta pesquisa. Informações referentes à aquisição dos dados foram obtidas através do Relatório Final feito pela LASA (2001), que pode ser adquirido para pesquisa mais detalhada no *site*: www.proasne.net.

Para o tratamento e interpretação foram utilizados os dados adquiridos com as bobinas em modo coplanar em baixa frequência e em modo coaxial em média frequência. No primeiro caso, a configuração das bobinas combinada com a frequência de 900 Hz permite uma maior profundidade de investigação, já o modo coaxial, apesar da profundidade de investigação ser mais superficial, foi escolhido devido ser o dado apresentado e discutido no Relatório Final desenvolvido pela LASA (2001), além de ter sido uma informação base para trabalhos de prospecção hídrica subterrânea e perfuração de poços profundos na área. A figura 6.8 corresponde ao resultado do processamento dos dados aéreos realizado com o *software* Oasis Montaj pela empresa LASA, onde se observa uma alta frequência de lineamentos condutivos de direção norte-sul, interpretados pelos participantes do projeto como zonas favoráveis à captação de água subterrânea.

Informações referentes à profundidade de investigação obtida pela técnica eletromagnética aérea, não constam no Relatório Final mencionado e por este motivo não será aqui tratado. As outras três configurações (modo de dipolo e frequência) não foram utilizadas neste tratamento, devido as profundidades de investigação serem inferiores ao modo coplanar de baixa frequência.

Nesta pesquisa, o tratamento dos valores de condutividade correspondeu inicialmente na conversão das coordenadas geográficas de cada ponto amostrado para o sistema de coordenadas UTM, com o uso de um aplicativo do *software* Rockware, de modo a facilitar a interpretação integrada com outras informações cujo geoposicionamento dar-se por

coordenadas UTM. Em seguida, com o uso do *software* Surfer 8, os dados foram interpolados na forma de uma malha regular (*grid*), sendo o espaçamento da malha de 25 m e o método de interpolação o *Minimum Curvature* (os parâmetros utilizados na interpolação são os mesmos adotados pela empresa LASA). O resultado desta interpolação corresponde a dois arquivos no formato .GRD (referentes aos modos coplanar e coaxial), que foram apresentados na forma de imagens de modo a facilitar a visualização e a interpretação da condutividade aparente do terreno. Operações específicas de processamento não foram implementadas, devido não possuímos atualmente o *software* adequado (Oasis Montaj), no entanto fica como recomendação e compromisso para um trabalho futuro. A escala de cores adotada para a representação das imagens é a padrão em trabalhos geofísicos, porém houve a necessidade de ajustá-la aos valores de condutividade aparente medidos.

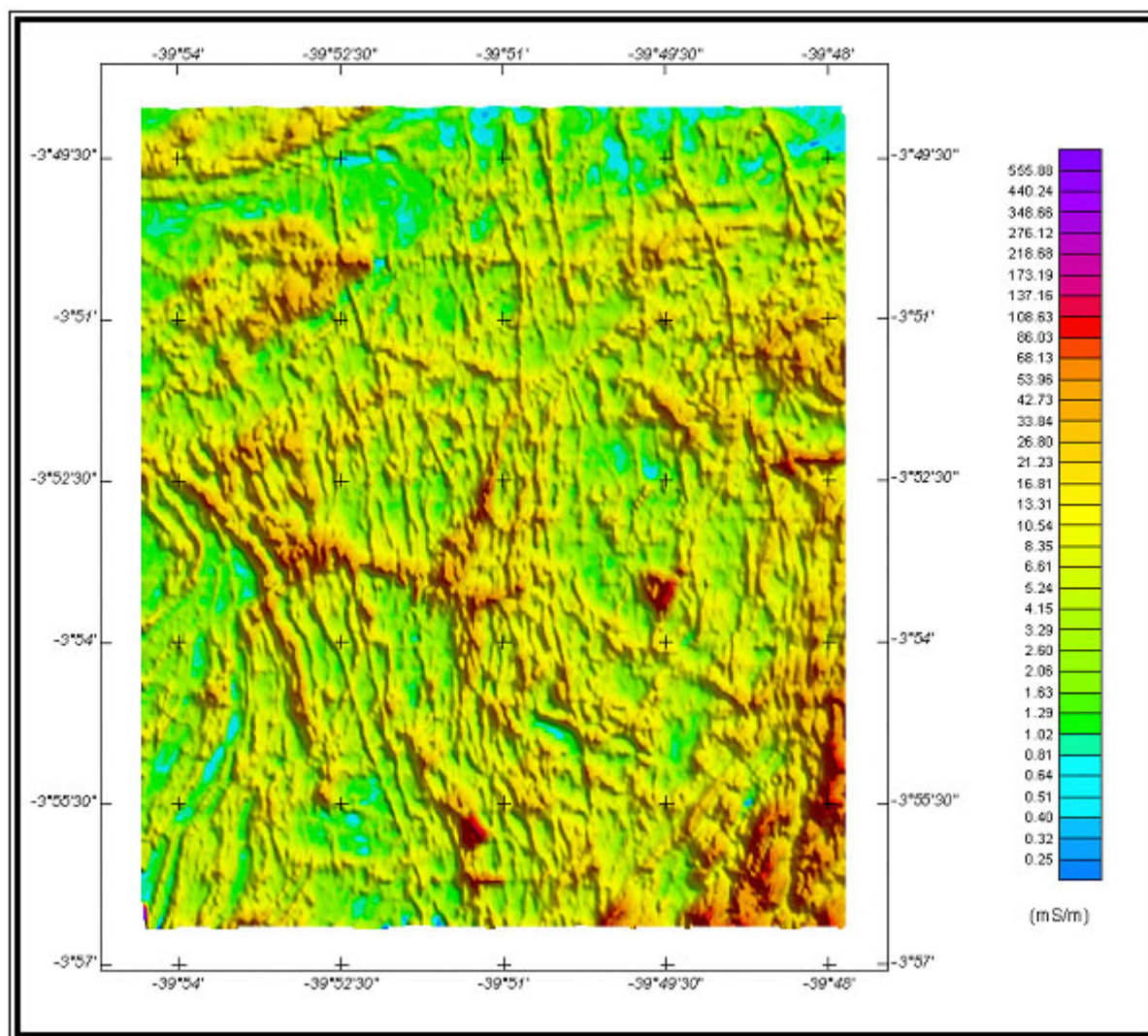


Figura 6.8 – Mapa de condutividade aparente oriundo dos dados aeroeletromagnéticos (4.500 Hz) processados com o uso do *software* Oasis Montaj pela LASA (2001).

6.4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS AEROELETRROMAGNÉTICOS

A figura 6.9 apresenta a imagem correspondente aos valores de condutividade aparente adquiridos em modo coaxial na frequência de 4.500 Hz, interpolados no *software* Surfer 8. Nesta imagem, podemos observar três intervalos principais e distintos de condutividade aparente: 0 a 10 mS/m, 10 a 40 mS/m e acima de 40 mS/m.

O primeiro intervalo de condutividade caracteriza zonas extremamente resistivas (0 a 10 mS/m) que perfazem aproximadamente 40% da área total pesquisada. Estas áreas estão apresentadas na imagem em tonalidades de azul, verde e amarelo, dispostas aleatoriamente e circundadas por zonas mais condutivas. De acordo com estas características eletromagnéticas percebemos que estas zonas não possuem nenhum potencial para o armazenamento e o fornecimento de água subterrânea, representando portando o substrato rochoso sem descontinuidades, ou pelo menos, com descontinuidades inferiores a 1 Km de comprimento.

Uma característica marcante nesta imagem, corresponde a zonas anômalas (10 a 40 mS/m) de formato linear, com dimensões quilométricas (algumas ultrapassam os 15 Km) e largura superior a 100 m, orientadas preferencialmente e aproximadamente na direção norte-sul e subordinadamente na direção leste-oeste. Na porção centro-oeste e sudoeste da imagem, observa-se que estas zonas anômalas acompanham a direção dos planos de foliação local, caracterizada por uma inflexão de nordeste para noroeste.

Marcante também é a perfeita correlação destas faixas anômalas com os cursos de drenagem, principalmente com o rio Juá, posicionado ao centro da área. Vale ressaltar que os cursos d'água podem estar condicionados por fraturas ou por vales pouco profundos, sendo que neste último caso não há interesse para a prospecção de água subterrânea, a não ser que apresente um aluvião bem espesso. O método aqui utilizado, para diferenciar as anomalias condutivas associadas a fraturas, das anomalias referentes aos vales fluviais, foi através da aplicação da técnica geofísica eletromagnética terrestre EM34-3XL, do qual tem-se o conhecimento da profundidade teórica de investigação. Informações referentes à geofísica terrestre serão apresentadas a seguir.

As zonas anômalas mais condutivas exibidas na figura 6.9, correspondem a áreas com condutividades superiores a 40 mS/m. Estas apresentam uma tonalidade de roxo e estão agrupadas principalmente ao longo do rio Juá e na porção sudeste da área. Neste último caso, as zonas anômalas podem estar associadas aos planos de foliação dos Quartzo-Xistos, que afloram nesta região, bem como a um possível fraturamento destes litotipos.

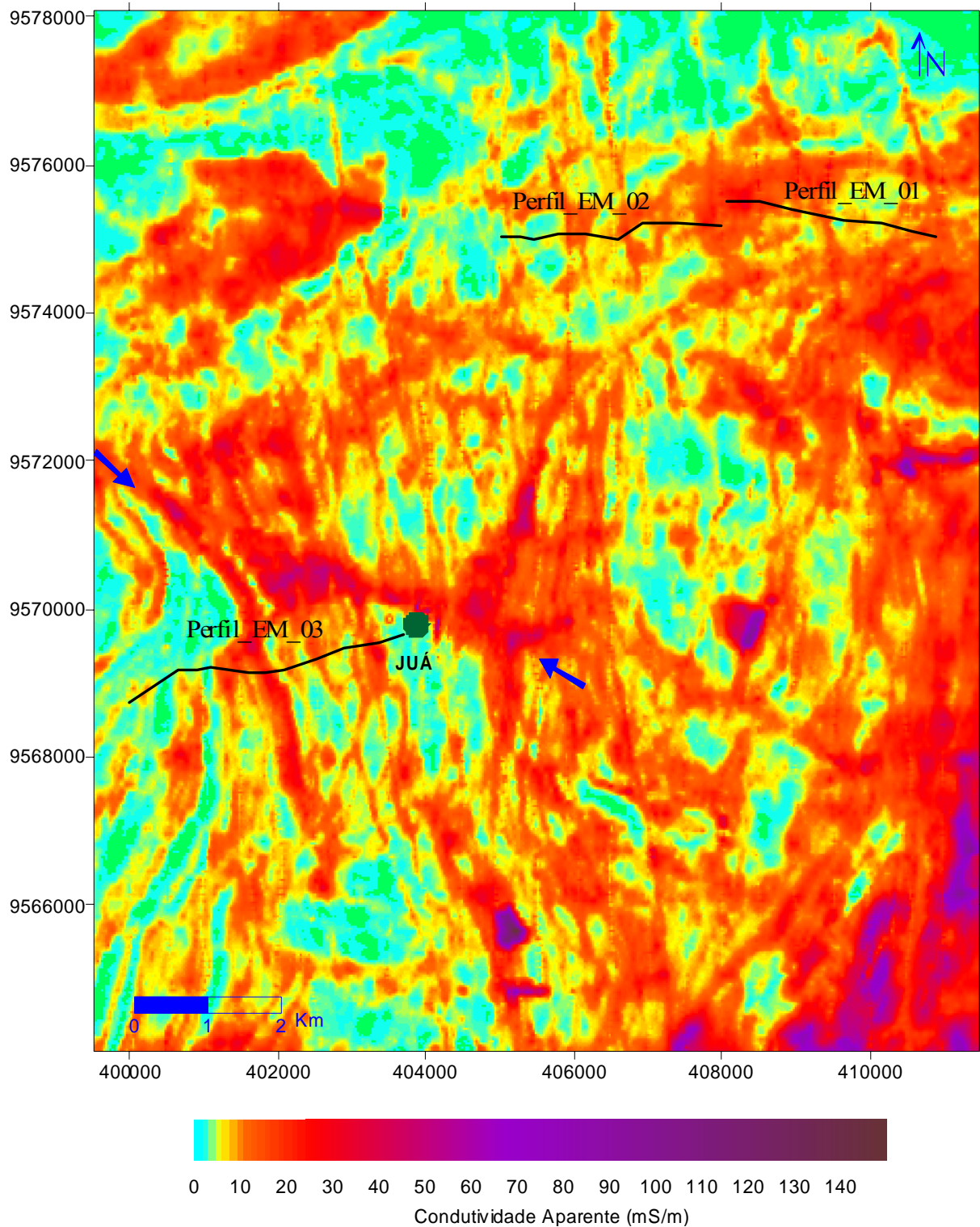


Figura 6.9 – Mapa aeroeletromagnético cujos valores de condutividade foram obtidos em modo coaxial na frequência de 4.500 Hz. Os segmentos de cor preta correspondem aos locais onde foi feito o levantamento geofísico terrestre com o uso do EM34-3XL e as setas em azul indicam o posicionamento do rio Juá.

Os valores de condutividade aparente adquiridos em modo coplanar e em baixa frequência (900 Hz) estão apresentados na forma de uma imagem na figura 6.10. De um modo geral, observa-se uma certa correlação destes dados com o resultado apresentado na figura 6.9, além do que, podem-se diferenciar os mesmos intervalos de condutividade como feito para o modo coaxial (0 a 10 mS/m, 10 a 40 mS/m e acima de 40 mS/m). Vale ressaltar que para esta configuração das bobinas e frequência relacionada (tabela 6.2), a profundidade de investigação é superior quando comparada com as bobinas em modo coaxial.

Observando a figura 6.10 com mais acuidade, percebem-se algumas diferenças importantes, como o aumento espacial das áreas com características resistivas, em detrimento da redução dos lineamentos anômalos norte-sul, cujos valores de condutividade são da ordem de 0 a 10 mS/m. Desta forma, baseado neste resultado, a área propícia para a captação hídrica subterrânea é menor, quando comparada com o dado apresentado na figura 6.9.

Os lineamentos anômalos de direção norte-sul claramente perceptíveis na figura 6.9, ocorrem com uma frequência inferior, na imagem da figura 6.10 e os de dimensão quilométrica não ocorrem mais nestes dados. Ao longo do rio Juá a anomalia condutiva ainda é bem marcante, com valores da ordem de 30 a 40 mS/m, no entanto, os seus efluentes não são mais bem caracterizados. As zonas anômalas mais condutivas (acima de 40 mS/m) ainda são características nesta imagem, porém ao longo do rio Juá, são menos visíveis. Outros lineamentos de direção norte-sul, com espaçamento constante de 500 m e com valores de condutividade aparente inferiores a 10 mS/m, são visualizados ao longo de toda a área e correspondem a ruídos associados à aquisição dos dados ao longo das linhas de controle. Estes ruídos podem ser extraídos através da aplicação de filtros específicos, porém, optou-se por apresentá-los, para devidas comparações com o dado adquirido na frequência de 4500 Hz.

As figuras 6.9 e 6.10 exibem claramente uma assinatura eletromagnética de algumas das unidades geológicas mais proeminentes constituintes da área, bem como de alguns litotipos na forma de lentes com dimensões menores. Desta forma, observa-se, na porção sudeste da área, os litotipos pertencentes à unidade superior (U_S) em tonalidade de vermelho, cujos valores de condutividade são da ordem de 20 a 40 mS/m. Esta unidade é constituída por xistos diversos, que são litotipos com descontinuidades dúcteis bem definidas (foliação) promovendo assim uma menor resistividade elétrica neste tipo de rocha em comparação com litotipos maciços ou com quantidade menores de descontinuidades. Por este motivo estrutural, está unidade exhibe valores de condutividade aparente relativamente elevados.

O contato geológico da unidade superior com a unidade média (U_M) é bem marcado, uma vez que está última é constituída predominantemente por gnaisses diversos, os quais,

apesar do bandamento gnáissico característico são mais maciços do que os xistos e, por conseguinte, possui uma resistividade elétrica maior. Desta forma, a condutividade aparente desta unidade é de aproximadamente 10 mS/m. Lentes de mármore e gnaisses (P_{sccgn}) inseridas na unidade média, são também mapeados pela técnica aeroeletromagnética. Outra unidade geológica mapeada pelo método aerogeofísico, corresponde a migmatítica (P_{smig}) posicionada na porção norte, cujos valores de condutividade são da ordem de 5 mS/m.

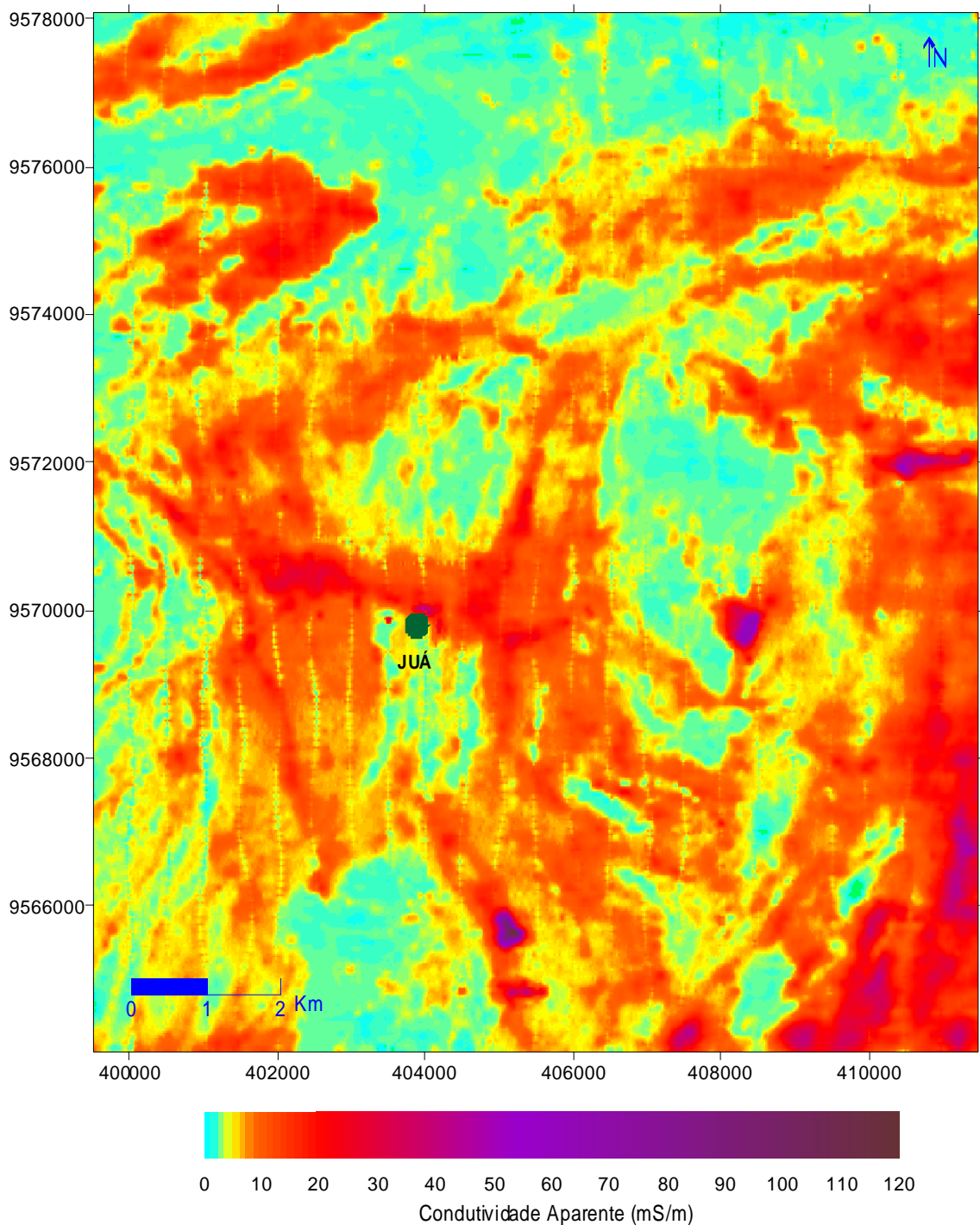


Figura 6.10 – Mapa aeromagnetométrico referente ao modo coplanar (900 Hz).

6.4.3. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS ELETROMAGNÉTICOS TERRESTRE

A aquisição dos dados de condutividade aparente foi realizada com dois objetivos específicos de modo a alcançar o objetivo principal proposto. Desta forma, numa primeira etapa de campo, foi feito um perfil da extremidade leste até a extremidade oeste da área (segmentado em três partes) além de cinco perfis nas proximidades de poços profundos, com o intuito principal de comparar com o dado geofísico aeroeletromagnético. Portanto, estes perfis foram executados de modo a cruzar os lineamentos anômalos de direção norte-sul, apresentados no mapa aerogeofísico cuja frequência é de 4.500 Hz (figura 6.8 e 6.9). A segunda etapa de campo correspondeu a levantamentos elétricos e eletromagnéticos terrestre de detalhe, objetivando identificar uma área propícia à captação de água subterrânea no meio cristalino, conforme descrito no item 6.5. A obtenção dos dados foi feita com a utilização das seis configurações de bobinas permitidas pelo equipamento EM34-3XL.

A escolha dos locais onde foram realizados os três segmentos do perfil mais extenso foi baseada na combinação entre a maior frequência de lineamentos anômalos do mapa eletromagnético aéreo e ao meio de acesso necessário para o caminhamento terrestre de modo a não danificar o equipamento utilizado. Estes segmentos são denominados de Perfil_EM_01, 02 e 03 e foram realizados aproximadamente na direção leste-oeste, com o espaçamento entre as estações de leituras de 40 m (figura 6.11). O primeiro perfil foi feito no sentido leste-oeste, com 2.800 m de comprimento e totalizando 420 dados de condutividade aparente. O Perfil_EM_02, realizado no sentido oeste-leste, resultou em 3.040 m de comprimento e 456 dados levantados. Dentre estes, o mais extenso foi o Perfil_EM_03 com 3.840 m de comprimento e 576 valores de condutividade medidos, sendo o sentido do levantamento de oeste para leste. É importante ressaltar que entre dois pontos de medidas da técnica geofísica aérea (espaçados 100 m), foram adquiridos mais dois pontos com a técnica EM34-3XL (espaçados 40 m), indicando assim que o levantamento terrestre foi realizado com maior detalhe.

Os perfis realizados nas proximidades de alguns poços profundos existentes na área foram nomeados de acordo com a referência do respectivo poço (Perfil_EM_51, 221, 222 e 223) (figura 6.11). Neste caso, o levantamento geofísico foi de detalhe, sendo o espaçamento entre as estações de leitura de 10 m e a orientação dos perfis na direção leste-oeste. Excetuando o Perfil_EM_221, os demais corresponderam a 110 m de comprimento, com o centro do perfil coincidente com o poço profundo, resultando assim em 11 estações de leitura

e 66 valores de condutividade aparente medidos, para cada perfil. O Perfil_EM_221 foi mais extenso, com 150 m de comprimento e 90 valores adquiridos. A escolha da orientação destes perfis foi feita com base nos dados do levantamento aeroeletromagnético 4.500 Hz (perpendicular às anomalias). Além destes, foi realizado outro perfil eletromagnético nas proximidades do poço 51 (Perfil_EM_51b), porém de direção norte-sul e com 130 m de comprimento.

A tabela 6.5 apresenta informações referentes às coordenadas, inicial e final, de cada perfil eletromagnético, já a figura 6.12 mostra algumas fotografias obtidas durante os trabalhos de campo relacionados à aquisição dos valores de condutividade aparente do subsolo.

Tabela 6.5 – Apresentação das coordenadas UTM do início e do final de cada perfil eletromagnético.

Perfil	Coordenada UTM	
	Inicial	Final
EM_01	410.865; 9.575.056	408.090; 9.575.531
EM_02	405.062; 9.575.068	407.956; 9.575.200
EM_03	399.994; 9.568.785	403.691; 9.569.683
EM_51	402.033; 9.567.852	401.924; 9.567.819
EM_51b	401.935; 9.567.894	401,935; 9.567.764
EM_221	409.341; 9.575.322	409.210; 9.575.339
EM_222	403.125; 9.567.816	403.021; 9.567.792
EM_223	402.449; 9.566.629	402.536; 9.566.629

O tratamento dos dados adquiridos em campo, consistiu inicialmente na transposição destes para meio digital e em seguida, na interpolação com o uso do *software* Surfer 8, método da *Krigagem*, gerando assim uma malha regular (*grid*). Estes dados foram apresentados na forma de pseudo-seções, que permitem uma visualização da condutividade do terreno até a profundidade teórica do equipamento (60 m). A escala de cores adotada obedece aos padrões geofísicos internacionais. Os dados aqui adquiridos não passaram por processos de inversão ou modelagem matemática, portanto a interpretação dos mesmos foi de forma qualitativa.

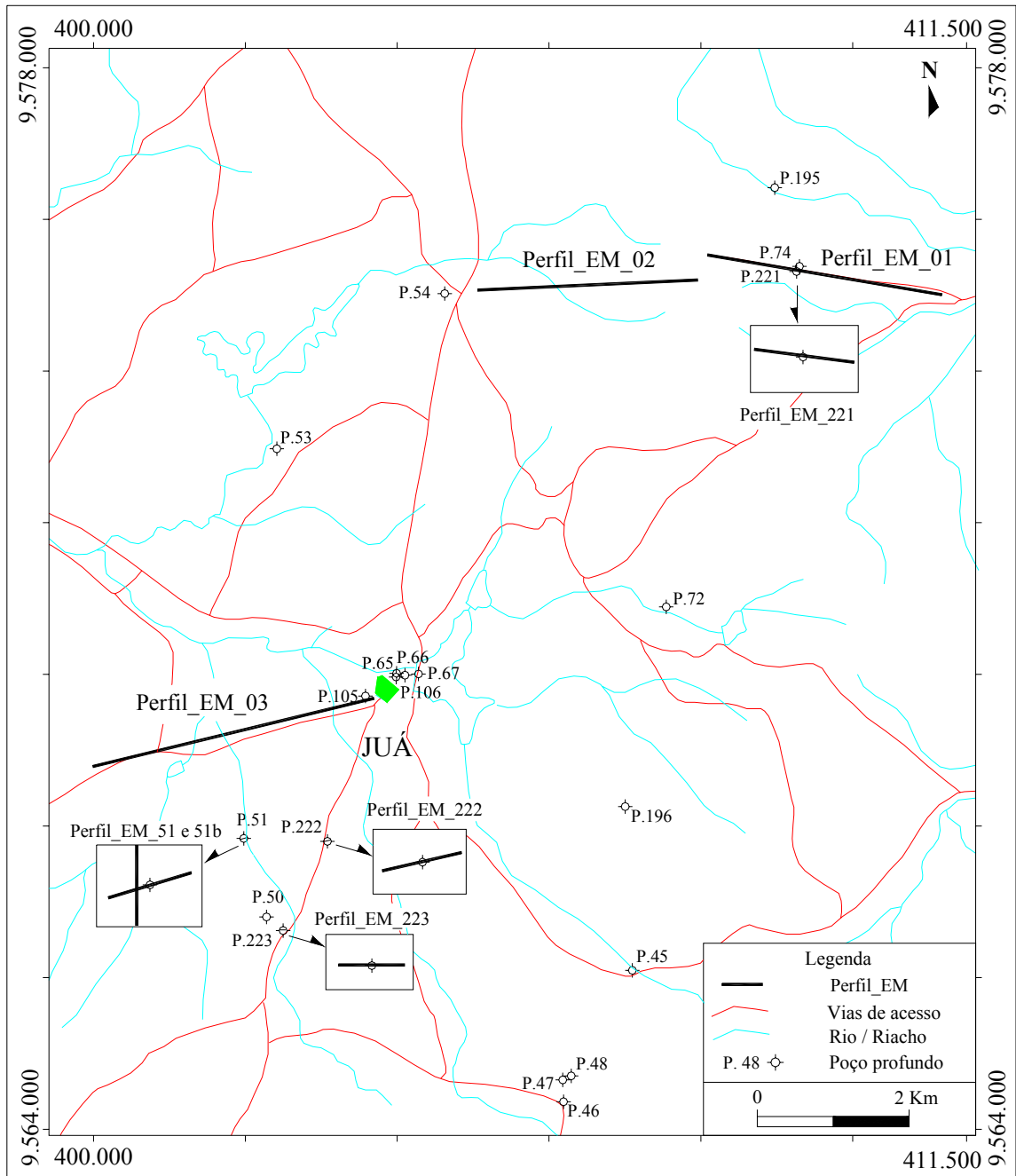
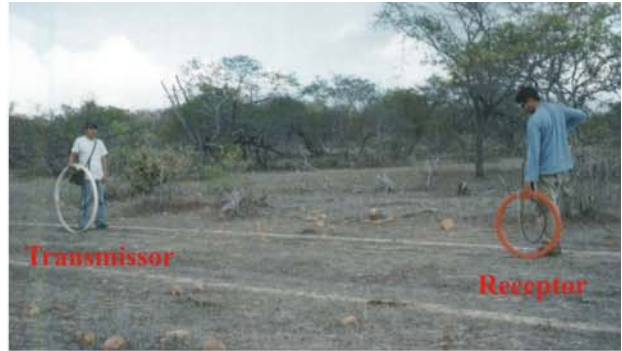


Figura 6.11 – Mapa da área de pesquisa exibindo o posicionamento e a direção dos perfis eletromagnéticos terrestres, com ampliação dos perfis realizados próximos aos poços profundos, de modo a facilitar a visualização destes.

Fotografia exibindo a realização do Perfil_EM_03 com o equipamento EM34-3XL em modo dipolo horizontal, com espaçamento entre as bobinas de 20 m. Esta estação corresponde a primeira das 96 estações medidas neste perfil.



Levantamento eletromagnético realizado nas proximidades do poço profundo 51. O referido poço está na casa visualizada ao fundo da fotografia. Por trás da plantação de coqueiros está o riacho referido no texto. Modo dipolo vertical.

Fotografia exibindo a aquisição dos dados de condutividade com o equipamento EM34-3XL em modo dipolo horizontal. Esta aquisição foi realizada próximo ao poço 221.



Perfil geofísico eletromagnético executado próximo ao poço profundo 222. Modo dipolo horizontal.

Levantamento eletromagnético realizado perto do poço profundo 223, com o EM34-3XL em modo dipolo vertical e espaçamento entre as bobinas de 10 m.

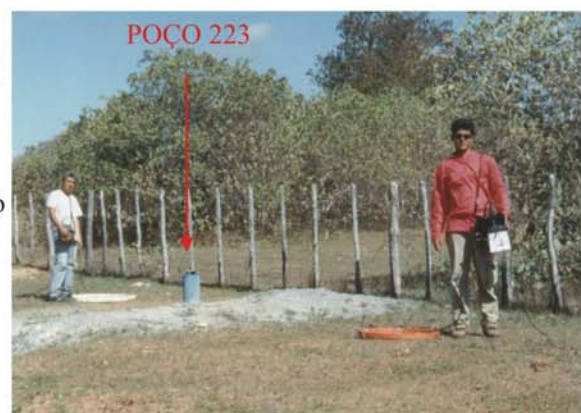


Figura 6.12 – Fotografias exibindo o levantamento geofísico terrestre com o uso do equipamento EM34-3XL.

6.4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ELETROMAGNÉTICOS TERRESTRES

Perfil_EM_01

Analisando a figura 6.13, que representa a configuração da condutividade aparente em subsuperfície, observa-se que a resposta desta propriedade física é variável ao longo do perfil em comprimento e em profundidade. Até os primeiros 1000 m do perfil, o terreno apresenta-se pouco condutivo na porção mais superficial, sendo que os valores decrescem de 30 a 20 mS/m. A partir da profundidade de 20 m, o comportamento elétrico do terreno muda bruscamente, tornando-se resistivo com valores de condutividade de aproximadamente 10 mS/m. Neste segmento do perfil não foram identificadas anomalias condutivas e penetrativas típicas de zonas favoráveis ao armazenamento de água subterrânea, no entanto, o solo e os litotipos são perfeitamente mapeáveis e visualizados em todo o perfil.

No segundo trecho do perfil, entre 1000 a 1280 m e 1400 a 1720 m, ocorrem, até a profundidade aproximada de 10 m, zonas mais condutivas (50 mS/m) associadas provavelmente a uma maior umidade do solo, tendo em vista a homogeneidade e dimensões destas. Zonas anômalas com condutividade da ordem de 80 mS/m, foram detectadas nos pontos 1240 e 1560, porém até uma profundidade máxima de 10 m, não representando portanto, áreas favoráveis para a prospecção hídrica neste tipo de terreno. É importante ressaltar que no ponto 1560 foi perfurado atualmente o poço profundo 221 que resultou em improdutivo e que já existia um poço também improdutivo (74). Nos pontos 1240 e 1680, ocorrem anomalias penetrativas típicas de descontinuidade, porém não apresentam correlação com lineamentos anômalos exibíveis no mapa aeroeletromagnético de 4.500 Hz (figura 6.9).

A partir de 2000 m, o terreno apresenta-se mais condutivo, destacando as zonas anômalas entre 2160 a 2360 m e 2480 a 2640 m, que devem estar associadas a um solo mais espesso e úmido. Outra característica importante é a ocorrência de zonas anômalas mais penetrativas, cujos valores são da ordem de 20 a 30 mS/m. Assim, a zona anômala penetrativa posicionada entre os pontos 2080 e 2120, corresponde a uma descontinuidade favorável a captação hídrica subterrânea e a anomalia entre 2360 e 2480 m, pode também ser favorável à captação hídrica subterrânea. Desta forma, foi realizado um caminhamento elétrico entre os pontos 2120 e 2520, de modo a definir a existência de descontinuidades.

Ao longo deste perfil, foram cruzados nos pontos 10, 280, 440, 880, 1080, 1520, 1840 e 2560, lineamentos anômalos característicos do mapa aeroeletromagnético (4.500 Hz), no entanto, somente no último ponto (2560) ocorre uma anomalia penetrativa na pseudo-seção concordante com estes lineamentos.

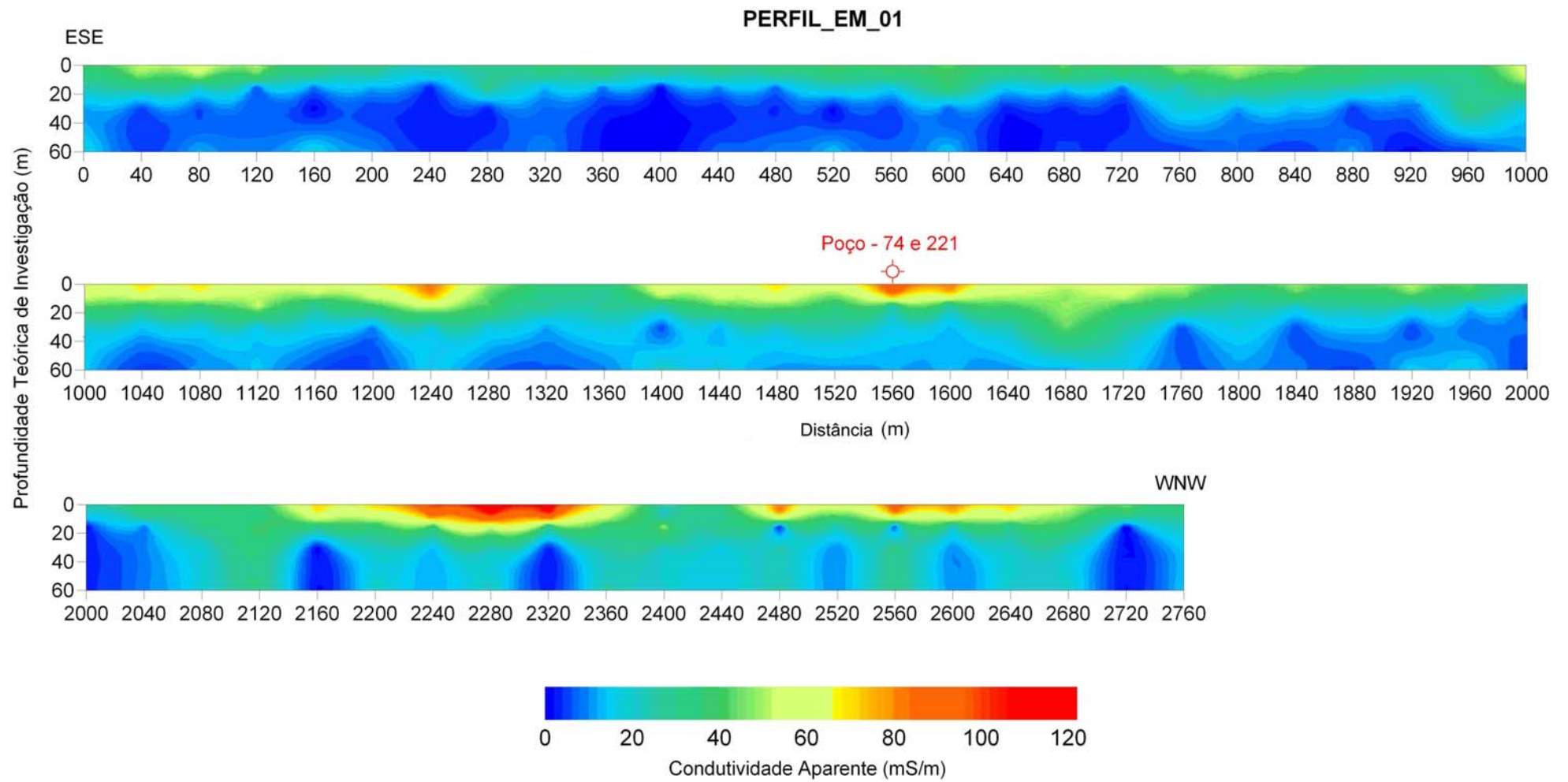


Figura 6.13 – Pseudo_seção referente ao Perfil_EM_01, representando a variação da condutividade aparente da subsuperfície.

Perfil_EM_02

O Perfil_EM_02 (figura 6.14) apresenta em geral dois tipos de resposta ao campo eletromagnético indutivo. O primeiro caracteriza uma região com valores de condutividade da ordem de 10 a 30 mS/m até uma profundidade de 15 a 20 m. Estes valores de condutividade podem estar representando as camadas de solo existentes na região. Ultrapassando a profundidade de 20 m, ocorre uma diminuição da condutividade aparente da subsuperfície, para valores inferiores a 10 mS/m, caracterizando assim os litotipos correspondentes ao substrato rochoso. De um modo abrangente há uma boa correlação entre os dados apresentados na figura 6.14 e os dados do Perfil_EM_01 (figura 6.13).

A 1840 m no início do perfil, ocorre uma zona anômala, cujo valor da condutividade aparente é em torno de 80 mS/m, porém sua profundidade de penetração é de apenas 10 m, não representando zonas de fraturas propícias ao armazenamento de água subterrânea. No início do perfil, mais especificamente nos pontos 40 e 360 e no final do perfil (2960-3000 m), observa-se, respectivamente, três zona anômala penetrativa cujo valor de condutividade é da ordem de 40 mS/m. No entanto, não foi identificado nenhum lineamento estrutural através das fotografias aéreas, imagens de satélite e afloramento em campo nestes pontos, o que torna desinteressante uma investigação de mais detalhe.

Nas estações de leituras referentes às distâncias 40 a 80 m, 880, 1080, 1520, 1720, 2160 e 2880 m, foram interceptados lineamentos anômalos de direção norte-sul provenientes dos dados aeroeletromagnéticos (4.500 Hz), porém nenhuma anomalia penetrativa correspondente foi identificada, indicando assim que estes lineamentos não correspondem a descontinuidades geológicas pertinentes aos litotipos.

De um modo amplo, verifica-se então no Perfil_EM_02 (figura 6.14) a assinatura eletromagnética da cobertura pedológica mais superficial, do substrato rochoso em maiores profundidades (Biotita-Gnaisses e Migmatitos) e algumas anomalias penetrativas (pontos 40, 360 e 3000) que apesar de não estarem correlacionadas com lineamentos extraídos de imagens orbitais, não devem ser descartadas do ponto de vista prospectivo.

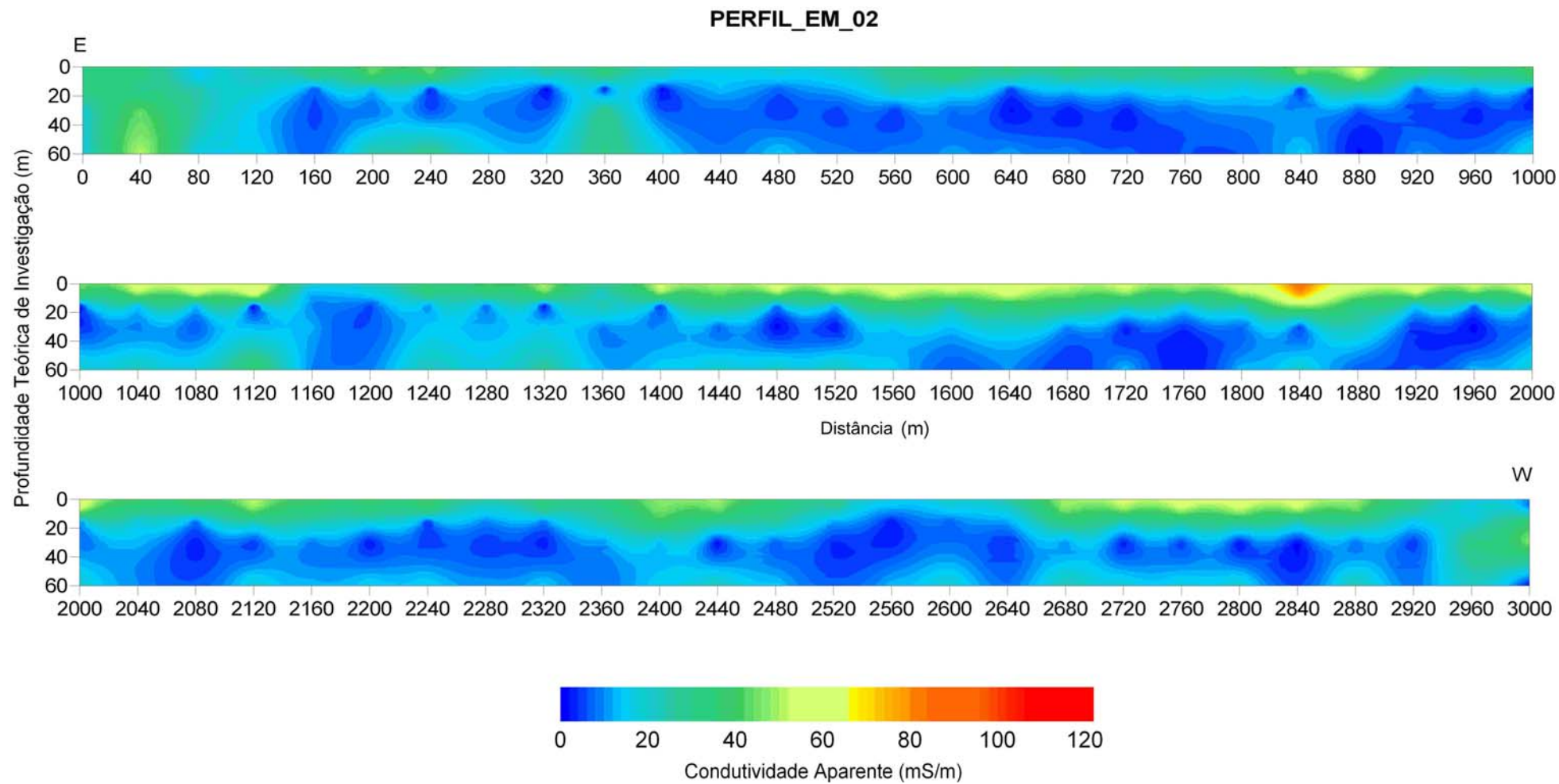


Figura 6.14 – Pseudo_ção referente ao Perfil_EM_02, representando a variação da condutividade aparente da subsuperfície.

Perfil_EM_03

O Perfil_EM_03 corresponde ao mais extenso realizado nesta pesquisa, com aproximadamente 3850 m de comprimento (figura 6.15). Existe uma semelhança entre este e os outros dois perfis já mencionados (Perfil_EM_01 e 02), que corresponde a uma zona mais condutiva (20 a 30 mS/m) próxima à superfície do terreno caracterizando assim a cobertura pedológica e a uma mais resistiva (≤ 10 mS/m) associada aos litotipos que não sofreram alteração dos agentes exógenos (Biotita-Gnaïsse, Horblenda-Biotita-Gnaïsse e Calciossilicáticas).

Em alguns segmentos do perfil em apreço, entre 840 a 920 m, 1120 a 1160 m e 3650 a 3770 m, observa-se à inexistência ou pequena espessura da camada mais condutiva, correspondendo à exposição na superfície dos litotipos constituintes desta região, fato observado em campo. O trecho entre 1800 e 1920 m exibe valores de condutividade da ordem de 80 mS/m, mostrando-se bastante condutivo. No entanto, este trecho corresponde à calha de um riacho intermitente cruzado perpendicularmente durante a aquisição dos dados de condutividade aparente, o que justifica estes valores relativamente elevados.

Entre os pontos de leitura 3330 e 3370 ocorre uma zona com condutividade de 80 mS/m semelhante à mencionada acima e também associada à calha de um riacho. Porém, neste caso, não ocorre um aumento da resistividade com a profundidade, pelo contrário, uma zona anômala penetrativa com valores de condutividade da ordem de 30 a 20 mS/m é cartografada e corresponde provavelmente a descontinuidades rúpteis pertinentes ao litotipo (fraturas), uma vez que neste mesmo posicionamento geográfico são identificados lineamentos nas imagens de satélite e fotografias aéreas. Nos pontos 1320 e 1560, verifica-se também a existência de zonas anômalas penetrativas e bem delimitadas, as quais podem estar associados também com a existência de descontinuidades.

Comparando o Perfil_EM_03 com o mapa aeroeletromagnético - 4.500 Hz (figura 6.9), observa-se que os pontos 200, 1000, 1400, 1880, 2250, 2610 e 3330 do referido perfil, estão sobrepostos a lineamentos anômalos. No entanto, excetuando o ponto 3330, os demais não apresentam anomalias penetrativas e bem definidas características de descontinuidades rúpteis, indicando assim que estes lineamentos aerogeofísicos não correspondem a estruturas desta natureza.

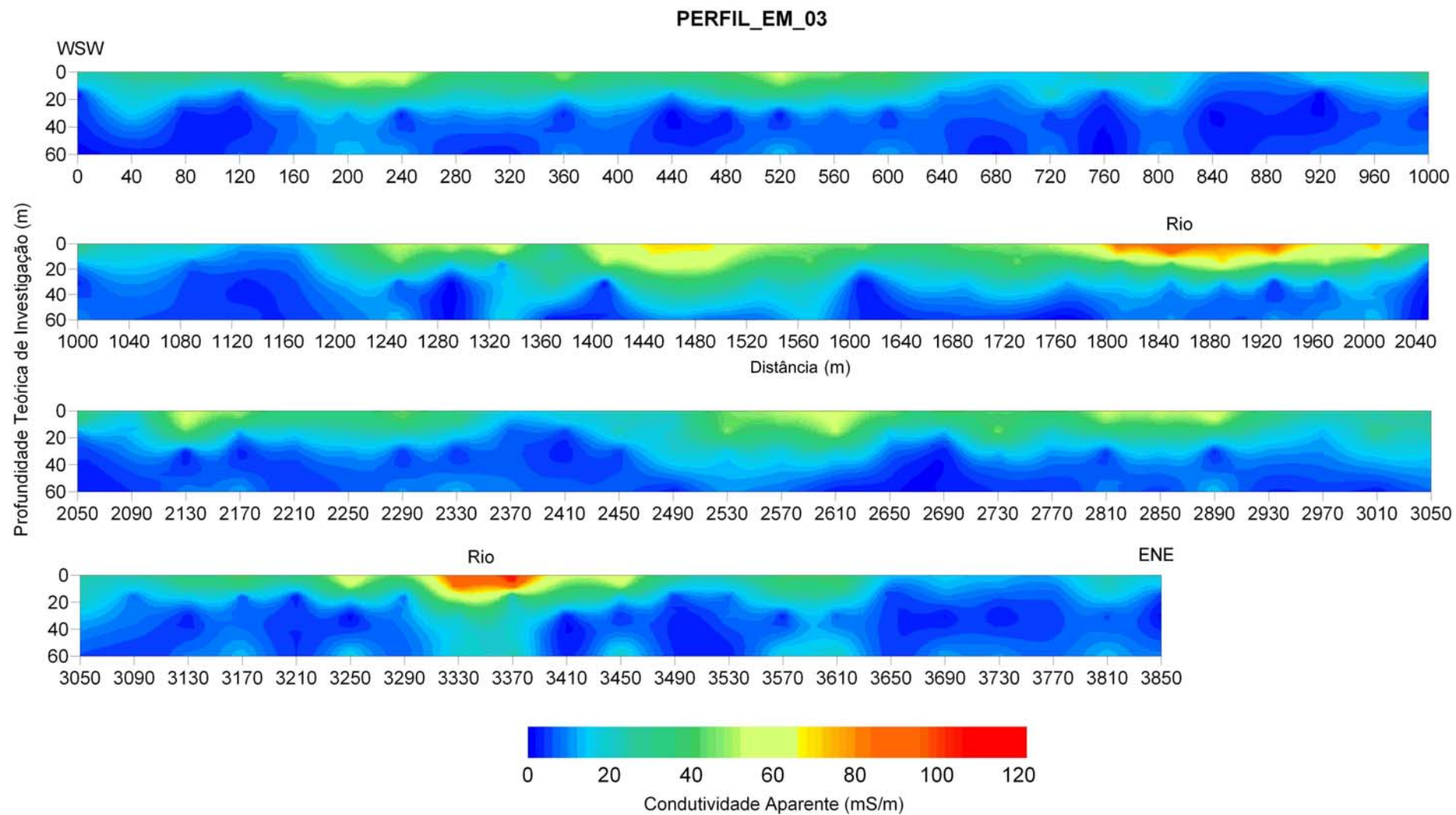


Figura 6.15 – Pseudo_seção referente ao Perfil_EM_03, representando a variação da condutividade aparente da subsuperfície.

Perfil_EM_51 e Perfil_EM_51b

Estes são perfis de detalhe que foram realizados junto ao poço profundo 51 que se localiza na Fazenda Caibro (figura 6.11), nas proximidades de um dos riachos intermitentes de direção norte-sul afluente do rio Juá. Segundo dados da CPRM, este poço apresenta uma vazão de 4.5 m³/h, considerada boa quando comparada com o quadro regional. Desta forma, a realização dos caminhamentos em sentido ortogonal, foi fundamental para analisar o comportamento em subsuperfície do aquífero, bem como servir de parâmetro para a interpretação dos outros perfis geofísicos.

A figura 6.16 representa a distribuição dos valores de condutividade aparente adquiridos em campo para o Perfil_EM_51. Através desta, observa-se que na porção leste do referido perfil, o terreno apresenta-se bastante condutivo até a profundidade de 10 m, com valores entre 70 e 80 mS/m, é importante ressaltar que esta porção localiza-se próxima a sedimentos aluvionares, justificando assim estes valores relativamente elevados. Com o aumento da profundidade, ocorre um decréscimo da condutividade. Entretanto, até a profundidade de 35 m os valores ainda são consideráveis (> 20 mS/m), já abaixo dos 35 m de profundidade, o terreno torna-se resistivo. Com base neste perfil observa-se a existência de descontinuidades pouco penetrativas associadas a esta anomalia eletromagnética. Na porção oeste do mesmo perfil, a zona anômala é mais superficial, até aproximadamente 20 m, e os valores de condutividade variam de 20 a 50 mS/m decrescendo com o aumento da profundidade. A partir dos 25 m de profundidade, o terreno torna-se mais resistivo com valores da ordem de 5 a 10 mS/m caracterizando assim os litotipos do substrato rochoso sem a existência de descontinuidades.

No Perfil_EM_51b (figura 6.17), observam-se dois padrões principais de condutividade. O primeiro é mais superficial até a profundidade de 15 m e os valores de condutividade aparente são da ordem de 20 a 50 mS/m. O segundo é mais resistivo (< 20 mS/m) e contínuo por toda a seção a partir dos 15 m de profundidade. De acordo com a figura 6.17, observa-se que nenhuma anomalia condutiva foi detectada ao longo deste caminhamento.

Fraturas observadas próximo ao referido poço estão orientadas na direção leste-oeste (figura 3.6) e caso correspondessem ao aquífero fissural que o abastece, deveriam ser detectadas como anomalias condutivas no perfil realizado na direção norte-sul (Perfil_EM_51b), o que não ocorre. A única anomalia significativa ocorre no início do Perfil_EM_51 (realizado na direção leste-oeste), próximo ao riacho de direção norte-sul.

Desta forma, o aquífero de interesse pode corresponder a uma zona de fraturas com penetrabilidade da ordem de 20 a 30 m (profundidade teórica do método), paralela ao riacho em apreço, sendo que os valores de condutividade aparente característicos desta anomalia variam de 15 a 70 mS/m e foram utilizados como um dos parâmetros nesta pesquisa para a interpretação dos perfis realizados com objetivo prospectivo.

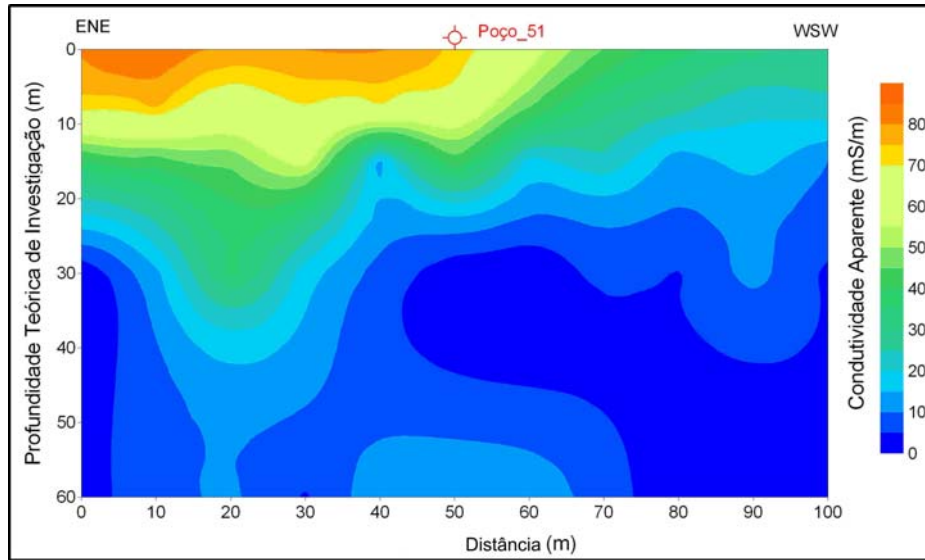


Figura 6.16 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos próximo ao poço 51 (Perfil_EM_51), ao longo de um caminhamento da direção leste-oeste.

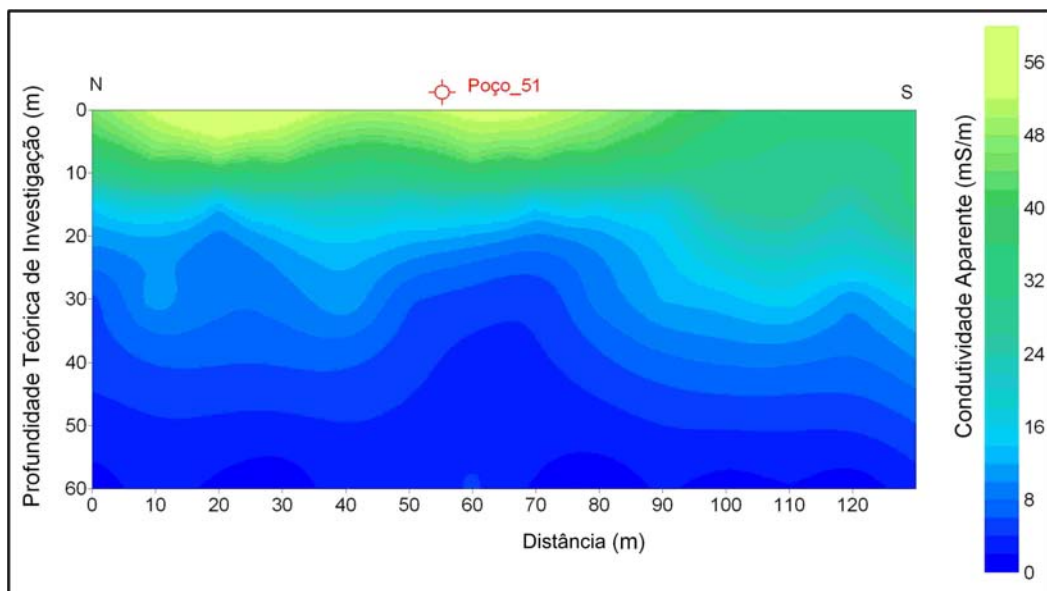


Figura 6.17 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos próximo ao poço 51 (Perfil_EM_51b), ao longo de um caminhamento da direção norte-sul.

Perfil_EM_221

Dentre os perfis eletromagnéticos de detalhe realizados nesta pesquisa, o Perfil_EM_221 (figura 6.11) foi o mais extenso (140 m) devido à detecção de uma anomalia entre os pontos 50 e 110, durante a tomada das medidas.

De acordo com a figura 6.18 é possível distinguir três zonas condutivas principais. A primeira está definida entre 40 e 110 m, atingindo uma profundidade máxima de 10 m e com valores de condutividade em torno de 70 a 115 mS/m, caracterizando-se como bem condutiva e podendo estar associada a uma cobertura bastante úmida (solo), vale ressaltar que neste trecho o relevo apresenta-se pouco negativo em relação às adjacências. A segunda zona inicia a partir dos 10 m de profundidade, é menos condutiva, sendo comum do início ao final do perfil. Sua espessura varia de 10 a 30 m e os valores de condutividade aparente são da ordem de 20 a 65 mS/m. A porção menos espessa desta zona está localizada abaixo do poço profundo 221. A terceira zona apresenta-se resistiva, com valores de condutividade inferior a 15 mS/m, inicia-se aproximadamente a partir dos 30 m de profundidade e a porção mais espessa localiza-se nas proximidades do poço profundo em apreço.

Observa-se ainda na figura 6.18, a existência de duas anomalias condutivas penetrativas. Considerando a profundidade teórica do método, a primeira anomalia, identificada no ponto 30 da pseudo-seção, atinge uma profundidade máxima de 40 m, caracterizando assim a existência de descontinuidades a esta profundidade. A segunda anomalia ocorre no ponto 120 e alcança uma profundidade superior aos 40 m, sugerindo assim, a existência de descontinuidades mais penetrativas. Nas proximidades do poço 221, o subsolo é bem resistivo sem a existência de estruturas geológicas rúpteis, indicando que este local é desfavorável à captação hídrica subterrânea, como prova a improdutividade do mesmo.

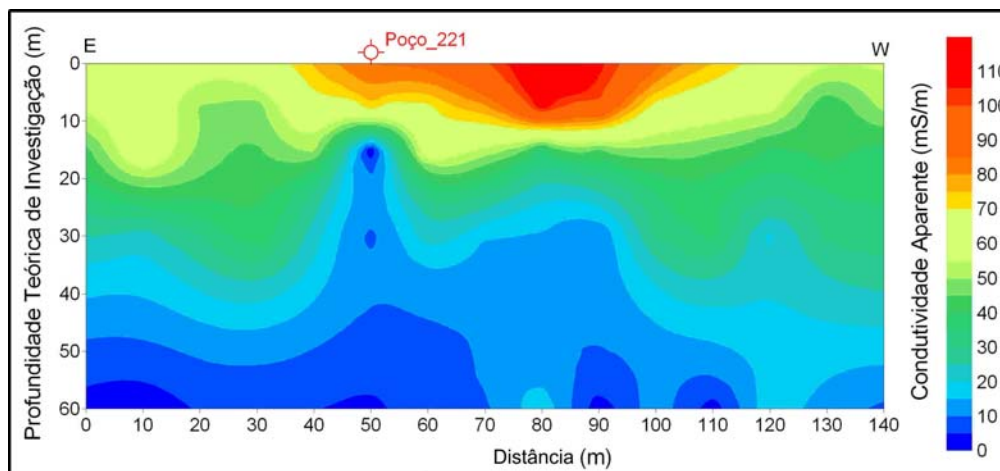


Figura 6.18 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos perto do poço 221.

Perfil_EM_222

Através do Perfil_EM_222 (figura 6.19), foi possível cartografar duas unidades eletromagnéticas principais. Porém, nenhuma anomalia condutiva representativa de uma zona de fraturas foi identificada, levando-nos a concluir que este local foi inadequado para a locação e perfuração do poço profundo 222. Como resultado, este poço é improdutivo, em termos de vazão.

A unidade superior apresenta valores de condutividade da ordem de 20 a 36 mS/m, sendo que a porção mais condutiva localiza-se nas proximidades do referido poço profundo, já a espessura varia de 10 a 20 m. Esta unidade, identificada também em todos os perfis eletromagnéticos, corresponde à cobertura pedológica dos litotipos (solo) e não apresenta um bom potencial hidrogeológico, tendo em vista a pouca espessura e principalmente o tipo litológico sotoposto (rochas de natureza cristalina).

A segunda unidade identificada neste perfil e comum aos outros perfis aqui tratados, apresenta valores de condutividade que a caracteriza como resistiva (≤ 15 mS/m), sendo representativa dos litotipos constituintes do substrato rochoso. O topo desta camada é variável, sendo a profundidade mínima de 20 m no início do perfil e a máxima de 35 m entre as estações de leitura referente as distâncias de 30 e 40 m. Nas proximidades do poço, o topo desta camada está na profundidade aproximada de 25 m.

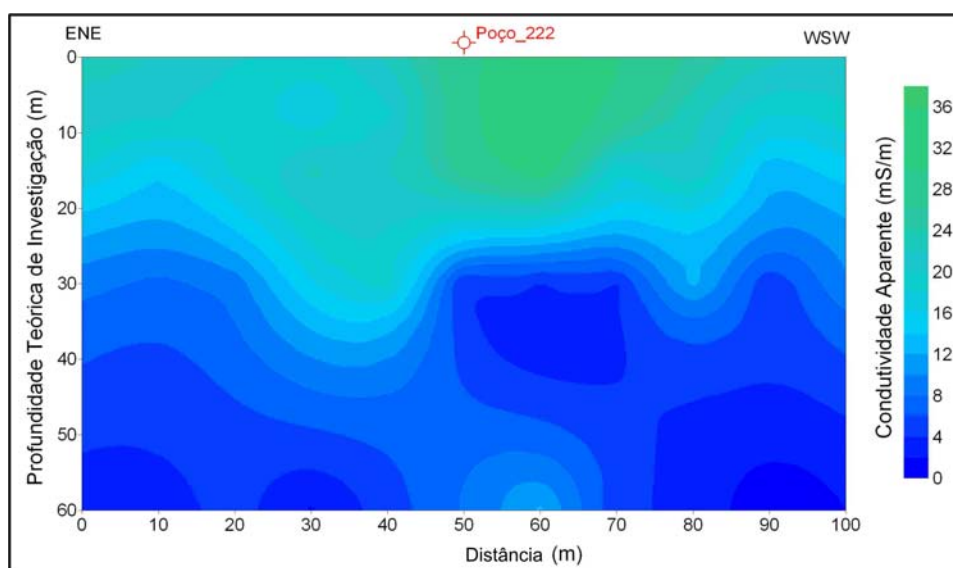


Figura 6.19 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos perto do poço 222.

Perfil_EM_223

Este perfil (figura 6.20) apresenta uma assinatura eletromagnética semelhante aos referidos anteriormente, pois também se observa a existência de três unidades eletromagnéticas distintas. A primeira inicia-se no ponto 20, sendo mapeável até o final do caminhamento, a profundidade máxima alcança os 12 m no ponto 70 e os valores de condutividade variam de 75 a 130 mS/m, caracterizando-a como bem condutiva. É possível que esta camada esteja associada ao solo, cujo teor de umidade aumenta de leste para oeste.

A unidade eletromagnética posicionada na porção central do perfil apresenta valores de condutividade da ordem de 20 a 60 mS/m, com espessura mínima de 5 m e máxima de 20 m, cuja coloração está representada pela variação do amarelo ao verde. Sotoposta a esta, tem-se uma unidade bastante resistiva, com valores inferiores a 15 mS/m, que corresponde ao substrato rochoso da região (biotita-gnaiss).

Entre 50 e 65 m, observa-se o contorno de uma faixa de valores de condutividade prolongando-se até a profundidade teórica máxima (60 m), estes valores são da ordem de 15 mS/m e correspondem a uma zona anômala bem definida, indicando portanto, a existência de descontinuidades neste local. Porém, o poço 223 foi considerado como improdutivo, sendo que o motivo pode estar relacionado ao seu posicionamento, aproximadamente 10 m a leste da anomalia, ou mesmo ao fato da descontinuidade referente não possuir bom potencial hídrico.

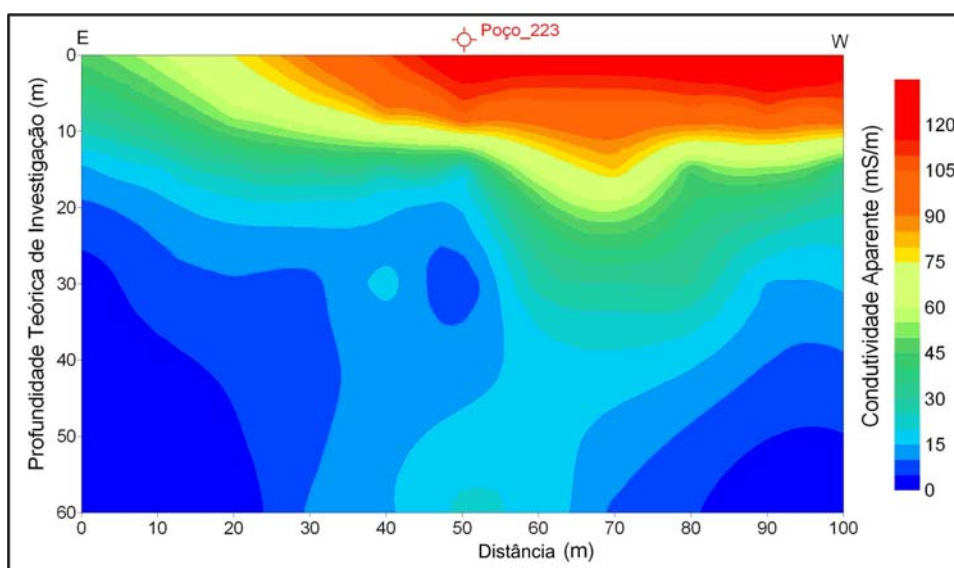


Figura 6.20 – Pseudo-seção referente aos dados de condutividade aparente obtidos perto do poço 223.

6.4.5. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS ELÉTRICOS TERRESTRE

O levantamento geofísico por meio do método da eletrorresistividade foi realizado com o intuito de caracterizar a anomalia condutiva detectada através do caminhamento eletromagnético realizado na Fazenda Mandacaru (Perfil_EM_01 na figura 6.11). Esta anomalia ocorre entre os pontos 2120 e 2520 do perfil eletromagnético conforme a figura 6.13. Desta forma, foi realizado um caminhamento elétrico de 420 m de comprimento (Perfil_ER_01), cujas coordenadas UTM inicial e final são, respectivamente: 408.343, 9.575.558 e 408.762, 9.575.481.

O arranjo empregado foi o Dipolo-Dipolo, utilizando dois espaçamentos (10 e 20 m), com seis níveis de investigação para o espaçamento de 10 m e dois níveis de investigação para o espaçamento de 20 m

O tratamento dos dados consistiu, inicialmente, na interpolação dos valores medidos em campo, considerando as profundidades teóricas de investigação da técnica geofísica, resultando assim em pseudo-seções que permitiram uma interpretação qualitativa dos mesmos. A segunda parte do processamento consistiu na inversão dos dados de campo com posterior interpretação quantitativa da seção geométrica resultante. De acordo com Rigoti (1998 *in* Campos, 2004), a inversão dos dados elétricos pode ser descrita como a mudança iterativa de parâmetros do modelo até que se obtenha o melhor ajuste entre os dados calculados a partir do modelo e os dados observados.

A inversão dos dados elétricos adquiridos em campo foi realizada com o uso do *software* RES2DINV, o qual determina um modelo de resistividade 2D para a subsuperfície com base nos valores de resistividade aparente originais. O referido *software* divide automaticamente a subsuperfície em blocos retangulares atribuindo a cada bloco um valor de resistividade aparente concordante com os valores adquiridos em campo. Este processo corresponde à inversão dos dados, sendo baseado no método dos mínimos quadrados (*least-squares method*) (Geotomo Software, 2004).

O programa computacional em questão contém diversos parâmetros que controlam o processo de inversão dos dados elétricos. Estes parâmetros podem ser modificados de forma interativa de modo a se obter um resultado condizente com o objetivo do trabalho.

Os parâmetros do processo de inversão utilizados para a inversão dos dados obtidos nesta pesquisa, corresponderam àqueles que não permitem a suavização de valores discrepantes com relação aos adjacentes, os quais podem corresponder a descontinuidades (alvo do levantamento).

6.4.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ELÉTRICOS TERRESTRES

O resultado do processo de inversão 2D para os dados de resistividade aparente adquiridos na Fazenda Mandacaru, ao longo do Perfil_EM_01 (entre os pontos 2120 a 2520), está apresentado na figura 6.21.

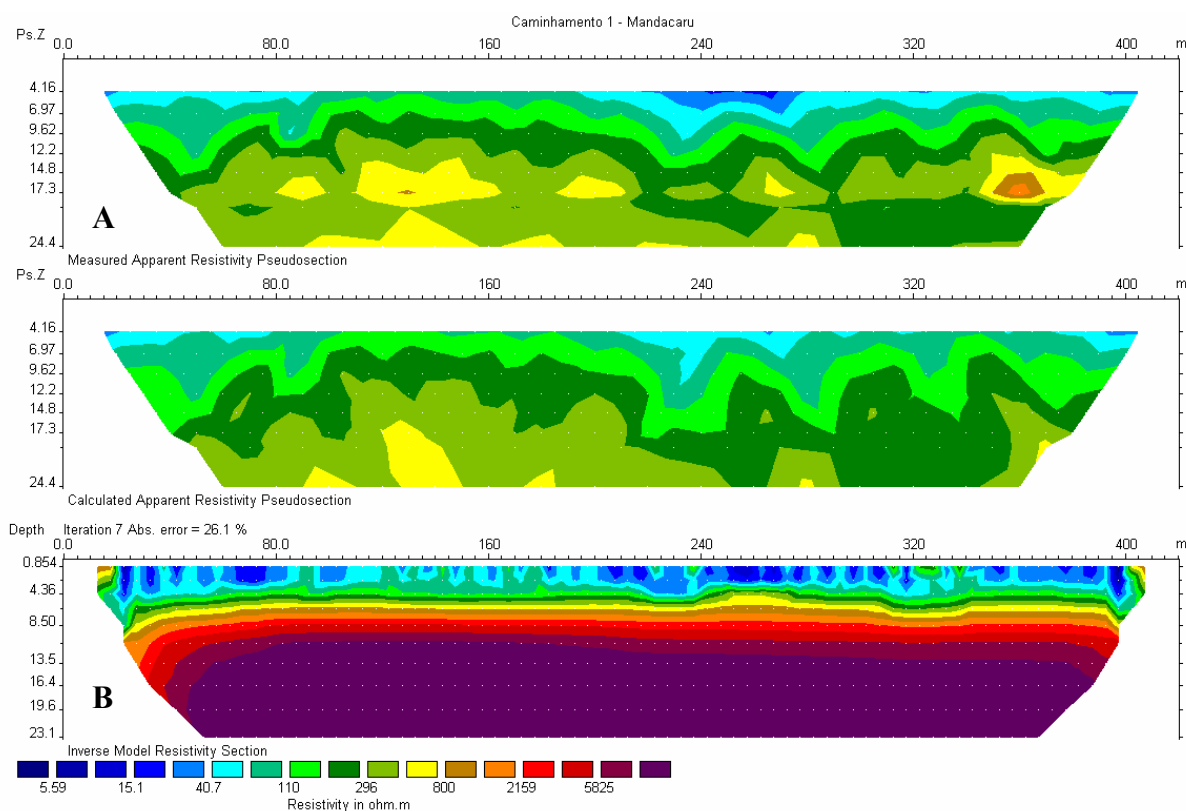


Figura 6.21 – Resultado da inversão para o caminhamento realizado na Fazenda Mandacaru.

Com base na seção geolétrica invertida, observam-se três unidades com valores de resistividade aparente e espessura bem definida (figura 6.21). A primeira atinge uma profundidade aproximada de 4 m e apresenta valores de resistividade da ordem de 50 Ohm.m, correspondendo portanto a cobertura pedológica mais úmida, em seguida, caracterizando o solo mais seco, tem-se uma unidade geolétrica com espessura média de 4 m e resistividades entre 100 e 1.500 Ohm.m. A terceira unidade apresenta elevados valores de resistividade aparente (> 1.500 Ohm.m), caracterizando assim o litotipo constituinte da região (Biotita-Gnaïsse).

Observando a pseudo-seção (figura 6.21A) e a seção geolétrica (figura 6.21B), verifica-se a inexistência de anomalias penetrativas características de discontinuidades,

indicando que este local não permite o armazenamento natural de água em subsuperfície, já que o substrato rochoso tem um comportamento maciço, sem fraturas penetrativas. Esta afirmativa é corroborada pelas imagens orbitais (imagens de satélite e fotografias aéreas), nas quais não foram identificados lineamentos estruturais neste local. Desta forma, a anomalia eletromagnética, identificada entre 2120 e 2520 m do Perfil_EM_01, não pode ser considerada como promissora em termos de recursos hídricos subterrâneos, tendo em vista os outros parâmetros geofísicos e geológicos, analisados e interpretados.

A figura 6.22 corresponde ao modelo geológico proveniente da seção geoeletrica de Mandacaru e das informações geológicas (litologia) da região. Nesta observa-se, da base para o topo, à variação do litotipo inalterado (Biotita-Gnaisse) para o solo mais seco e, em seguida, para o solo mais úmido. O solo mais úmido ocorre na porção superficial devido à aquisição destes dados de resistividade aparente, terem sido realizadas em um período chuvoso.

Nenhuma descontinuidade (zona de faturas) foi traçada no modelo geológico (figura 6.22), tendo em vista que o dado elétrico representado na pseudo-seção (figura 6.21), não exhibe assinaturas resistivas deste tipo de estrutura.

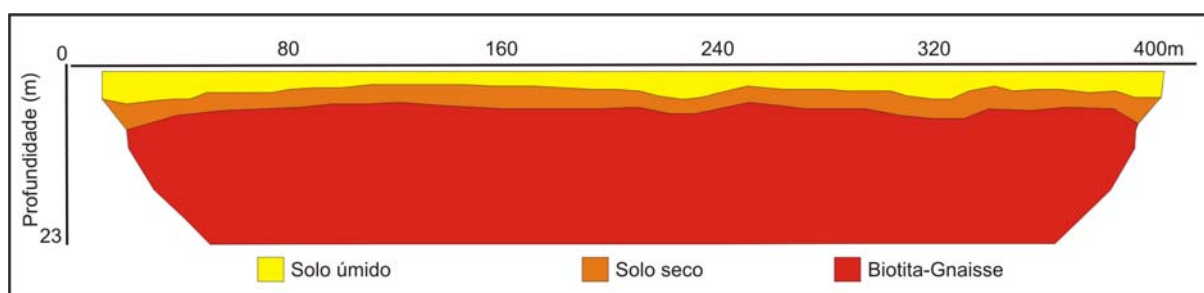


Figura 6.22 – Modelo geológico proveniente da seção geoeletrica de Mandacaru.

6.5. PROSPECÇÃO HÍDRICA

Esta etapa da pesquisa contemplou a aplicação de uma metodologia prospectiva, de modo a definir um local favorável a exploração de água subterrânea. Desta forma, inicialmente foram definidas duas áreas-alvo dentro da área total de pesquisa, com base na concordância entre os lineamentos mais extensos extraídos das imagens de satélite e das fotografias aéreas, e posterior investigação geológica destes lineamentos em trabalhos de campo, conforme discutido no capítulo 7 (Integração dos Resultados). Após a seleção dos alvos, foi realizada a aquisição de dados geofísicos com base em método elétrico

(eletrorresistividade) e eletromagnético (EM34-3XL) sendo que desta vez o levantamento foi de detalhe, seguido do tratamento e interpretação destes dados em conjunto com informações de natureza geológica (litotipo e estruturas rúpteis).

O primeiro alvo pesquisado (Área_alvo_01) posiciona-se na porção centro-leste da área, mais especificamente nas proximidades da Fazenda Livramento (figura 6.23). A estrutura de interesse tem aproximadamente 1.500 m de comprimento (Estrutura 02 – figura 6.23), orientada na direção leste-oeste e está interceptada na sua extremidade oeste por mais dois lineamentos estruturais, um de direção NE-SW (Estrutura 01 – figura 6.23) e outro de direção NW-SE, além de uma outra estrutura de direção NW-SE que a intercepta próximo a sua extremidade leste. Estes lineamentos correspondem a trechos onde ocorre escoamento hídrico superficial (riachos), conforme o conceito de Riacho-Fenda. Os perfis geofísicos foram posicionados a aproximadamente 100 m a oeste da interconexão entre as três estruturas. Estes perfis foram realizados na direção norte-sul com 350 m de comprimento. Para o método eletromagnético, as estações de leitura estão a cada 10 m, já para o método da eletrorresistividade (caminhamento elétrico) foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 10 (6 níveis) e 20 m (2 níveis) totalizando assim em 8 níveis de investigação.

O outro alvo (Área_alvo_02) está localizado na porção noroeste da área, na Fazenda Cairu. Nesta, ocorrem três estruturas principais que foram analisadas pelos métodos geofísicos aqui discutidos. Duas destas estruturas estão orientadas na direção aproximada N-S e espaçadas aproximadamente 500 m, já a outra, apresenta uma direção NW-SE e intercepta a estrutura norte-sul posicionada mais a leste, conforme ilustra a figura 6.27. Através da investigação geológica em campo, foi observada nos afloramentos uma perfeita correlação entre as discontinuidades medidas e os lineamentos extraídos a partir das imagens espectrais e fotografias aéreas. Desta forma, foram realizados dois perfis eletromagnéticos de 200 m de comprimento cada, com 10 m entre as estações de medida e na direção aproximada E-W interceptando as duas estruturas de direção N-S. Foram também realizados dois caminhamentos elétricos de 320 m cada (com espaçamentos de 10 e 20 m) nos mesmos locais onde foram executados os perfis eletromagnéticos. Vale ressaltar que os caminhamentos geofísicos foram realizados de modo que as estruturas investigadas se posicionassem nos centros geométricos dos mesmos. Neste caso, a estação inicial para o levantamento EM corresponde ao ponto 60 do levantamento ER.

6.5.1. ALVO 01 - FAZENDA LIVRAMENTO

A figura 6.23 mostra em detalhe o local do alvo 01, onde foi realizada a investigação geofísica prospectiva e o posicionamento dos perfis elétrico e eletromagnético, sendo as coordenadas inicial e final desses perfis apresentadas na tabela 6.6.

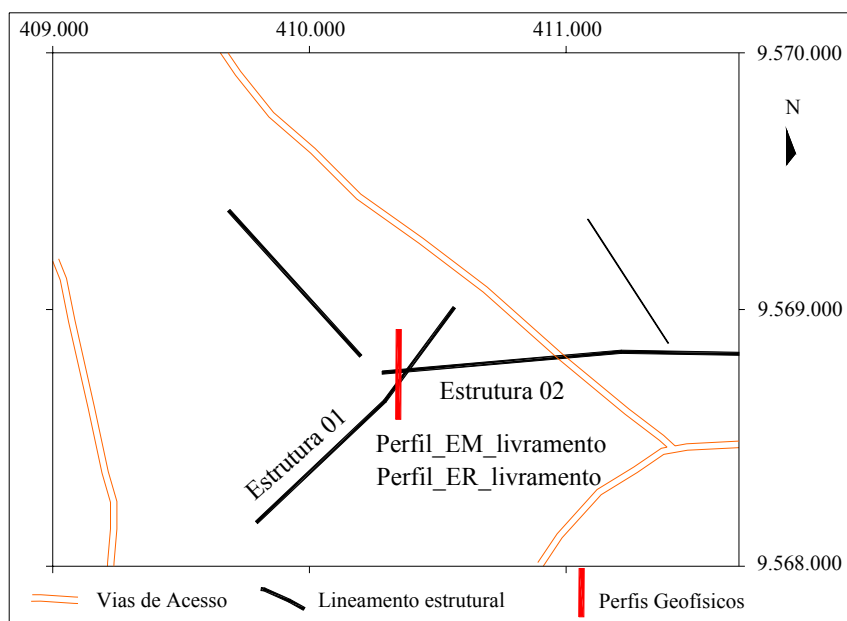


Figura 6.23 – Mapa de posicionamento das estruturas geológicas analisadas e dos perfis geofísicos executados na Área_alvo_01 (Fazenda Livramento).

Tabela 6.6 – Coordenadas UTM dos perfis geofísicos elétrico e eletromagnético executados.

Perfis Geofísicos	Coordenada Inicial	Coordenada Final
Perfil_EM_Livramento	410.376; 9.568.572	410.348; 9.568.922
Perfil_ER_Livramento		

A figura 6.24 mostra a pseudo-seção que representa os valores de condutividade aparente adquiridos com o método eletromagnético (EM34-3XL). O perfil foi realizado de modo a cruzar as duas estruturas geológicas identificadas nas imagens orbitais. Observa-se no geral, através da figura 6.24, duas unidades eletromagnéticas distintas, que correspondem, do topo a base, ao solo e ao embasamento cristalino (biotita-gnaise). A camada mais superficial apresenta uma espessura média da ordem de 15 m e valores de condutividade aparente variando de 30 a 90 mS/m. A partir da profundidade teórica de 15 m ocorre o regolito

(horizonte C do solo), com aproximadamente 5 m de espessura e condutividade da ordem de 20 mS/m, em seguida é mapeado o embasamento cristalino (segunda unidade), caracterizado por valores de condutividade menores, da ordem de 5 a 15 mS/m.

Ao longo do Perfil_EM_Livramento (figura 6.24) ocorrem três zonas anômalas penetrativas, caracterizadas por valores de condutividade aparente, maiores dos que nas adjacências. A primeira zona ocorre no início do referido perfil, porém nenhum lineamento referente foi identificado em imagens orbitais (Fotografias aéreas e imagens de satélite). Entre 100 e 120 m, no local onde o perfil cruza a Estrutura 01, verifica-se a existência de uma anomalia bem definida que atinge uma profundidade máxima de 40 m, caracterizando assim a descontinuidade identificada nas imagens orbitais.

A terceira zona condutiva exibida no Perfil_EM_Livramento, está localizada entre os pontos 260 e 280, onde o referido perfil intercepta a Estrutura 02. No entanto, esta anomalia é menos penetrativa, atingindo uma profundidade máxima de 30 m, porém persistente.

Vale ressaltar que os dados de condutividade aparente estão apresentados na forma de uma pseudo-seção, ou seja, não passaram por processo de inversão e que, portanto, as profundidades apresentadas correspondem a profundidades teóricas e não reais.

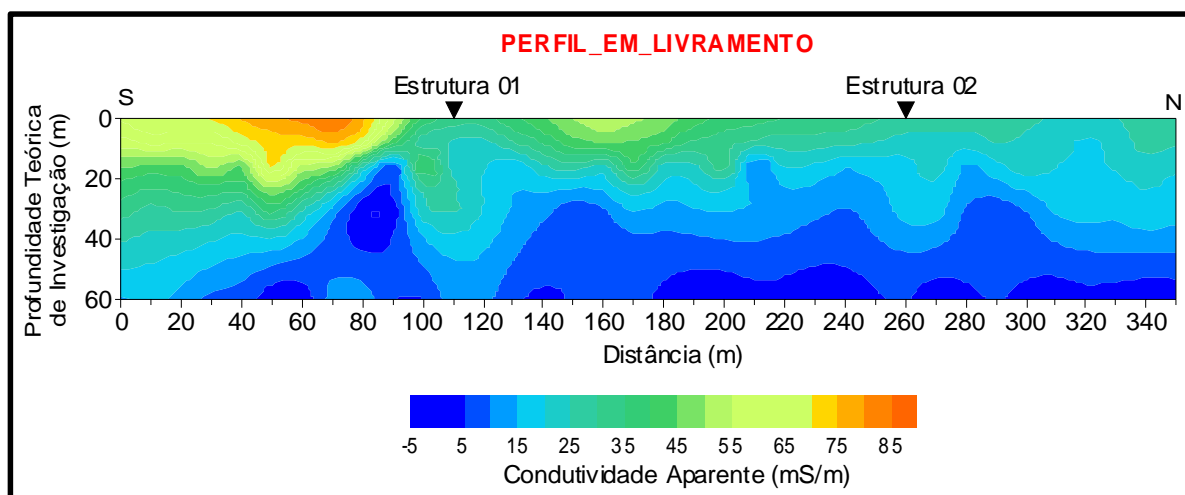


Figura 6.24 – Pseudo-seção exibindo a variação da condutividade aparente ao longo do perfil eletromagnético, realizado na área da Fazenda Livramento.

A figura 6.25 corresponde à seção geolétrica resultante do processo de inversão 2D dos dados de resistividade aparente. Nesta seção, observam-se três unidades geolétricas similares às observadas no Perfil_EM_Livramento (figura 6.24), porém com espessuras inferiores. Com valores de resistividade da ordem de 70 Ohm.m e espessura máxima de 5 m,

tem-se uma unidade correspondente à camada mais superficial do solo úmido, em seguida, ocorre uma camada de solo seco até a profundidade de 13 m, sendo os valores de resistividade entre 200 e 2.000 Ohm.m. A terceira unidade geoeétrica corresponde ao embasamento cristalino, onde os valores de resistividade são bem elevados, acima de 2.000 Ohm.m.

As anomalias penetrativas exibíveis na pseudo-seção eletromagnética (figura 6.24) são também identificáveis na pseudo-seção elétrica (figura 6.25A), principalmente a que se refere ao trecho 100-120 m (Estrutura 01). Porém, a seção geoeétrica resultante da inversão dos dados elétricos (figura 6.25B) exhibe estas anomalias até a profundidade de aproximadamente 6 m, o que a caracteriza como pouco penetrativa para o propósito de prospecção e exploração hídrica subterrânea em terrenos cristalinos.

O resultado da interpretação quantitativa da seção geoeétrica referente, corresponde ao modelo geológico apresentado na figura 6.26, no qual observa-se a variação de solo úmido para o solo seco e, em seguida, para o embasamento cristalino (Biotita-Gnaisse). Neste modelo, foi adicionado o posicionamento das estruturas que foram identificadas em imagens orbitais e nas anomalias elétricas e eletromagnéticas.

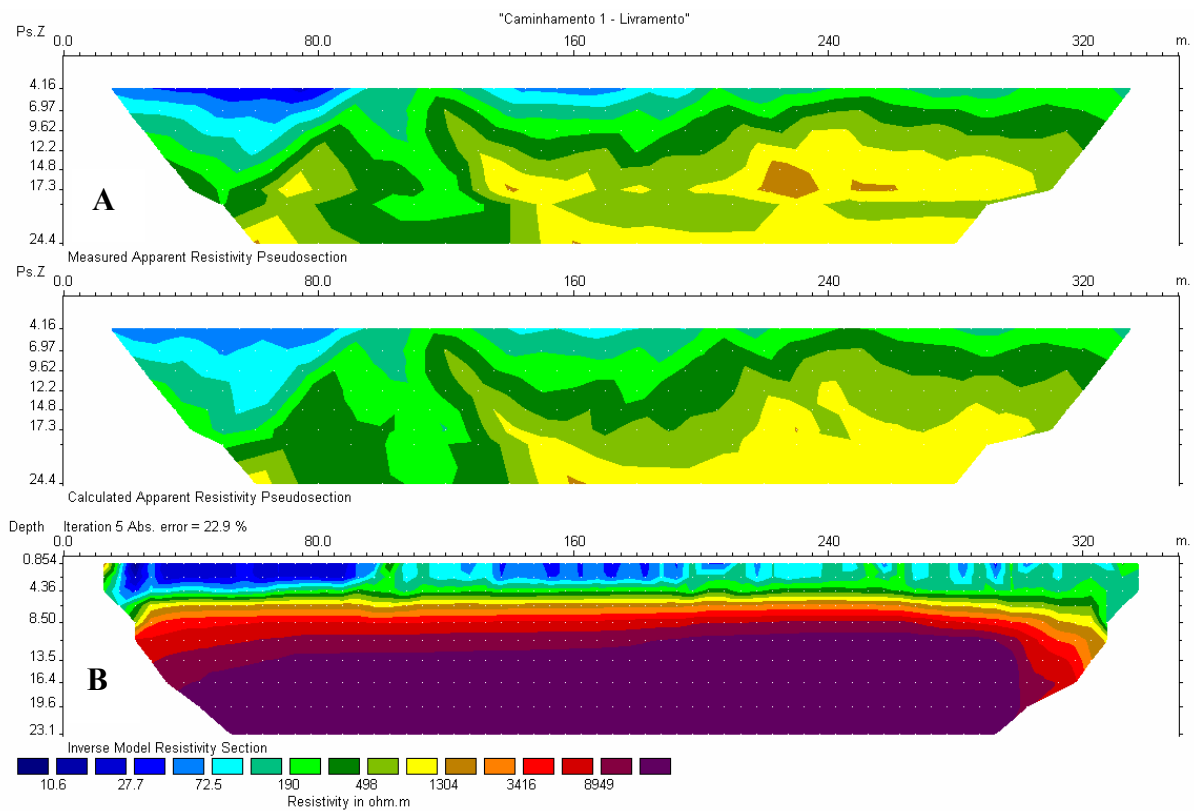


Figura 6.25 – Resultado da inversão dos dados adquiridos na área-alvo 01 (Faz. Livramento).

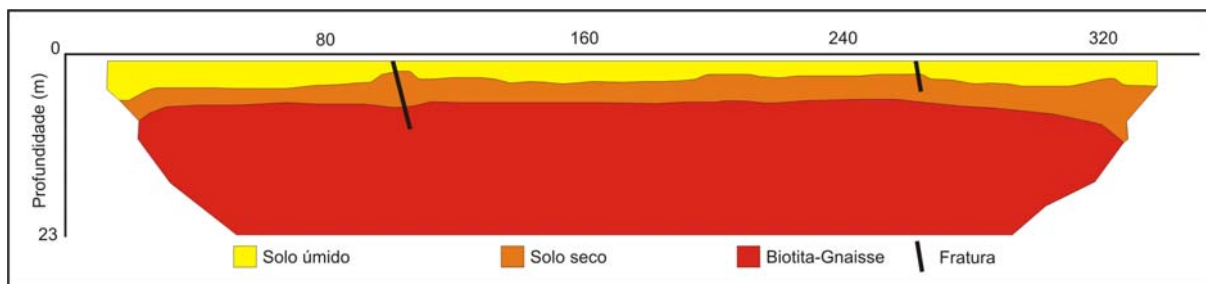


Figura 6.26 - Modelo geológico proveniente da seção geolétrica da Fazenda Livramento.

6.5.2. ALVO 02 - FAZENDA CAIRU

A segunda área-alvo, localizada na fazenda Cairu, é mostrada na figura 6.27, com as coordenadas UTM do início e final de cada perfil apresentadas na tabela 6.7. Os perfis eletromagnéticos iniciaram no ponto 60 e terminaram no ponto 270 dos perfis elétricos.

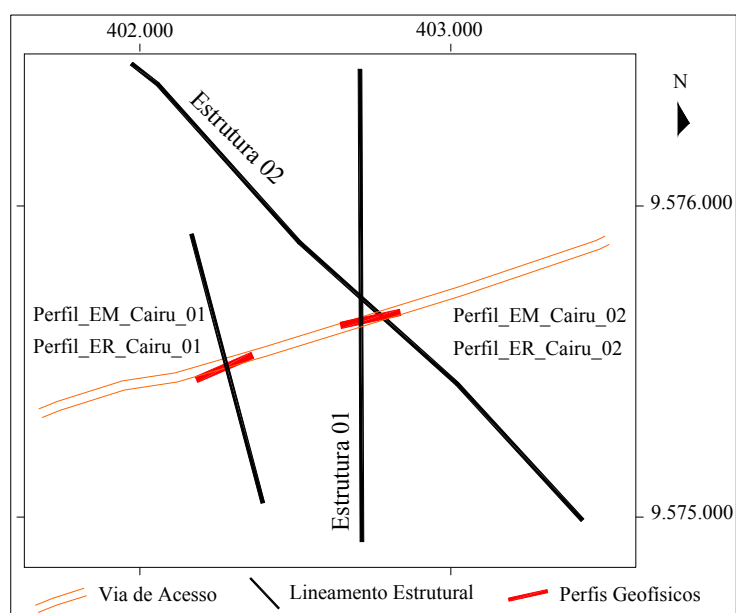


Figura 6.27 – Mapa de posicionamento das estruturas geológicas analisadas e dos perfis geofísicos executados no alvo 02 (Fazenda Cairu).

Tabela 6.7 – Coordenadas UTM dos perfis geofísicos elétrico e eletromagnético executados na Fazenda Cairu.

Perfis Geofísicos	Coordenada Inicial	Coordenada Final
Perfil_EM_Cairu_01	402.182; 9.575.442	402.362; 9.575.520
Perfil_ER_Cairu_01	402.116; 9.575.442	402.399; 9.575.546
Perfil_EM_Cairu_02	402.646; 9.575.616	402.837; 9.575.638
Perfil_ER_Cairu_02	402.595; 9.575.602	402.901; 9.575.564

CAIRU_01

A figura 6.28 corresponde a pseudo-seção oriunda dos dados de condutividade aparente medidos no local, onde se observa a existência de pelo menos quatro anomalias condutivas penetrativas e bem definidas: pontos 10, 70, 110 e 150. No entanto, o lineamento estrutural identificado nas fotografias aéreas e imagens de satélite corresponde, em termos de posicionamento geográfico, ao ponto 110. Neste, ocorre uma zona penetrativa anômala com valores de condutividade aparente da ordem de 50 mS/m, atingindo uma profundidade teórica máxima de 40 m.

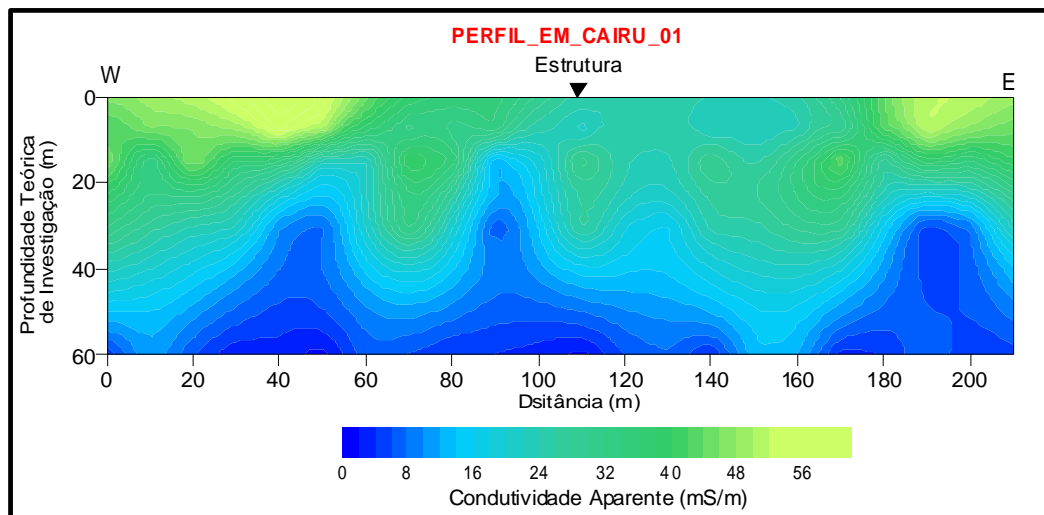


Figura 6.28 – Pseudo-seção exibindo a variação da condutividade aparente ao longo do perfil eletromagnético Cairu 01.

A figura 6.29, referente à seção geolétrica 2D do perfil ER_Cairu_01, exibe três unidades geolétricas distintas, que correspondem ao solo úmido, ao solo seco e ao litotipo característico da região (migmatitos). A primeira unidade apresenta valores de resistividade aparente em torno de 70 Ohm.m e espessura de 4 m, a segunda, com espessura de aproximadamente 6 m, possui valores de resistividade variando de 100 a 1.000 Ohm.m, já a terceira unidade possui valores superiores a 1.000 Ohm.m. Na estação de medida referente a distância 200 m, correspondente à anomalia condutiva do ponto 110 do perfil EM (figura 6.28) e ao lineamento extraído das fotografias aéreas e imagens de satélite, observa-se uma anomalia penetrativa com valores de resistividade inferiores as das adjacências, com formato tabular e disposição vertical. Esta anomalia adicionada à anomalia EM, aos dados geológicos

de campo e ao produto das imagens orbitais, caracteriza este ponto como um aquífero fissural promissor. Na ponto 140 do perfil ER, também foi mapeada uma anomalia condutiva e interpretada com uma descontinuidade, conforme modelo geológico (figura 6.30), esta anomalia corresponde à anomalia eletromagnética do ponto 70.

A verticalidade da anomalia no ponto 200 é um fato esperado, tendo em vista que as estruturas rúpteis identificadas em campo apresentam um mergulho predominantemente vertical a subvertical.

O modelo geológico da figura 6.30 exibe a disposição das três unidades geológicas identificadas, bem como o posicionamento e arranjo das descontinuidades (zonas de fraturas).

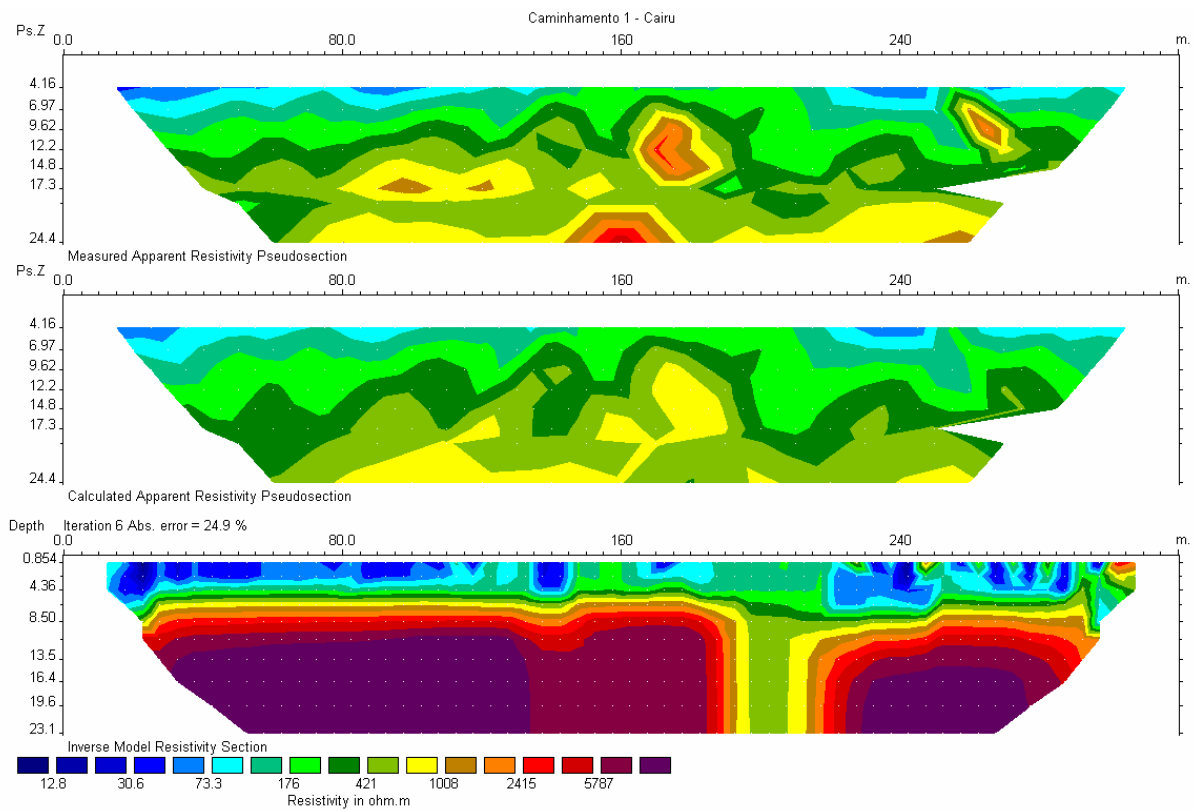


Figura 6.29 – Resultado da inversão dos dados adquiridos na área-alvo 02, perfil 01 (Faz. Cairu).

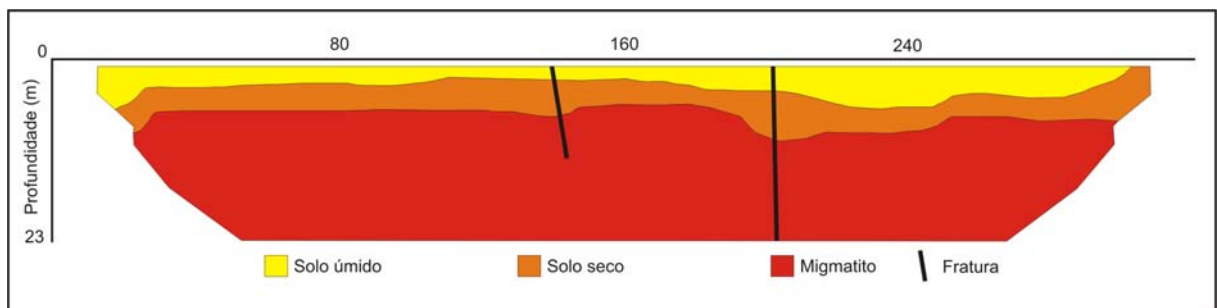


Figura 6.30 - Modelo geológico proveniente da seção geoeletrica da Fazenda Cairu (Perfil_ER_01).

CAIRU_02

A pseudo-seção da figura 6.31, não exhibe anomalias relacionadas aos lineamentos identificados nas imagens orbitais (Estrutura 01 e 02 na figura 6.27), porém duas anomalias posicionadas nos pontos 40 e 180 são perfeitamente identificadas, embora não haja indícios de estruturas correspondentes nas imagens de satélite e fotografias aéreas.

A seção geoeétrica 2D (figura 6.32) também não apresenta anomalias relacionadas aos lineamentos identificados nas imagens orbitais e nem aos identificados no levantamento eletromagnético terrestre. Somente uma anomalia pouco penetrativa foi identificada (ponto 175). Nesta seção é possível caracterizar as mesmas três unidades geoeétricas mapeadas no Perfil_ER_Cairu_01: cobertura pedológica (úmida e seca) e litotipo (migmatito).

A figura 6.33 exhibe o modelo geológico oriundo da seção geoeétrica e do mapa geológico base, onde se observa um lineamento traçado a partir da interpretação dos dados de resistividade aparente e do produto da análise de imagens orbitais.

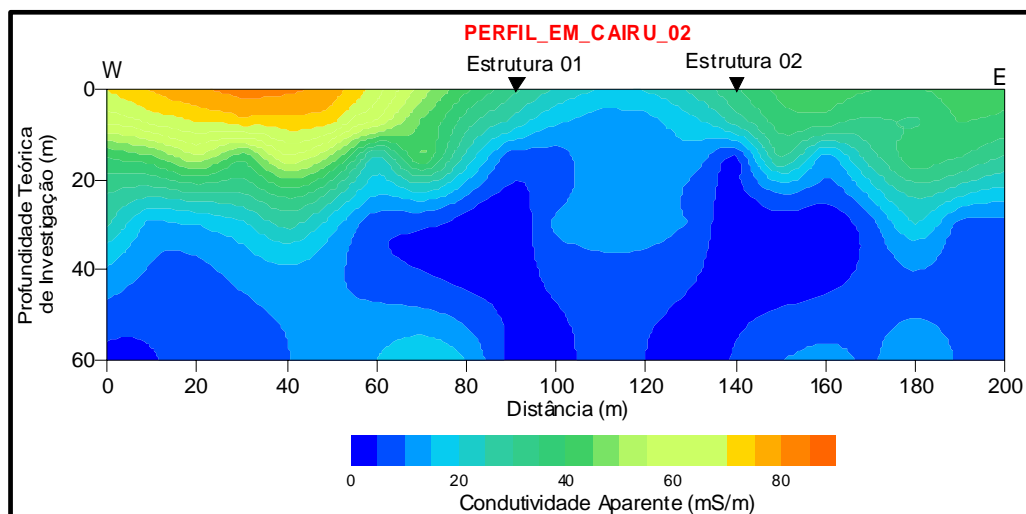


Figura 6.31 – Pseudo-seção exibindo a variação da condutividade ao longo do perfil eletromagnético Cairu 02. Estão marcados ainda, os pontos referentes aos lineamentos identificados nas imagens orbitais.

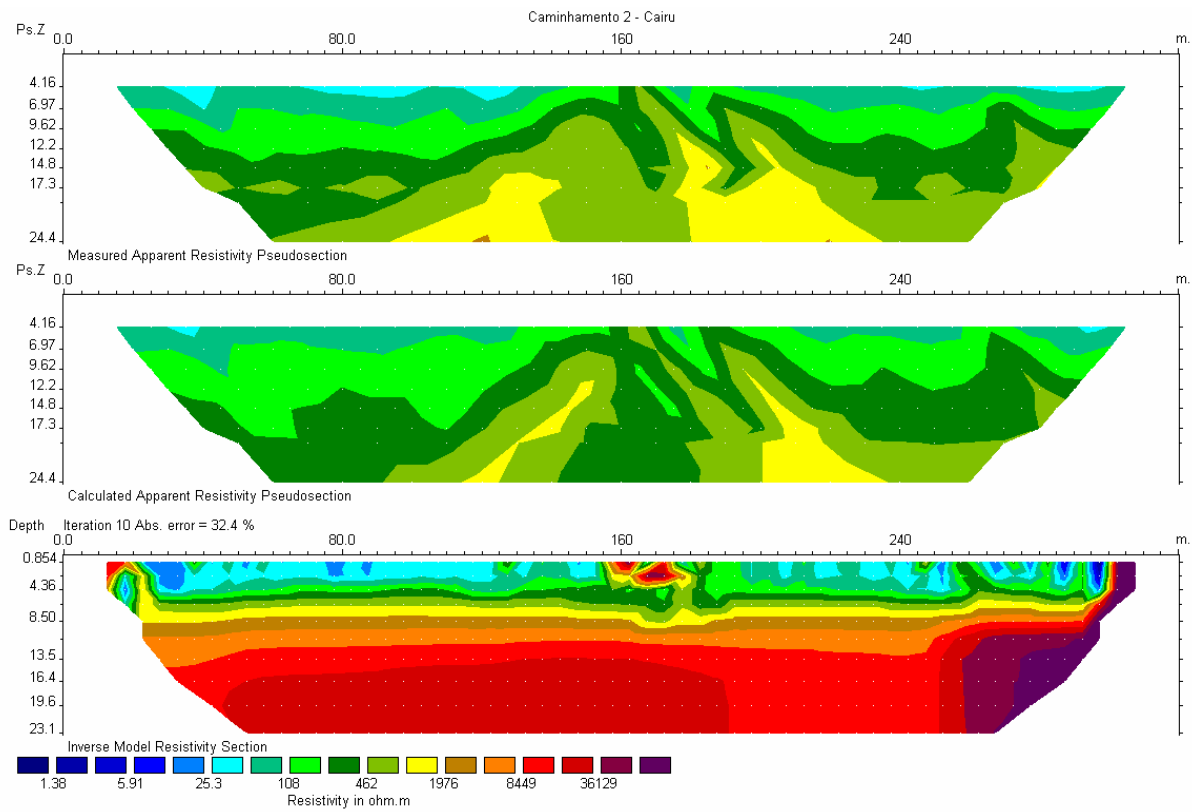


Figura 6.32 – Resultado da inversão dos dados adquiridos na área-alvo 02, perfil 02 (Faz. Cairu).

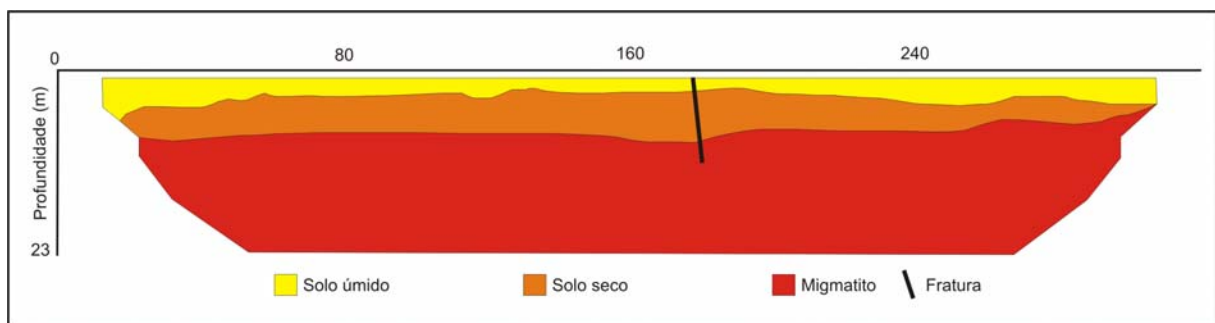


Figura 6.33 - Modelo geológico proveniente da seção geolétrica da Fazenda Cairu (Perfil_ER_02).

Capítulo 7

7. INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos de modo integrado, todos os dados adquiridos na presente pesquisa, com enfoque ao objetivo principal da mesma. A integração das informações foi realizada em plataforma SIG, a qual resultou num banco de dados georreferenciados que poderá ser utilizado em trabalhos futuros de cunho científico, uma vez que estes dados encontram-se em meio digital. O *software* utilizado para a geração deste SIG foi o ArcMap 8.

Inicialmente, para a criação do SIG, foi necessário padronizar as coordenadas e *Datums* de todos os dados utilizados, assim, informações, cujo posicionamento geográfico estavam vinculados a coordenadas geográficas (décimos de grau) tiveram que ser convertidas para UTM (*Universal Transversa de Mercator*) por meio de um aplicativo do *software* RockWare, tendo em vista que todos os outros dados estão neste sistema de coordenadas métricas. Além disso, este sistema é mais usual para áreas relativamente pequenas. A conversão foi realizada nos dados aeroeletromagnéticos e pseudotopográficos. Já o *Datum* utilizado correspondeu ao SAD-69, implementado através de uma rotina do ArcMap.

Os lineamentos extraídos das fotografias aéreas foram georreferenciados no AutoCad Map e adicionados ao SIG. Porém, observou-se um erro de posicionamento quando comparados com a rede de drenagem e com os lineamentos oriundos das imagens espectrais. Este erro na realidade corresponde a uma soma de erros, associada principalmente a distorções das fotografias aéreas e ao processo de georreferenciamento empregado. No entanto, não foi prejudicial à realização desta pesquisa, tendo em vista que este tipo de informação também foi extraído de imagens de satélite, além de terem sido checados em campo.

O mapa geológico passou por um processamento mais complexo, que correspondeu à sua vetorização com o uso do *software* AutoCad Map, seguido da subtração entre objetos distintos sobrepostos (litotipos) no ArcView 3.2 e posterior implementação no SIG.

Os dados que foram integrados e que serão aqui apresentados em conjunto, já foram mencionados separadamente nos capítulos pertinentes. No entanto, em caráter apenas interpretativo e sem maiores conclusões. Estes dados correspondem aos mapas geofísicos aeroeletromagnéticos nas frequências de 900 e 4.500 Hz, aos perfis eletromagnéticos terrestres (EM34-3XL), aos produtos das composições coloridas da imagem LandSat ETM-7 -

217_063 (lineamentos e rede de drenagem), aos lineamentos oriundos de fotografias aéreas, ao posicionamento de poços profundos e ao Modelo Digital do Terreno (MDT).

A figura 7.1 apresenta todos os dados citados no parágrafo anterior, excetuando as pseudo-seções referentes aos perfis eletromagnéticos terrestres, devido estas estarem no plano espacial XZ e os outros dados estarem no plano XY. Porém, as estações de leitura de cada perfil estão plotadas na figura 7.1 e os valores de condutividade aparente serão mencionados com referência às figuras 6.13, 6.14 e 6.15.

Aeroeletromagnético 4.500 Hz x 900 Hz

Analisando estas duas informações em conjunto, observa-se que o mapa geofísico correspondente à frequência de 900 Hz não exibe tantos lineamentos anômalos de direção norte-sul conforme apresentado no mapa referente à frequência de 4.500 Hz, principalmente na porção centro-norte da área, onde os lineamentos são mais comuns neste último. É importante ressaltar que os lineamentos com mais de 15 Km de comprimento, pertinentes aos dados adquiridos na frequência de 4.500 Hz, não ocorrem no mapa aeroeletromagnético de 900 Hz, sugerindo que esta informação não é consistente e confiável para o seu propósito, da forma como foi utilizado.

As características mais comuns aos dois mapas correspondem à anomalia linear de direção aproximada NW-SE paralela à calha do rio Juá e outras de direção norte-sul paralelas aos riachos efluentes deste rio (posicionados a sul da área), além de superfícies relativamente anômalas com valores de condutividade da ordem de 20 mS/m, localizadas na porção noroeste e leste da mesma. Uma vez que estas feições são bem condutivas e, portanto, fácil de serem detectadas pelo método aéreo.

É conhecido que a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas é inversamente proporcional a sua frequência. Portanto, o campo eletromagnético na frequência de 900 Hz atinge uma profundidade superior ao campo gerado numa frequência de 4.500 Hz. Desta forma, apesar de não termos o conhecimento da profundidade de investigação desta técnica aérea, mas fazendo uma comparação com os dados de condutividade aparente oriundos do levantamento terrestre, percebe-se a inexistência de algumas das discontinuidades de direção norte-sul destacadas no mapa aeroeletromagnético (4.500 Hz), o que vai ainda de acordo com a comparação deste mapa com os outros dados aqui adquiridos e apresentados a seguir.

Aeroeletromagnético 4.500 Hz e 900 Hz x Eletromagnético Terrestre (EM34-3XL)

O levantamento terrestre dos dados de condutividade aparente foi realizado ao longo de três perfis perpendiculares às anomalias lineares apresentadas no mapa aeroeletromagnético de 4.500 Hz (figura 6.8 e 6.9). A técnica EM34-3XL possibilita, em condições ideais, uma profundidade de investigação teórica de 60 m, portanto, todas as configurações deste equipamento foram utilizadas de modo a alcançar tal profundidade. É importante ressaltar que os valores de condutividade aparente foram adquiridos em estações com espaçamento de 40 m, ou seja, com um nível de detalhe superior ao levantamento aéreo, onde a distância entre as estações corresponde a 100 m. Os perfis eletromagnéticos realizados próximos aos poços profundos (P.51, 221, 222 e 223) não serão aqui discutidos por se tratarem de levantamentos restritos e por já terem sido considerados adequadamente no capítulo referente (capítulo 6).

A pseudo-seção referente ao Perfil_EM_01 (figura 6.13) não apresenta condutividades anômalas penetrativas correlatas aos lineamentos anômalos do mapa geofísico aéreo (4.500 Hz), excetuando o ponto 2560. Nas proximidades do poço profundo 221 e 74 foi identificada uma anomalia condutiva sobreposta a um lineamento anômalo do mapa, porém a profundidade desta anomalia não ultrapassa os 10 m, espessura aproximada do solo. Observa-se ainda nesta seção, assim como nas outras, que a partir de 15 m de profundidade, o terreno se torna no geral bem resistivo, inclusive nos locais onde ocorrem às anomalias aéreas. A zona anômala, que ocorre entre os pontos 2120 e 2520 foi investigada através de caminhamento elétrico (dipolo-dipolo), sendo que o resultado do processo de inversão 2D não exhibe anomalias geofísicas, somente uma variação nas espessuras do solo e para o topo da rocha inalterada (figura 6.21).

No Perfil_EM_02 ocorre uma boa correlação entre os valores anômalos de condutividade adquiridos entre os pontos 40 e 80 (figura 6.12) e uma incipiente anomalia linear contida no mapa geofísico. Este perfil exhibe ainda uma anomalia no ponto 2960, porém sem correlação com o mapa aeroeletromagnético de 4.500 Hz. Vale ressaltar que ao longo deste perfil ocorrem cinco extensos lineamentos condutivos no mapa aeroeletromagnético de 4.500 Hz e nenhum no mapa cuja frequência é de 900 Hz.

Uma estação de leitura referente à pseudo-seção do Perfil_EM_03 (figura 6.13) apresenta uma condutividade anômala penetrativa sobreposta a um lineamento anômalo exibível no mapa em apreço, que por sua vez estão paralelos a vales fluviais. Esta estação corresponde a distância 3330-3370 m. Neste caso, podemos concluir que este lineamento

anômalo está associado a descontinuidades dos litotipos, já que foi identificada também em imagens de satélite e fotografias aéreas a presença de feições estruturais neste local. Ademais, nenhuma outra analogia deste parâmetro geofísico entre as duas informações (aérea e terrestre) é identificável.

Os perfis eletromagnéticos terrestre apresentam uma melhor correlação com o mapa aeroeletromagnético de frequência 900 Hz, tendo em vista que neste, os lineamentos condutivos são menos frequentes que no de 4.500 Hz de frequência, conforme já referido.

Aeroeletromagnético 4.500 Hz x Vetores Espectrais e Foto-lineamentos

Com base na imagem orbital aqui trabalhada, foi possível extrair na forma de vetores duas informações importantes: a rede de drenagem característica da área e lineamentos de natureza geológica. A importância destas informações deve-se ao fato de que estes lineamentos podem corresponder a descontinuidades favoráveis ao armazenamento de água subterrânea em meio cristalino, e que a drenagem pode estar condicionada por estas descontinuidades, facilitando assim a sua identificação (riacho-fenda) além de poder corresponder a uma zona de recarga para aquíferos fissurais.

Observa-se da figura 7.1 que os lineamentos de direção aproximada norte-sul não são concordantes com os lineamentos anômalos característicos do mapa geofísico aéreo de frequência 4.500 Hz, excetuando os posicionados na porção centro-sul do mapa que estão relacionados aos cursos de drenagem e que foram identificados por meio do levantamento eletromagnético terrestre (Perfil_EM_03 – ponto 3330-3370). Quanto aos vetores que representam a rede de drenagem, observa-se uma boa correlação destes com o mapa geofísico aéreo, a ponto de a anomalia geofísica acompanhar todo o curso de alguns riachos e do rio Juá. Sabemos que alguns drenos podem ocorrer ao longo de descontinuidades, porém, os lineamentos condutivos mais expressivos que se localizam a norte da área, não possuem relação com estruturas geológicas.

Os lineamentos oriundos das fotografias aéreas, apesar do erro de posicionamento já comentado, são concordantes com os lineamentos extraídos das imagens de satélite, assim fica evidente que os comentários citados no parágrafo anterior são perfeitamente cabíveis para os fotolineamentos. Uma característica entre estas informações vetoriais diz respeito a maior frequência e menor dimensão (comprimento) dos fotolineamentos, sendo que isto se deve à diferença de escala entre as fotografias aéreas e imagens de satélite.

Com base nesta integração, adicionada aos dados de campo (atitude de fraturas) foi possível definir duas áreas-alvo para prospecção hidrogeológica por meio de caminhamentos elétricos e eletromagnéticos de detalhe. Estas áreas posicionam-se na porção noroeste e centro-leste e foram escolhidas devido à perfeita analogia entre os lineamentos estruturais oriundos tanto das fotografias aéreas quanto da imagem de satélite.

Aeroeletromagnético 4.500 Hz x Poços Profundos

Como já mencionado a área de pesquisa contém 23 poços profundos, sendo que destes, cinco (P.01, 02, 221, 222 e 223) foram locados com base em dados elétricos e eletromagnéticos terrestres adquiridos antes desta pesquisa e por outros profissionais. O posicionamento dos perfis geofísicos foi definido de acordo com os lineamentos anômalos norte-sul, exibíveis no mapa aereoeletromagnético (4.500 Hz). Estes cinco poços apresentam vazão inferior à 1 m³/h, inclusive, alguns foram considerados como improdutivos (tabela 3.1).

Os poços profundos 65, 66 e 67 possuem cada um, uma vazão de 6 m³/h e estão posicionados sobre uma anomalia linear de direção aproximada leste-oeste que está relacionada a uma descontinuidade perfeitamente identificada na imagem de satélite e na fotografia aérea. O mesmo ocorre com o poço 51, cuja vazão é de 4.5 m³/h, sendo que a anomalia geofísica aérea e a descontinuidade correlata, estão na direção aproximada norte-sul. A anomalia geofísica aérea referente ao poço 51 foi detectada durante a aquisição dos valores de condutividade aparente com o equipamento EM34-3XL (Perfil_EM_03), conforme já citado neste capítulo.

Modelo Digital do Terreno (MDT) x Drenagem

O modelo digital do terreno, cujos valores pseudotopográficos são oriundos do levantamento aerogeofísico, mostra uma perfeita concordância com a rede de drenagem extraída da imagem de satélite.

Este fato ocorre com mais destaque na porção central da área de pesquisa, onde toda a rede de drenagem que abastece o rio Juá está inserida num vale topográfico. Desta forma, com base na topografia e no gradiente hidráulico, observa-se que esta zona é a mais favorável para a recarga de aquíferos fissurais existentes, devido à concentração de água de origem fluvial ocorrer no eixo leste-oeste, que representa a calha do rio Juá, é tanto que três poços profundos localizados ao longo desta calha (65, 66 e 67) apresentam vazões de 6 m³/h. De modo

subordinado, observa-se na porção nordeste da área mais uma boa correlação entre a drenagem e a topografia.

Áreas-alvo x Geofísica Aérea, Vetores Espectrais e Foto-lineamentos

Como já mencionado, as duas áreas onde foram executadas as atividades de prospecção geofísica voltada a recursos hídricos subterrâneos foram selecionadas com base em lineamentos de origem estrutural, identificados em imagens de satélite e fotografias aéreas e investigados em trabalho de campo durante um reconhecimento geológico.

Integrando os limites das áreas-alvo com os lineamentos estruturais e com o mapa aeroeletromagnético de 4.500 Hz ou mesmo 900 Hz, observa-se que não há uma correlação entre os lineamentos estruturais de interesse e as anomalias condutivas para a área 01. Na área-alvo 02 (Fazenda Cairu), onde foi realizado o perfil EM_ER_02, ocorre uma correlação entre estas informações.

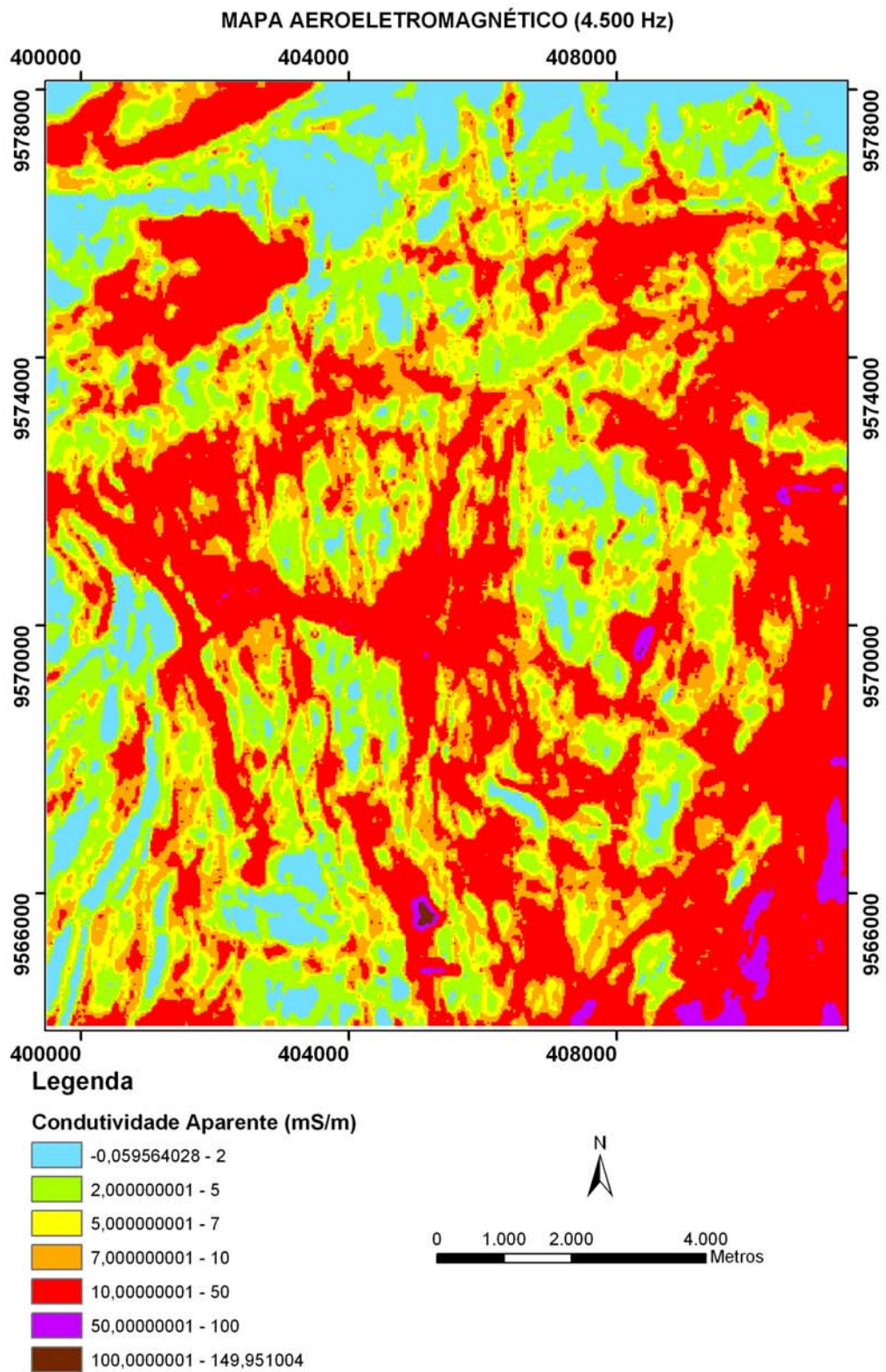
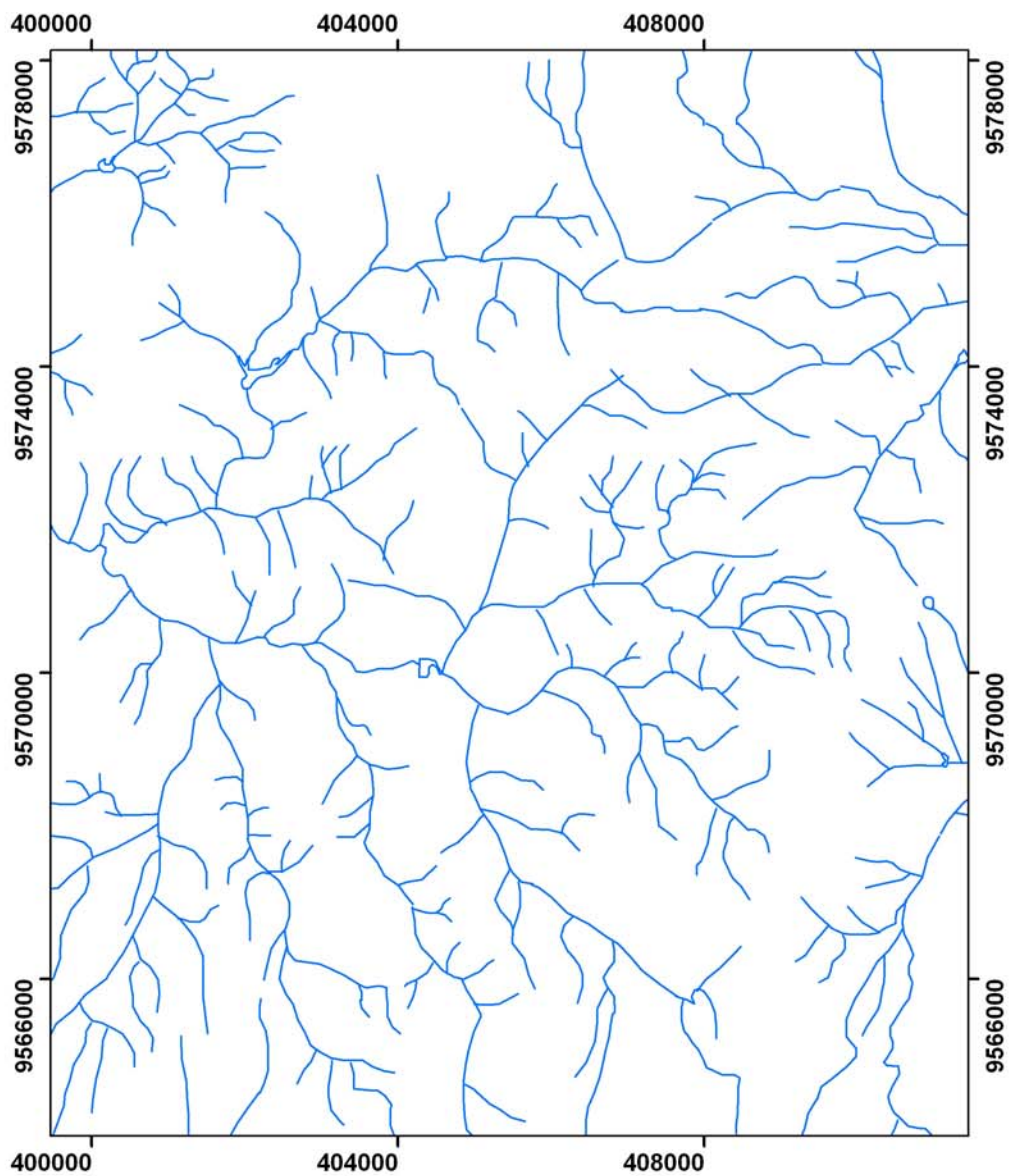
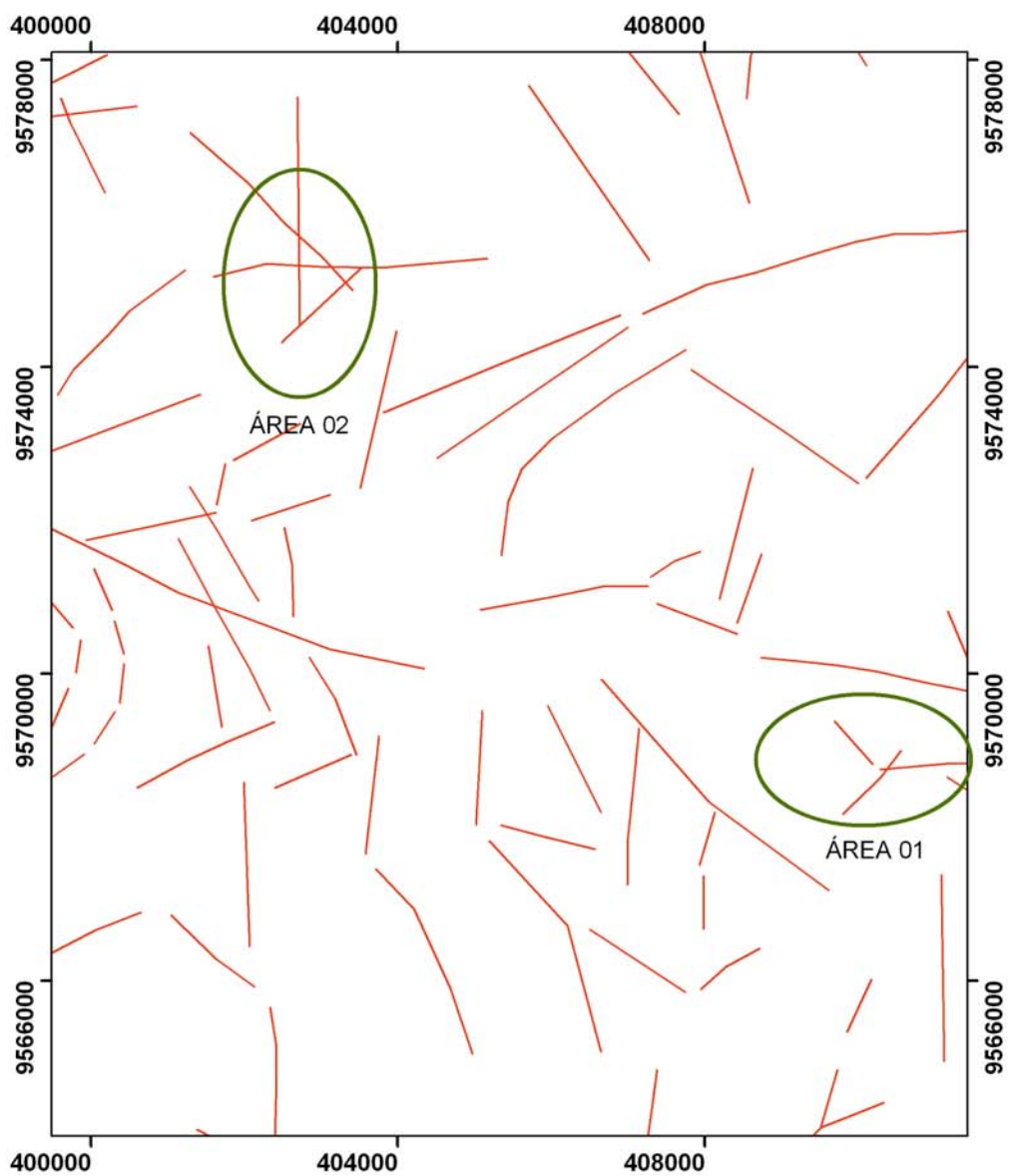


Figura 7.1 – Integração dos resultados.

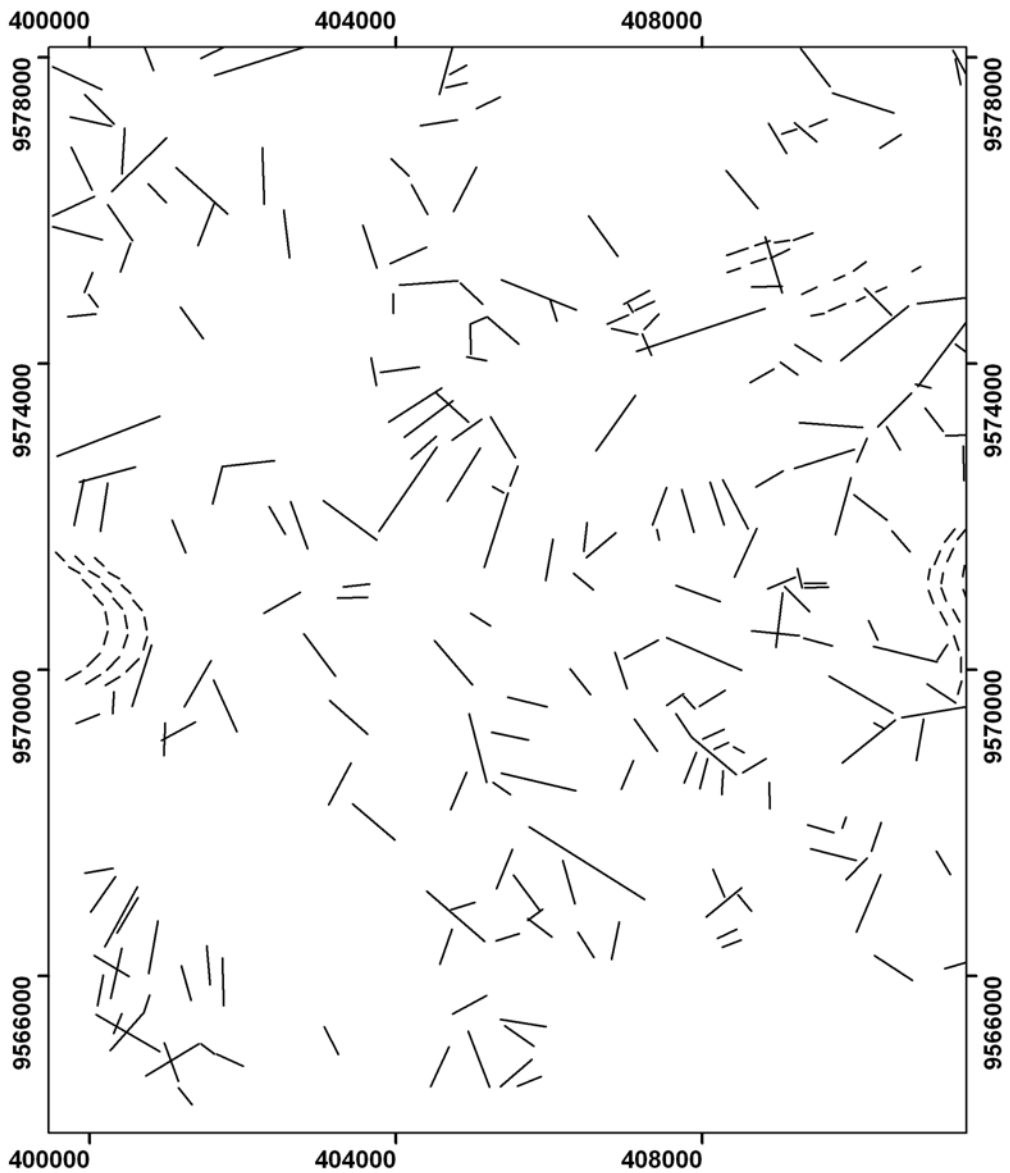
REDE DE DRENAGEM



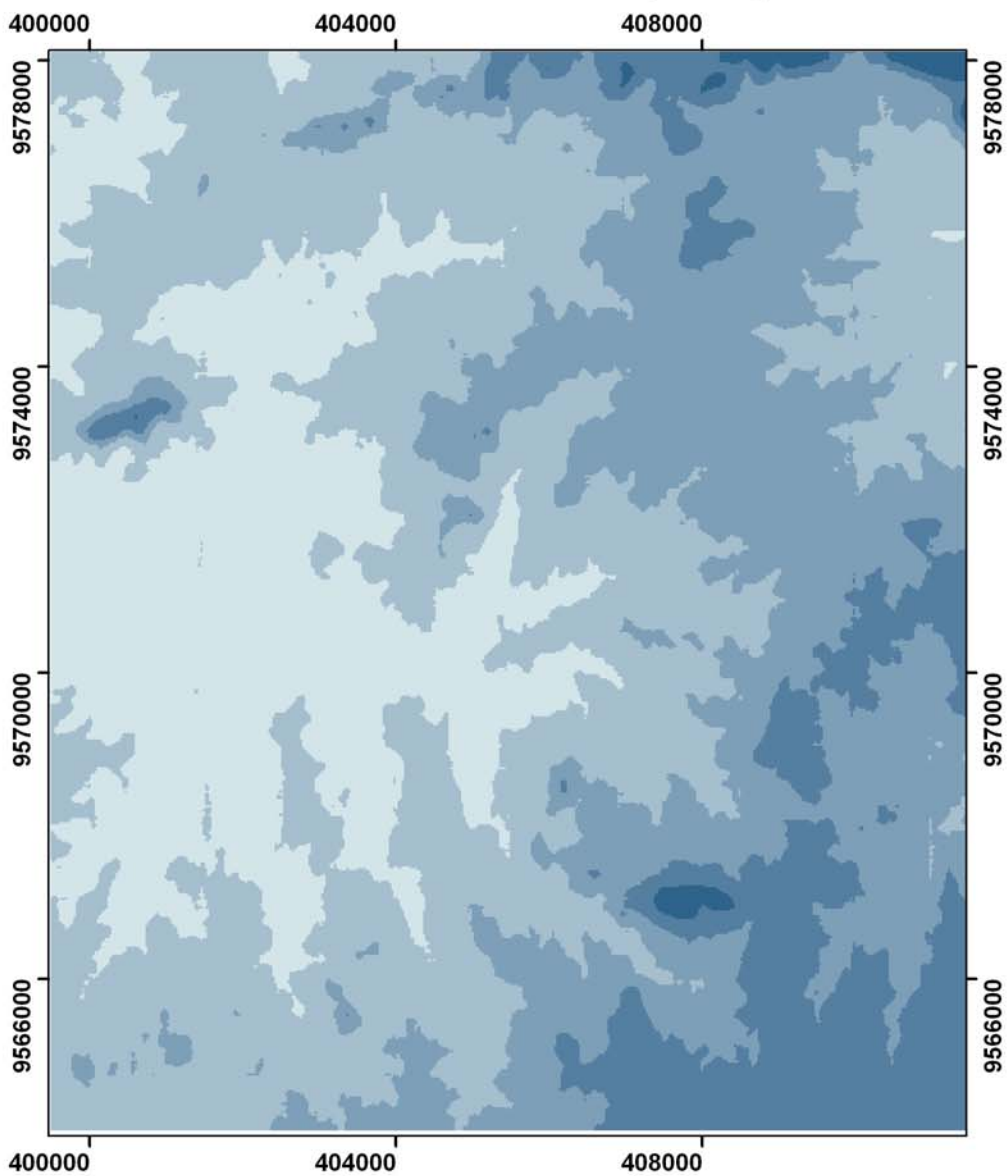
LINEAMENTOS DE ORIGEM ORBITAL & ÁREAS ALVO



FOTOLINEAMENTOS



MODELO DIGITAL DO TERRENO (IMAGEM)

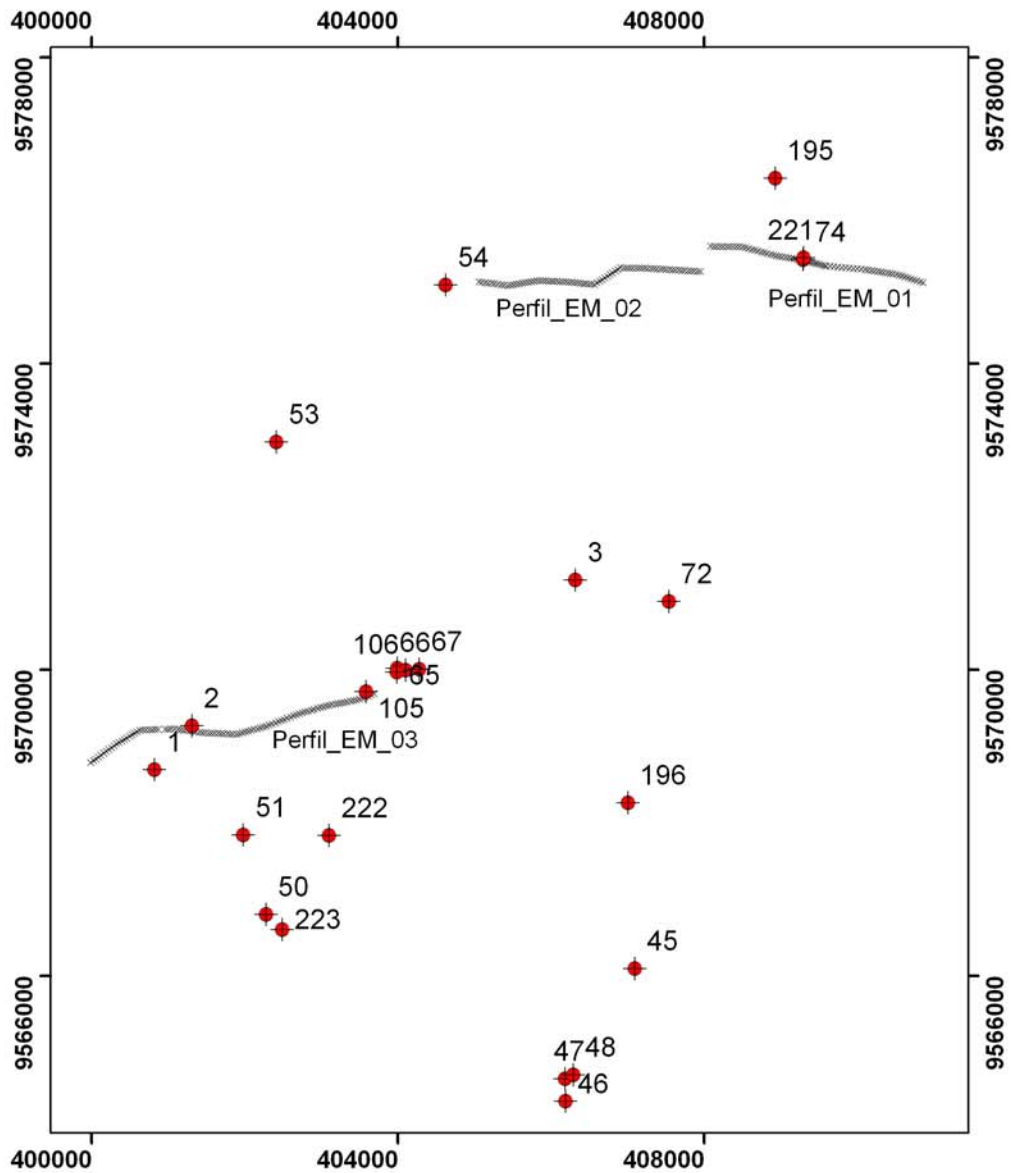


Legenda

Nível Topográfico (m)

	144,4252625 - 171,8417311
	171,8417312 - 187,9134541
	187,9134542 - 205,875968
	205,8759681 - 247,4733686
	247,4733687 - 386,4465027

POÇOS PROFUNDOS E PERFIS ELETROMAGNÉTICOS (EM34-3XL)



Poço	Vazão (m ³ /h)	Poço	Vazão (m ³ /h)
01	-	66	6,00
02	-	67	6,00
03	3,00	72	0,70
45	-	74	-
46	-	105	-
47	-	106	-
48	-	195	0,10
50	1,10	196	0,38
51	4,50	221	-
53	1,2	222	1,25
54	0,70	223	-
65	6,00		

Capítulo 8

8. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos, a metodologia utilizada e os resultados obtidos, apresentamos as seguintes conclusões:

- 1) A grande maioria dos lineamentos anômalos de direção norte-sul característicos do mapa aeroeletromagnético, cujos dados de condutividade aparente foram adquiridos na frequência de 4.500 Hz e em modo coaxial, não correspondem a zonas favoráveis ao armazenamento e captação de água subterrânea (descontinuidades), como outrora foram interpretados, tendo em vista que:
 - Através dos caminhamentos eletromagnéticos terrestres realizados com o equipamento EM34-3XL (Perfil_EM_01, 02 e 03) não foram mapeadas zonas com condutividade anômala e penetrativa coincidente com os lineamentos exibíveis no referente mapa, excetuando principalmente, as estruturas de direção norte-sul detectadas no Perfil_EM_03 (pontos 1880 e 3370). Estas estruturas representam na superfície a calha de dois riachos intermitentes que deságuam no Rio Juá.
 - Os lineamentos geológicos extraídos das imagens espectrais (Landsat-ETM7) e das fotografias aéreas que abrangem a região de estudo, não são tão frequentes e nem correlatos aos lineamentos geofísicos de condutividade anômala em questão, principalmente na porção norte da área, onde ocorre uma maior frequência dos lineamentos geofísicos. Porém há exceções, onde na porção sul da mesma, algumas destas informações são concordantes.
- 2) É provável que grande parte dos lineamentos anômalos característicos do mapa aeroeletromagnético (4.500 Hz – Coaxial) correspondam a ruídos originados durante a aquisição dos dados de condutividade aparente e ao longo das linhas de controle, uma vez que:
 - O produto da interpolação dos dados de condutividade aparente, adquiridos em frequência de 900 Hz e em modo coplanar, exibe também lineamentos de direção norte-sul, espaçados aproximadamente 500 m, porém com valores de condutividade

muito baixos (<10 mS/m) associados às linhas de controle, os quais podem ser extraídos através da aplicação de filtros específicos.

- O mapa pseudotopográfico, cujos valores também são oriundos do levantamento geofísico aéreo, apresenta também estruturas lineares topograficamente positivas orientadas na direção norte-sul e com espaçamento médio de 500 m.
- 3) O levantamento geofísico eletromagnético aéreo para a frequência de 4.500 Hz e em modo Coaxial, não atingiu profundidades consideráveis (aproximadamente maior que 20 m) para satisfazer o objetivo principal sugerido (identificação de estruturas que permitem o armazenamento e exploração de água subterrânea) visto que as anomalias identificadas refletem a rede de drenagem da área pesquisada, considerando os drenos de primeira, segunda e terceira ordem. É importante ressaltar que a calha de um rio ou de um riacho, corresponde a uma feição superficial e que nem sempre é coincidente com estruturas geológicas rúpteis penetrativas, conforme a definição do termo “Riacho-Fenda”.
- 4) Os dados aeroeletromagnéticos (4.500 Hz e 900 Hz) e espectrais (imagem Landsat ETM7 – composições coloridas) exibem uma respectiva assinatura referente as principais unidades geológicas, bem como a litotipos lenticulares e intrusões graníticas.
- 5) Os quatro poços profundos que produzem mais de 4 m³/h de água (P_51, 65, 66 e 67) recebem uma contribuição volumétrica importante dos sedimentos aluvionares, não sendo portanto esta contribuição exclusiva do aquífero fissural correspondente, já que:
- O poço 51 está posicionado próximo ao aluvião de um riacho intermitente de direção norte-sul e os demais se localizam nas proximidades do aluvião do rio Juá. Segundo informações contidas no cadastro de poços da CPRM, as entradas d’água para estes poços iniciam a 8 m de profundidade.
 - Segundo os dados obtidos com o equipamento eletromagnético EM34-3XL a espessura média do solo na área é de aproximadamente 10 m, sendo que nos aluviões está espessura aumenta para 15 m estando assim de acordo com as afirmativas mencionadas acima.

- 6) Como resultado dos esforços tectônicos atuantes na região foram geradas, além das estruturas de natureza dúctil (foliação, lineação...), duas direções preferenciais de fraturas, uma norte-sul e outra leste-oeste, seguidas das direções noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste. Os lineamentos extraídos das imagens de satélite e das fotografias aéreas são correlatos entre si e com as estruturas identificadas e medidas em campo, porém como já mencionado, são pouco correlatos com os lineamentos geofísicos anômalos característicos do mapa eletromagnético aéreo (4500 Hz – Coaxial).
- 7) A metodologia prospectiva terrestre realizada após a avaliação dos dados geofísicos aéreos, proporcionou os seguintes resultados bem satisfatórios:
- A área-alvo 01, mostrava-se bastante promissora para a captação de água subterrânea, pois existe uma boa correlação entre os lineamentos orbitais e as anomalias identificadas nas pseudo-seções eletromagnéticas; no entanto, a seção geométrica 2D referente à área, mostra que estas anomalias existem, porém são pouco penetrativas, atingindo uma profundidade de apenas 5 m. Desta forma, a área-alvo 01 não é favorável a exploração hídrica subterrânea.
 - Na área-alvo 02 - perfil 01, a perfeita concordância entre os quatro indícios analisados, nos assegura como sendo uma área favorável a exploração de água subterrânea por meio de um poço profundo, na posição 200 do caminhamento ER. Estes indícios correspondem aos lineamentos extraídos de imagens orbitais (imagens de satélite e fotografias aéreas) e anomalias geofísicas identificadas através da aplicação da técnica elétrica (caminhamento elétrico) e eletromagnética (EM34-3XL).
 - Na área-alvo 02 – perfil 02, os lineamentos de origem orbital são concordantes entre si e com as estruturas medidas nos afloramentos, porém os resultados provenientes do levantamento geofísico (elétrico e eletromagnético) não exibem anomalias coincidentes com os lineamentos referentes, caracterizando-a como desfavorável a exploração de água subterrânea.
- 8) O modo de aquisição dos valores de condutividade aparente realizado pelo projeto PROASNE e o tratamento destes, envolve custos elevados, até mesmo exorbitantes, quando comparados com os custos associados a técnicas geofísicas de aquisição terrestre e

com propósito similar ao do referido projeto. Assim, uma metodologia prospectiva envolvendo principalmente a análise de imagens orbitais (espectrais e fotografias aéreas), de mapas temáticos (geológico, hidrogeológico, topográfico...), investigação geológica em campo e levantamento geofísico terrestre com o uso de técnicas prospectivas (métodos elétricos e eletromagnéticos), resulta numa relação custo-resultado-benefício positivo para os profissionais executores da atividade prospectiva e para a população beneficiada.

- 9) A natureza digital de todos os dados aqui utilizados favoreceu na interpretação conjunta, graças à geração de um SIG. Através desta ferramenta foi criado um acervo digital com informações diversas (geologia, imagens espectrais, topografia, dados pontuais...) que poderão e deverão ser utilizados em trabalhos futuros com outros enfoques e até mesmo como continuação desta pesquisa. Desta forma, é notório a importância e aplicabilidade desta técnica de integração de dados digitais e georreferenciados a qualquer pesquisa científica, principalmente do ramo das Geociências.

- 10) A área pesquisada possui um baixo potencial hídrico subterrâneo, onde aproximadamente 70% dos poços profundos catalogados são improdutivos. Uma das alternativas remediadoras que está sendo adotada para o combate a escassez de água, corresponde à captação pluvial por meio de cisternas e barragens de pequeno e médio porte. Porém, as precipitações na região são escassas e a água armazenada nestes reservatórios está mais sujeita a contaminações do que a de origem subterrânea. Através dos resultados obtidos ficou evidente que por meio de um trabalho criterioso e interdisciplinar é possível reduzir substancialmente erros de natureza prospectiva e beneficiar cada vez mais a população local com poços profundos produtivos.

9. RECOMENDAÇÕES

As recomendações sugeridas a seguir, têm o objetivo de dar continuidade à pesquisa científica, abordar outro propósito e validar a metodologia prospectiva aqui adotada.

- 1) Realizar o processamento dos dados geofísicos eletromagnéticos aéreo (4500 Hz – Coaxial e 900 Hz – Coplanar) com software específico, por meio de aplicação de filtros e outros tratamentos adequados, para a definição de verdadeiras anomalias geofísicas associadas a descontinuidades dos litotipos.
- 2) Validar as possíveis e principais anomalias geofísicas pertinentes ao novo produto aeroeletromagnético, por meio da aplicação de métodos geofísicos terrestres (elétricos e/ou eletromagnéticos) e integração com vetores provenientes de imagens de sensoriamento remoto.
- 3) Desenvolver um estudo tectônico de detalhe de modo a definir as direções dos esforços compressivos e tracionais atuantes, que favorecerá a determinação das direções das descontinuidades propícias ao armazenamento de água subterrânea.
- 4) Perfurar um poço profundo na área-alvo 02 (Fazenda Cairu), mais especificamente na anomalia geofísica detectada nos perfis EM 01 e ER 01 (pontos 110 e 200, respectivamente), de modo a corroborar a metodologia prospectiva adotada para esta pesquisa. A perfuração de um poço profundo correspondia a uma das etapas deste trabalho, porém a falta de recursos financeiros impossibilitou esta atividade.

Referências Bibliográficas

ABEM WADI – **Instruction Manual**. Bromma, Suécia. (Manual do equipamento, sem data).

Arthaud, M. H., Vasconcelos, A. M., Nogueira Neto, J. A., Oliveira, F. V. C., Parente, C. V., Monié, P., Liégeois, J. P., Caby, R., Fetter, A. – 1998 – **Main Structural Features os Precambrian Domains from Ceará (NE Brasil)**. Abstracts. 14th International Conference on Basement Tectonics. Ouro Preto, MG, Brazil.

Babiker, M. e Gudmundsson, A. – 2004 – **The Effects of Dikes and Faults on Groundwater Flow in an Arid Land: the Red Sea Hills, Sudan**. Journal of Hydrology, V. 297, 256-273.

Braga, A. C. O. – **Métodos Geométricos Aplicados**. Disponível em <http://ns.rc.unesp.br/igce/aplicada/geometricos-V3>. Acesso em 04/03/2005.

Brito Neves, B. B. de, Campos Neto, M. C. da, Fuck, R. A. – 1999 – **From Rodinia to Western Gondwana: An Approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and Orogenic Collage**. Episodes., Journal of International Geoscience. Vol. 22, p. 155-166.

Campos, A. F. de. – 2004 – **Utilização de Métodos Geométricos na Caracterização de Rochas Fraturadas. Estudo de Caso nos Arenitos do Grupo Itararé – Bacia do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Castro, G. L. – 1982 – **Contribuição à Geologia da Folha de Irauçuba (SA.24-Y-D-V): Área a Sul de Irauçuba/CE**. Relatório de Graduação, Universidade de Fortaleza, Ceará.

Cavalcante, J. C. – 2003 – **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. (1:500.000). Ministério de Minas e Energia, CPRM – Fortaleza/CE.

Cordeiro, W.; Marinho, J. M. L.; Cordeiro, V. F. – 2004 – **VLF e Eletroresistividade na Localização de Poços em Rochas Fraturadas**. I Simpósio de GPR e I Simpósio de Hidrogeofísica. Fortaleza/CE.

- Coriolano, A. C. F. – 2002 – **Reavaliação de Critérios Estruturais na Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos, com Ênfase na Neotectônica e Sensoriamento Remoto.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
- Costa, W. D. e Braz da Silva, A. B. – 1997 – **Hidrogeologia dos Meios Anisotrópicos.** In: Feitosa, F. A. C. e Manoel Filho, J., (eds.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações.* CPRM, LABHID-UFPE, 133-174.
- Costa Filho, W. D. – 2000 – **Locação de Poços em Rochas Cristalinas; Manual Prático de Orientação.** Fortaleza: ABAS/SEBRAE/CE. 1º Edição. 40p.
- Crosta, A. P. – 1992 – **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Ed. rev. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 170p.
- Cunha, L. S. da. – 2002 – **Prospecção de Água Subterrânea em Terrenos Sedimentares na Região Litorânea Cearense (Cascavel-Ce): Integração de Dados Gofísicos, Hidrogeológicos e Hidroquímicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Departamento de Geologia.
- Dias, R. L. F. – 1998 – **Intervenções Públicas e Degradação Ambiental no Semi-Árido Cearense (O Caso de Irauçuba).** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Departamento de Economia Agrícola.
- Edwards, L. S. – 1977 – A Modified Pseudosection for Resistivity and Induced-Polarization. *Geophysics*, 42, 1020 – 1036.
- Feitosa, E. C. – 1997 – **Pesquisa de Água Subterrânea.** In: Feitosa, F. A. C. e Manoel Filho, J., (eds.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações.* CPRM, LABHID-UFPE, 53-80.

- Fetter, A., Van Schmus, W. R., Santos, T. J. S. dos, Arthaud, M. H., Nogueira Neto, J. A. – 1997 – **Geocronologia e Estruturação do Estado do Ceará: NW da Província Borborema, NE Brasil**. XVII Simpósio de Geologia do Nordeste, Boletim nº15, Fortaleza/Ceará.
- Fetter, A., Santos, T. J. S. dos, Van Schmus, W. R., Hackspacher, P. C., Brito Neves, B. B. de, Arthaud, M. H., Nogueira Neto, J. A., Wernick, E. – 2003 – **Evidence for Neoproterozoic Continental Arc Magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana**. *Gondwana Research*, V. 6, No. 2, pp. 265-273, Japan.
- Geotomo Software – 2004 – **Geoelectrical Imaging 2D & 3D (RES2DINV)**. Tutorial do *Software*. Malásia.
- Iplance – 1997 – **Atlas do Ceará**. Fortaleza. 65p.
- Janardhana Raju, N. e Reddy, T. V. K – 1998 – **Fracture Pattern and Electrical Resistivity Studies for Groundwater Exploration**. *Environmental Geology*, V.34, N. 2-3, 175-182.
- LASA (Engenharia e Prospecção S.A.) – 2001 – **Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Eletromagnetométricos e Seleção das Anomalias Eletromagnéticas**. Projeto Aerogeofísico Água Subterrânea do Nordeste do Brasil. Volume 1.
- Luiz, J. G., Costa e Silva, L. M. da – 1995 – **Geofísica de Prospecção**. Belém: Editora Universitária UFPA e Editora CEJUP. Volume 1.
- Manoel Filho, J. – 1997 – **Ocorrência das Águas Subterrâneas**. In: Feitosa, F. A. C. e Manoel Filho, J., (eds.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM, LABHID-UFPE, 13-33.
- Maranhão, C. M. L. – 1994 – **Alguns Aspectos da Interpretação Fotogeológica Aplicados à Prospecção de Aquíferos em Meio Cristalino**. *Revista de Geologia*, Vol.7: 17-25. Fortaleza-CE.

- Martini, P. B. – 1985 – **Aplicação de Sensores Remotos na Prospecção de Água Subterrânea em Rochas Cristalinas**. I Simpósio Nacional de Água Subterrânea em Rochas Fraturadas. Belo Horizonte-MG. ABAS.
- Mcneill, J. D. – 1980 – **Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers**. TN-6, Geonics Inc., Mississauga, Ontario.
- Ministério das Minas e Energia – 1981 – **Projeto RADAMBRASIL (Levantamento de Recursos Naturais)**. Folha SA. 24 – Fortaleza. Volume 21, 488p – Rio de Janeiro.
- Moraes Novo, E. M. L. de – 1995 – **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 2ª edição. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo-SP. 306p.
- Oliveira, D. C. de e Mohriak, W. U. – 2003 – **Jaibaras Trough: An Important Element in the Early Tectonic Evolution of the Parnaíba Interior Sag Basin, Northern Brazil**. Marine and Petroleum Geology 20. 351-383p.
- Oliveira, R. G. de; Ribeiro, J. A.; Souza Filho, O. A. de – 2003 – **Estudos Geofísicos Para Locação de Poços Tubulares no Aquífero Fissural da Área-Piloto Juá-Irauçuba/CE**. MME, CPRM, PROASNE. Fortaleza-CE. 35p.
- Orellana, E. – 1972 – **Prospection Geoeletrica em Corriente Continua**. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p.
- Pinéo, T. R. G. – 2003 – **Geologia e Geofísica (EM-34 e VLF) Aplicadas à Identificação de Zonas Favoráveis à Captação de Recursos Hídricos Subterrâneos na Localidade do Fumo – Irauçuba/CE**. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará (UFC).
- Reynolds, J. M. – 1997 – **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. John Wiley & Sons. Inglaterra. 796p.
- Ribeiro, J. A., Feitosa, F. A. C., Oliveira, J. F. de, Souza Filho, O. A., Feitosa, E. C. – 2003 – **Zonas (eixos) Condutivas em Rochas Cristalinas na Região de Irauçuba, Norte do Estado do Ceará, Brasil**. Revista Águas Subterrâneas. N.17. Curitiba. ABAS. 113-124.

Souza Filho, O. A. de – 1998 – **Geologia e Mapa de Previsão de Ocorrência de Água Subterrânea Folha SA. 24-Y-D-V – Irauçuba, Ceará.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto-MG.

Srinivasa Rao, Y., Reddy, T. V. K., Nayudu, P. T. – 2000 – **Groundwater Targeting in a Hard-Rock Terrain Using Fracture-Patterns Modeling, Niva River Basin, Andhra Pradesh, India.** Hydrogeology Journal, V. 8, N. 5, 494-502.

Ubaldo de Sá, J. – 2003 – **Relatório de Acompanhamento da Perfuração de Poços na Região de Irauçuba, Estado do Ceará.** SOHIDRA. Fortaleza/Ce.

Vallejo, L. I. G. de, Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. – 2002 – **Ingeniería Geológica.** Editora: Isabel Capella. Pearson Educación, Madrid – Espana. 744p.

Ward, S. H. – 1990 – **Resistivity and Induced Polarization Methods.** In, Ward, S. H. Ed., Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol.I, SEG Special Publication.