



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRAULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HIDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL



RAFAEL LIMA DESSART

**INTEGRAÇÃO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E ESTRUTURAIS NA
INVESTIGAÇÃO HIDROGEOLÓGICA NO EMBASAMENTO CRISTALINO NO
MUNICÍPIO DE BAGÉ/RS**

PORTO ALEGRE

2022

RAFAEL LIMA DESSART

**INTEGRAÇÃO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E ESTRUTURAIS NA
INVESTIGAÇÃO HIDROGEOLÓGICA NO EMBASAMENTO CRISTALINO NO
MUNICÍPIO DE BAGÉ/RS**

Defesa de Tese de Doutorado submetida ao
Programa de Pós-graduação em Recursos
Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito à obtenção do grau de
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental.

Orientador: Dr. Prof. Pedro Antônio Roehe Reginato (IPH - UFRGS)

Co-orientadora: Dra. Profa. Cristiane Heredia Gomes (UNIPAMPA)

PORTO ALEGRE

2022

Dessart, Rafael Lima
INTEGRAÇÃO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E
ESTRUTURAIS NA INVESTIGAÇÃO HIDROGEOLÓGICA NO
EMBASAMENTO CRISTALINO NO MUNICÍPIO DE BAGÉ/RS /
Rafael Lima Dessart. -- 2022.
132 f.
Orientador: Pedro Antônio Reginato.

Coorientadora: Cristiane Gomes.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Hidrogeologia. 2. Geofísica. 3.
Aeromagnetometria. 4. Eletromagnético. I. Reginato,
Pedro Antônio, orient. II. Gomes, Cristiane,
coorient. III. Título.

RAFAEL LIMA DESSART

**INTEGRAÇÃO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS E ESTRUTURAIS NA
INVESTIGAÇÃO HIDROGEOLÓGICA NO EMBASAMENTO CRISTALINO NO
MUNICÍPIO DE BAGÉ/RS**

Defesa de Tese de Doutorado submetida ao
Programa de Pós-graduação em Recursos
Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito à obtenção do grau de
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental.

Aprovado em: Porto Alegre, 14 de março de 2022.

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato – IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Franciéle Schwanck Carlos – IPH/

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa – UFRGS

Prof. Dr. Éverton Frigo – UNIPAMPA

RESUMO

A região de Bagé passa por recorrentes períodos de estiagem, com isso prejudicando o abastecimento público e da zona rural. O objetivo deste estudo é avaliar a compartimentação e o comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, no município de Bagé (RS). Como na região há ocorrência de um sistema aquífero fraturado a locação de poços produtivos se torna mais complexa, o que exige a necessidade de compreender os fatores que condicionam o sistema e o fluxo da água subterrânea. Assim, foi realizada uma análise dos dados hidrogeológicos de 174 poços tubulares, dados de estruturas das imagens SRTM, processamento dos dados aeromagnéticos e caminhamentos eletromagnéticos. Para realizar a avaliação estrutural da área, foram traçados lineamentos morfoestruturais nas imagens SRTM, em diferentes escalas (1:1.000.000; 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000 e 1:50.000). Também foram identificadas estruturas por meio da utilização dos diversos filtros, métodos de realce nos dados aeromagnéticos. Foi realizado coleta de campo de dados eletromagnéticos com o objetivo de confirmar e validar os dados dos lineamentos interpretados. Os dados dos poços tubulares foram analisados e utilizados para a caracterização hidrogeológica e dos compartimentos estruturais. Os resultados indicaram a ocorrência de cinco estruturas principais, que possuem extensões entre 8,62 e 30km. Com base nessas estruturas foram definidas cinco zonas (Z1, Z2, Z3, Z4 e Z5) que possuem características distintas. Os resultados obtidos mostram que a região do município de Bagé se apresenta compartimentada, com diferentes produtividades e *trends* estruturais. Também ficou evidente que mesmo com um *trend* estrutural preferencial para NE, as principais estruturas aquíferas ocorrem na direção NW, secundariamente para NE, e com uma acentuação de sua produtividade quando associado a cruzamentos de estruturas, tanto para NW como NE. A interpretação integrada dos dados aéreos e terrestres permitiu reconhecer o comportamento hidrogeológico e estrutural do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, onde os resultados, apresentados em mapas georreferenciados, apresentam as principais zonas e *trends* com estruturas armazenadoras e confinantes para esta região.

ABSTRACT

The Bagé region goes through recurrent periods of drought, thus harming public and rural supplies. The objective of this study is to evaluate the subdivision and hydrogeological behavior of the Crystalline Basin Aquifer System, in the municipality of Bagé (RS). As there is an occurrence of a fractured aquifer system in the region, the location of productive wells becomes more complex, which requires the need to understand the factors that condition the system and the flow of groundwater. Thus, an analysis of the hydrogeological data of 174 tubular wells, data of structures from SRTM images, processing of aeromagnetic data and electromagnetic paths was performed. To carry out the structural assessment of the area, morphostructural lineaments were traced on the SRTM images, at different scales (1:1,000,000; 1:500,000, 1:250,000, 1:100,000 and 1:50,000). Structures were also identified through the use of different filters, enhancement methods in the aeromagnetic data. Field collection of electromagnetic data was carried out in order to confirm and validate the data of the interpreted lineaments. The data from the tubular wells were analyzed and used for the hydrogeological characterization and the structural compartments. The results indicated the occurrence of five main structures, which have extensions between 8.62 and 30km. Based on these structures, five zones were defined (Z1, Z2, Z3, Z4 and Z5) that have different characteristics. The results obtained show that the region of the municipality of Bagé is compartmentalized, with different productivity and structural trends. It was also evident that even with a preferential structural trend towards NE, the main aquifer structures occur in the NW direction, secondarily towards NE, and with an accentuation of their productivity when associated with crossings of structures, both for NW and NE. The integrated interpretation of the aerial and terrestrial data allowed to recognize the hydrogeological and structural behavior of the Crystalline Basement Aquifer System, where the results, presented in georeferenced maps, present the main zones and trends with storage and confining structures for this region.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (RETÂNGULO VERMELHO).....	15
FIGURA 2: LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES (CPRM, 2013).	17
FIGURA 3: MUNICÍPIO DE BAGÉ INDICANDO A CONCENTRAÇÃO DE AÇUDES PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA NA PORÇÃO SUL (PONTOS PRETOS), EM RELAÇÃO A PORÇÃO NORTE. BASE DOS DADOS FORNECIDO PELA AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA).	18
FIGURA 4: MAPA DOS DOMÍNIOS GEOTECTÔNICOS DO RIO GRANDE DO SUL E URUGUAI, MODIFICADO DE CASTILLO LOPES 2009, CHEMALE ET AL., 2012, OLIVEIRA ET AL., 2016 E GRUBER ET AL., 2016. AS LINHAS CONTINUAS REPRESENTAM AS ESTRUTURAS REGIONAIS LÍMITROFES DAS UNIDADES TECTONO-ESTRATIGRÁFICAS.	21
FIGURA 5: ALGUMAS FEIÇÕES DA ESTRUTURA DE UM PLÚTON: T – DIACLASES TRANSVERSAIS EM RELAÇÃO A ESTRUTURA FLUIDAL; L – DIACLASES LONGITUDINAIS; E – DIACLASES PARALELAS ÀS ISOTERMAS, PODENDO SER TAMBÉM PRODUZIDAS PELO ALÍVIO DE CARGA; C – DIACLASES DE CISALHAMENTO E V – DIACLASES PREENCHIDAS POR MEIO DE SOLUÇÕES ASCENDENTES, CONSTITUINDO OS VEEÍROS (LEINZ, 1966).	27
FIGURA 6: DIAGRAMA DE ROSETA COM AS FREQUÊNCIAS ABSOLUTAS (DALL’AGNESE,2015).	29
FIGURA 7: (A) DIAGRAMA DE FREQUÊNCIAS DOS LINEAMENTOS E (B) DIAGRAMA DE COMPRIMENTO DOS LINEAMENTOS NO TERRENO TIJUCAS (MACHADO, 2014).	29
FIGURA 8: (A) DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DOS LINEAMENTOS E (B) DIAGRAMA DE COMPRIMENTO DOS LINEAMENTOS NOS GRANITOIDES DO BATÓLITO DE PELOTAS (MACHADO, 2014).	30
FIGURA 9: A) DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DOS LINEAMENTOS E (B) DIAGRAMA DE COMPRIMENTO DOS LINEAMENTOS NAS ROCHAS SEDIMENTARES DA BACIA DO PARANÁ (MACHADO, 2014).	31
FIGURA 10: MAPA HIDROGEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE BAGÉ, COM DESTAQUE PARA A ÁREA DE ESTUDO, ADAPTADO DE MACHADO E FREITAS (2005).	33
FIGURA 11: MAPA DE FAVORABILIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (NETO, 2016).	37
FIGURA 12: MAPA GEOMORFOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE BAGÉ, COM DESTAQUE PARA A ÁREA DE ESTUDO (IBGE, 2019).	38
FIGURA 13: MAPA DE SOLOS DO MUNICÍPIO DE BAGÉ, COM DESTAQUE PARA A ÁREA DE ESTUDO (IBGE, 2019).	40
FIGURA 14: POLARIZAÇÃO MAGNÉTICA	44
FIGURA 15: MAPA DA FASE DO SINAL ANALÍTICO (A) E DOS LINEAMENTOS INTERPRETADOS (B) (FILHO ET AL., 2002).	46
FIGURA 16: MAPA DO GRADIENTE HORIZONTAL (A) E DOS LINEAMENTOS INTERPRETADOS (B) (FILHO ET AL., 2002).	46
FIGURA 17: MAPA DO ARCABOUÇO MAGNÉTICO-ESTRUTURAL GERADO A PARTIR DOS DADOS MAGNÉTICOS PROCESSADOS E INTERPRETADOS E MODELO DIGITAL DO TERRENO (FERREIRA ET AL., 2005).	48
FIGURA 18: MAPA DO ARCABOUÇO MAGNÉTICO-ESTRUTURAL DO GRUPO CAIUÁ NA ÁREA DE ESTUDO SOBREPOSTA AO MAPA MAGNÉTICO RESIDUAL MICRONIVELADO. A – ZONA DE FALHA CÂNDIDO DE ABREU – CAMPO MOURÃO; B – LINEAMENTO DE SÃO SEBASTIÃO; C – FALHA DO RIO ALONZO (BETTÚ ET AL., 2006).	49
FIGURA 19: MAPA DO ARCABOUÇO ESTRUTURAL-MAGNÉTICO INTEGRADO COM AS PRINCIPAIS ZONAS ANÔMALAS, EM VERMELHO (MOCELLIN E FERREIRA, 2009).	50
FIGURA 20: MAPA ESTRUTURAL-MAGNÉTICO DA ÁREA DE ESTUDO, COM OS LINEAMENTOS INTERPRETADOS EM IMAGENS DE SENSORIAMENTO, LINHAS TRACEJADAS NA DIREÇÃO NS (BONGIOLO ET AL., 2014).	51

FIGURA 21: MAPA AEROMAGNÉTICO DE REDUÇÃO AO POLO (HEWAIDYET AL., 2015).....	52
FIGURA 22: MAPA AEROMAGNÉTICO DA INTENSIDADE MAGNÉTICA TOTAL (RANGANAIET AL., 2017).	53
FIGURA 23: COMPOSIÇÃO 3D DA PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL, EVIDENCIANDO A PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA ÁGUA (VALORES MAIS ALTOS EM VERMELHO/ROXO E OS VALORES MAIS BAIXOS EM AZUL) PARA CORRELAÇÃO DIRETA (RANGANAI ET AL., 2017).....	54
FIGURA 24: PRINCÍPIO ELETROMAGNÉTICO (MOREIRA ET AL, 2007)	57
FIGURA 25: PRINCÍPIO ELETROMAGNÉTICO QUE PRODUZ O CAMPO SECUNDÁRIO.....	57
FIGURA 26: PERFIL ELETROMAGNÉTICO E PERFIL GEOLÓGICO (FONSECA E BISCHOFF, 1982).....	58
FIGURA 27: MODELO ELETROMAGNÉTICO ELABORADO A PARTIR DOS PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE DA LINHA1 (AQUINO, 2000)	59
FIGURA 28: ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS DE MAPEAMENTO E MONITORAMENTO DA CONTAMINAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA USANDO INSTRUMENTOS GEOFÍSICOS (JOSÉ E CAVALCANTE, 2000)	59
FIGURA 29: ZONA ANÔMALA CONDUTIVA DETECTADA AO LONGO DO PERFIL REALIZADO NA ÁREA DO FUMO, CRUZANDO O POÇO PROFUNDO. A FIGURA MOSTRA OS DADOS COLETADOS COM O ARRANJO DIPOLO HORIZONTAL E DIPOLO VERTICAL (BRANCO E CUNHAM,2001).	60
FIGURA 30: PSEUDOSEÇÃO DA RESISTIVIDADE APARENTE COM TEM DO PERFIL 1 (CARRASQUILA E ULUGERGERLI, 2006).	61
FIGURA 31: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA NO DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.	64
FIGURA 32: LOCALIZAÇÃO DO AEROLEVANTAMENTO E A LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BAGÉ E DA ÁREA DE ESTUDO (EM VERMELHO).....	68
FIGURA 33: RECORTE DAS LINHAS DE VOO DO LEVANTAMENTO REALIZADO NO PROJETO DE AEROLEVANTAMENTO DO CPRM (2010), QUE ABRANGE A ÁREA DE ESTUDO (LIMITE VERMELHO) 69	
FIGURA 34: PRINCIPAIS MÉTODOS DE REALCE DAS ANOMALIAS MAGNÉTICAS (FERREIRA ET AL., 2010).....	71
FIGURA 35: LOCALIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS COM RELAÇÃO A CIDADE DE BAGÉ.....	80
FIGURA 36: AS DUAS CONFIGURAÇÕES DAS ANTENAS DIPOLARES UTILIZADAS EM CAMPO (ADAPTADO DE BORGES, 2007).....	81
FIGURA 37: MAPA DE LINEAMENTOS INTERPRETADOS NA ESCALA 1:1.000.000.....	84
FIGURA 38: MAPA DE LINEAMENTOS INTERPRETADOS NA ESCALA 1:500.000.	84
FIGURA 39: MAPA DE LINEAMENTOS INTERPRETADOS NA ESCALA 1:250.000.	85
FIGURA 40: MAPA DE LINEAMENTOS INTERPRETADOS NA ESCALA 1:100.000.	85
FIGURA 41: MAPA DE LINEAMENTOS INTERPRETADOS NA ESCALA 1:50.000.	86
FIGURA 42: MAPA MAGIGRF COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS	88
FIGURA 43: MAPA POLO COM CONTINUAÇÃO PARA CIMA DE 500M COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	88
FIGURA 44: MAPA DA AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (ASA) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	88
FIGURA 45: MAPA DA INCLINAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO (ISA) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	88
FIGURA 46: MAPA DO GRADIENTE HORIZONTAL EM X (GX) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	89
FIGURA 47: MAPA DO GRADIENTE HORIZONTAL EM Y (GY) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	89
FIGURA 48: MAPA DO GRADIENTE VERTICAL EM Z (GZ) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	89
FIGURA 49: MAPA DO GRADIENTE HORIZONTAL TOTAL (GHT) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	89

FIGURA 50: MAPA DA INCLINAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO DO GRADIENTE HORIZONTAL TOTAL (ISA_GHT) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	90
FIGURA 51: MAPA DA INCLINAÇÃO DO GRADIENTE HORIZONTAL TOTAL (IGHT) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	90
FIGURA 52: MAPA <i>THETA MAP</i> COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	90
FIGURA 53: MAPA DO <i>SIGNAL TRANSFORM (ST)</i> COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.	90
FIGURA 54: MAPA DA INCLINAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO SOMADO A INCLINAÇÃO DO GRADIENTE TOTAL (ISA+IGHT) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.	91
FIGURA 55: MAPA DA INCLINAÇÃO DO SINAL ANALÍTICO SUBTRAÍDO DA INCLINAÇÃO DO GRADIENTE TOTAL (ISA-IGHT) COM O TRAÇADO DOS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	91
FIGURA 56: MAPA DO ARCABOUÇO MAGNÉTICO/ESTRUTURAL GERAL SOBRE O MAPA DA DERIVADA VERTICAL PARA A ÁREA DE ESTUDO.	92
FIGURA 57: DECONVULAÇÃO DE EULER RELACIONADO COM OS LINEAMENTOS MAGNÉTICOS DO GRID ASA PARA A ÁREA DE ESTUDO.....	93
FIGURA 58 – MAPA DA ANÁLISE DOS LINEAMENTOS DE SUPERFÍCIE, SRTM, INTEGRAÇÃO COM OS LINEAMENTOS DE SUBSUPERFÍCIE, DADOS AEROMAGNÉTICOS, DIAGRAMAS DE FREQUÊNCIA ABSOLUTA E OS POÇOS (PONTOS VERMELHOS).	94
FIGURA 59: MAPA DAS ZONAS ESTRUTURAIS FEITOS COM BASE NA ANÁLISE DE LINEAMENTOS.	95
FIGURA 60: MAPA LITOLÓGICO SIMPLIFICADO UTILIZADO NA CORRELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DOS POÇOS.	97
FIGURA 61: MAPA DO ARCABOUÇO ESTRUTURAL COM AS DELIMITAÇÕES DAS ZONAS HIDROGEOLÓGICAS E DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	100
FIGURA 62: DIAGRAMAS DE ROSETA POR ZONAS.....	101
FIGURA 63: MAPA MAGNETOMÉTRICO ASA COM AS ESTRUTURAS INFERIDAS E A RELAÇÃO COM OS LINEAMENTOS 1:1.000.000 (LINHAS BRANCAS), DA COMPARTIMENTAÇÃO.....	102
FIGURA 64: GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA DA PRODUTIVIDADE DOS POÇOS UTILIZADOS NO ESTUDO.	105
FIGURA 65 – MAPA DE LINEAMENTOS RELACIONADOS COM OS MAIORES VALORES DE CAPACIDADE ESPECÍFICA.....	105
FIGURA 66: LOCALIZAÇÃO DOS CAMINHAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS COM AS ESTRUTURAS INTERPRETADAS.	108
FIGURA 67: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 1.....	109
FIGURA 68: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 2.....	109
FIGURA 69: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 5.....	110
FIGURA 70: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 6.....	110
FIGURA 71: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 7.....	111
FIGURA 72: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 16.....	111
FIGURA 73: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 17.....	112
FIGURA 74: PERFIL DE CONDUTIVIDADE ELETROMAGNÉTICA DO PONTO 18.....	112
FIGURA 75: CAPACIDADE ESPECÍFICA COM OS PONTOS DE CAMPO DO LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO.	113
FIGURA 76: MODELO CONCEITUAL PARA A ÁREA DE ESTUDO.....	115
FIGURA 77: MAPA LITOLÓGICO COM AS VARIAÇÕES DE CAPACIDADE ESPECÍFICA DOS POÇOS OCORRENTES NA ÁREA DE ESTUDO.	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPILAÇÃO DOS DADOS DA FIGURA 23	55
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	72
TABELA 3: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	72
TABELA 4: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	73
TABELA 5: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	73
TABELA 6: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	74
TABELA 7: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	74
TABELA 8: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	75
TABELA 9: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016)	75
TABELA 10: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	76
TABELA 11: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (COM BASE EM FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, IN SILVA, 2016).	76
TABELA 12: CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE REALCE APLICADO NA ÁREA DE ESTUDO (CASTRO ET AL., 2018).	77
TABELA 13: ÍNDICES ESTRUTURAIS DOS CORPOS MAGNÉTICOS.	78
TABELA 14: APRESENTA A RELAÇÃO DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E A PROFUNDIDADE NOS DIPOLOS HORIZONTAIS E VERTICAIS.	81
TABELA 15: PROFUNDIDADES DE EXPLORAÇÃO DO EM-34 E O ESPAÇAMENTO ENTRE BOBINAS.	81
TABELA 16: RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO DOS LINEAMENTOS DOS MAPAS AEROMAGNÉTICOS.	87
TABELA 17: CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO COM BASE NOS DADOS DOS POÇOS.	96
TABELA 18: PRODUTIVIDADE DOS POÇOS DAS UNIDADES HIDROLITOLÓGICAS.	98
TABELA 19: SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DE CADA ZONA	100
TABELA 20: CARACTERIZAÇÃO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA (M ³ /H/M) POR ZONAS.	103
TABELA 21: CARACTERIZAÇÃO DA VAZÃO (M ³ /H) POR ZONAS	103
TABELA 22: CARACTERIZAÇÃO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA (M ³ /H/M) POR ZONAS.	104
TABELA 23: ATITUDE DAS ESTRUTURAS INTERPRETADAS NOS PERFIS ELETROMAGNÉTICOS.	113

Sumário

Sumário.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Aspectos Gerais.....	13
1.2 Área de Estudo.....	15
1.3 Justificativa.....	16
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo Geral.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Contexto Geológico Regional.....	20
3.2 Caracterização Estrutural.....	25
3.3 Contexto Hidrogeológico.....	31
3.3.1 Sistema Aquífero Livre Palermo Rio/Bonito.....	33
3.3.2 Aquitardos Permianos.....	34
3.3.3 Aquicludo Eopaleozóico.....	34
3.3.4 Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II.....	35
3.4 Geomorfologia.....	38
3.5 Solos.....	40
3.6 Aeromagnetometria na Hidrogeologia.....	43
3.7 Método Eletromagnético na Hidrogeologia.....	56
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.1 Levantamento dos poços tubulares.....	65
4.2 Análise de Lineamentos Morfoestruturais e Magnéticos.....	65
4.3 Hidrogeologia.....	67
4.4 Processamento Aeromagnetométrico.....	67
4.4.1 Pré-processamento.....	69
4.4.2 Processamento Qualitativo – Principais métodos de realce de anomalias.....	70
4.4.2.1 Redução ao Polo.....	71
4.4.2.2 Continuação Para Cima.....	71
4.4.2.3 Gradiente Vertical (GZ).....	72
4.4.2.4 Gradientes horizontais (GX e GY).....	72
4.4.2.5 Gradiente Horizontal Total (GHT).....	73
4.4.2.6 Amplitude do Sinal Analítico (ASA).....	73

4.4.2.7	Inclinação do Sinal Analítico (ISA).....	74
4.4.2.8	Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT_ISA).....	74
4.4.2.9	Theta map.....	75
4.4.2.10	Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA_GHT).....	75
4.4.2.11	Inclinação do Gradiente Horizontal Total (IGHT).....	75
4.4.2.12	Signum Transform	76
4.4.2.13	Inclinação do Sinal Analítico mais Inclinação do Gradiente Horizontal Total (ISA+IGHT) e Inclinação do Sinal Analítico menos Inclinação do Gradiente Horizontal Total (ISA-IGHT)	77
4.4.2.14	Deconvolução de Euler	77
4.5	Análise das Unidades Hidrolitológicas	79
4.6	Análise da Compartimentação Estrutural e Hidrogeológica	79
4.7	Levantamento Geofísico Terrestre –Eletromagnético	79
4.8	Modelo Hidrogeológico Conceitual do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino da Região de Bagé	82
5	RESULTADOS.....	83
5.1	Identificação e Análise de Lineamentos.....	83
5.2	Arcabouço Magnético-Estrutural	86
5.3	Análise Estrutural da Superfície e Integração de Dados de Subsuperfície.....	93
5.4	Análise Hidrogeológica.....	95
5.5	Análise das Unidades Hidrolitológica	97
5.6	Compartimentação Estrutural.....	99
5.7	Compartimentação Hidrogeológica	103
5.8	Análise Hidrogeológica e Relação com a Compartimentação Estrutural.....	104
5.9	Caracterização Estrutural e Hidrogeológica das Zonas	106
5.10	Levantamento Geofísico Terrestre – Método Eletromagnético Indutivo	107
5.11	Modelo Hidrogeológico Conceitual do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino da Região de Bagé	114
6	CONCLUSÃO.....	117
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

A porção meridional do Estado do Rio Grande do Sul passa por recorrentes períodos de estiagem, com isso prejudicando o abastecimento público e irrigação das lavouras. Para contornar esse problema a população rural constrói reservatórios e/ou açudes para captação de água da chuva e de pequenas nascentes. Já a cidade de Bagé conta com o abastecimento público através de três barragens e com poços tubulares profundos que são utilizados por indústrias e no desenvolvimento de atividades comerciais e agrícolas (LEIVA, 2006; SILVA, 2010 e VARONE et al., 2010).

A frequência de anos considerados secos é maior no sul do Estado, do que no norte, sendo que nas áreas de Campanha e Baixo Vale do Uruguai, a frequência média de anos secos atinge 20%. Nessas regiões do Estado ocorrem as mais intensas e extensas estiagens, como mostram as séries históricas disponíveis de observações meteorológicas (BERLATO, 1992, LEIVAS ET AL., 2006).

Conforme Varone et al. (2010), a análise dos totais anuais de chuva através do método dos quantis, em Bagé/RS, mostrou que eventos de secas são recorrentes na região. Entre os anos de 1912 e 1960 ocorreu a maior parte dos casos, e nas últimas três décadas somente seis anos apresentaram valores referentes aos intervalos de secos ou muitos secos. Já a taxa de retorno de eventos de seca foi de 2,8 anos. Também foi observado que no período de 2000 a 2010, apenas dois anos (2005 e 2006) foram classificados como secos, o que mostra um relativo aumento da precipitação na região de Bagé/RS.

Bammesberge (2020) verificou que, na região da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, ocorreu um aumento da precipitação pluviométrica nas estações de verão, inverno e primavera ao longo dos anos de 1981 a 2018. O outono apresentou diminuição da precipitação pluviométrica no decorrer dos anos, pode ocorrer maior tendência à estiagem neste período.

Na área de estudo há ocorrência de aquífero fraturado que está associado ao Complexo Granito-Gnáissico Bagé, composto por ortognaisses e granitóides monzo a granodioríticos foliados, com mármores de rochas supracrustais. A captação de água nestes aquíferos é realizada por meio de poços tubulares profundos sendo as mesmas utilizadas para diferentes fins.

Conforme Machado e Freitas (2005), os aquíferos fraturados ocorrentes na área de estudo fazem parte do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, associado às rochas graníticas, gnáissicas e filonito que estão localmente afetados por fraturas e falhas. Geralmente apresentam capacidade específica baixa inferior a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, e quando os poços ocorrem em rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor.

Neste tipo de associação litológica, o sistema aquífero ocorre em estruturas tectônicas (fraturas e falhas), que podem ser conectadas, bem como compartimentadas. Com isso, a circulação da água subterrânea vai estar condicionada a ocorrência destas estruturas e de suas características (MACHADO e FREITAS, 2005).

Conforme o DAEB, a principal utilização da água subterrânea na região urbana de Bagé é, considerando-se que a maioria dos poços estão localizados nessa região, para abastecimento público, privado e para indústrias. Também, mas em raros casos, é utilizada para pecuária, irrigação e dessedentação animal. O principal recurso para a área rural é a construção de açudes para coleta de água da chuva e de nascentes.

A baixa produção dos poços cadastrados na região, no Complexo Granito-Gnáissico Bagé, demonstra a necessidade de realizar estudos visando uma locação eficiente e precisa para a instalação de novos poços. Desta forma, este estudo pretende identificar as estruturas, suas compartimentações e relacioná-las com os dados de vazão e capacidade específica medidos em poços tubulares profundos no Complexo Granito-Gnáissico Bagé, na região metropolitana e arredores de Bagé, região sul do estado do Rio Grande do Sul.

Para tanto, foi realizada a integração dos dados geológicos, estruturais, geofísicos (aeromagnetometria e eletromagnético) e hidrogeológicos

(hidrodinâmicos e de produtividade). Assim, a partir da integração destes dados, foi elaborado um modelo conceitual do sistema aquífero fraturado, que mostre como ocorre a água subterrânea na região, estruturas responsáveis pela compartimentação e formação dos aquíferos fraturados, bem como regiões mais favoráveis a captação da água subterrânea.

1.2 Área de Estudo

O município de Bagé está localizado na região sudoeste do Rio Grande do Sul (Figura 1). Conforme informações da Prefeitura municipal de Bagé, o município compreende uma área de unidade territorial de 4.093,582 km², com uma altitude média de 212m. Sua população é estimada em 122.209 habitantes (2017), sendo que destes cerca de 84% (102.656 habitantes) na área urbana e 16%, 19.553 habitantes, na área rural. Sua economia está baseada, principalmente, na agricultura, pecuária, atividade industrial predominantemente do benefício de laticínios e comércio local.

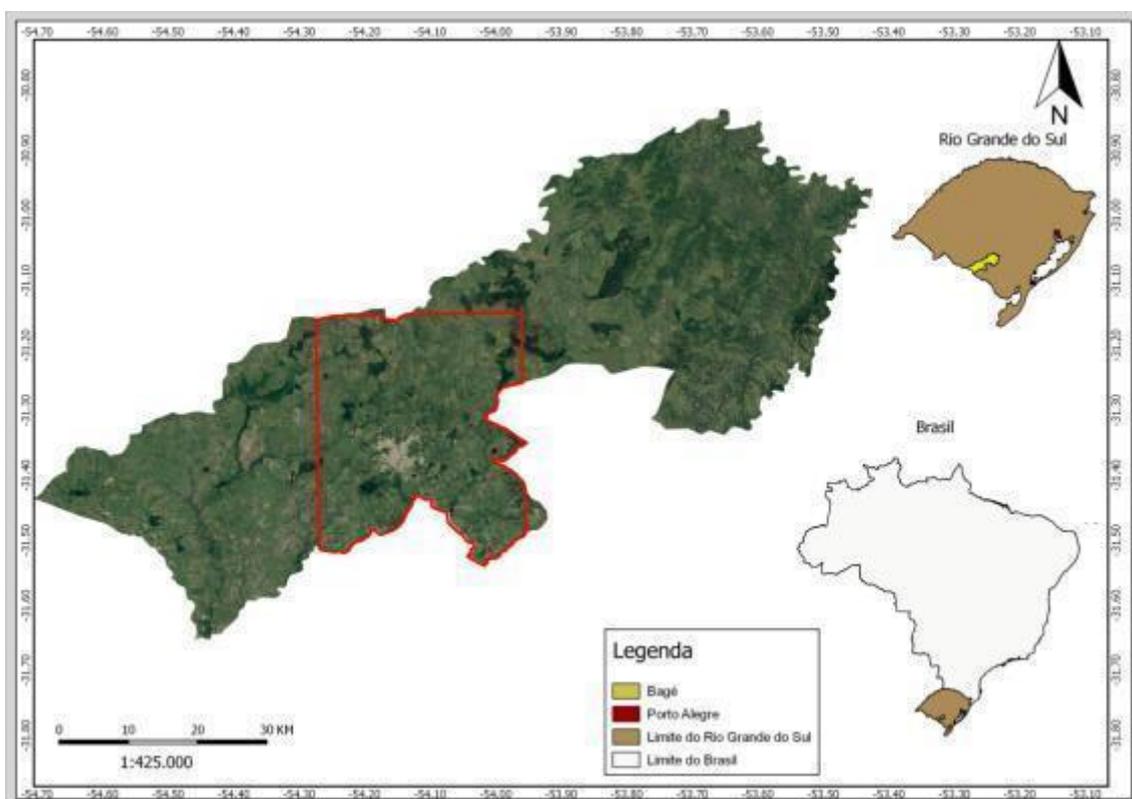


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo (retângulo vermelho).

Conforme o Departamento de Água, Arroios e Esgoto de Bagé (DAEB), o sistema de abastecimento é realizado através da captação de água nas três barragens: Emergencial, Piray e Sanga Rasa. A seguir a água captada passa por um processo de tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETA), tornando-se adequada para ser distribuída para a população. É importante salientar que este abastecimento só atende a área urbana do município, sendo que na área rural o abastecimento é feito individualmente ou em associações de água, poço tubular e coleta de água em açudes e nascentes.

1.3 Justificativa

No município de Bagé a captação da água subterrânea ocorre através de poços que estão localizados em diferentes áreas do município, sendo que na região metropolitana há maior ocorrência de pontos de captação (Figura 2), cadastrados no programa SIAGAS da CPRM.

Nas regiões rurais o abastecimento é realizado por meio da captação de açudes, nascentes ou armazenamento da água da chuva.

Em função disto, as áreas rurais e vilarejos tornam-se dependentes exclusivamente da captação da chuva e das possíveis ocorrências de nascentes, principalmente na porção sul do limite do município (Figura 3).

Assim, a escolha desta região para o estudo se justifica devido aos longos períodos de *déficit* hídrico, grandes períodos de seca e pelo aumento da demanda. Evidencia-se a necessidade de perfuração de novos poços tanto para atender a demanda gerada pelo crescimento socioeconômico do município, bem como para tentar amenizar os problemas gerados com as estiagens e *déficit* hídricos. Desta forma, foi delimitada uma área de detalhe junto a cidade de Bagé e arredores, pois esta região concentra todos os poços perfurados.

Além disso, como na região de estudo há ocorrência de um sistema aquífero fraturado, há necessidade de se analisar e compreender os fatores condicionantes desse sistema e do fluxo da água subterrânea.

Isso pode ser realizado por meio da aplicação de métodos e técnicas voltadas para a obtenção de dados geológicos, geofísicos e hidrogeológicos, que permitirão uma melhor compreensão do sistema aquífero. Com isso, será possível compreender melhor os condicionantes e a compartimentação do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, na área de estudo. Também, haverá melhorias nos processos de locação e perfuração de poços, bem como na exploração dos aquíferos fraturados, tendo reflexo no sistema de abastecimento e no desenvolvimento social e econômico da região.

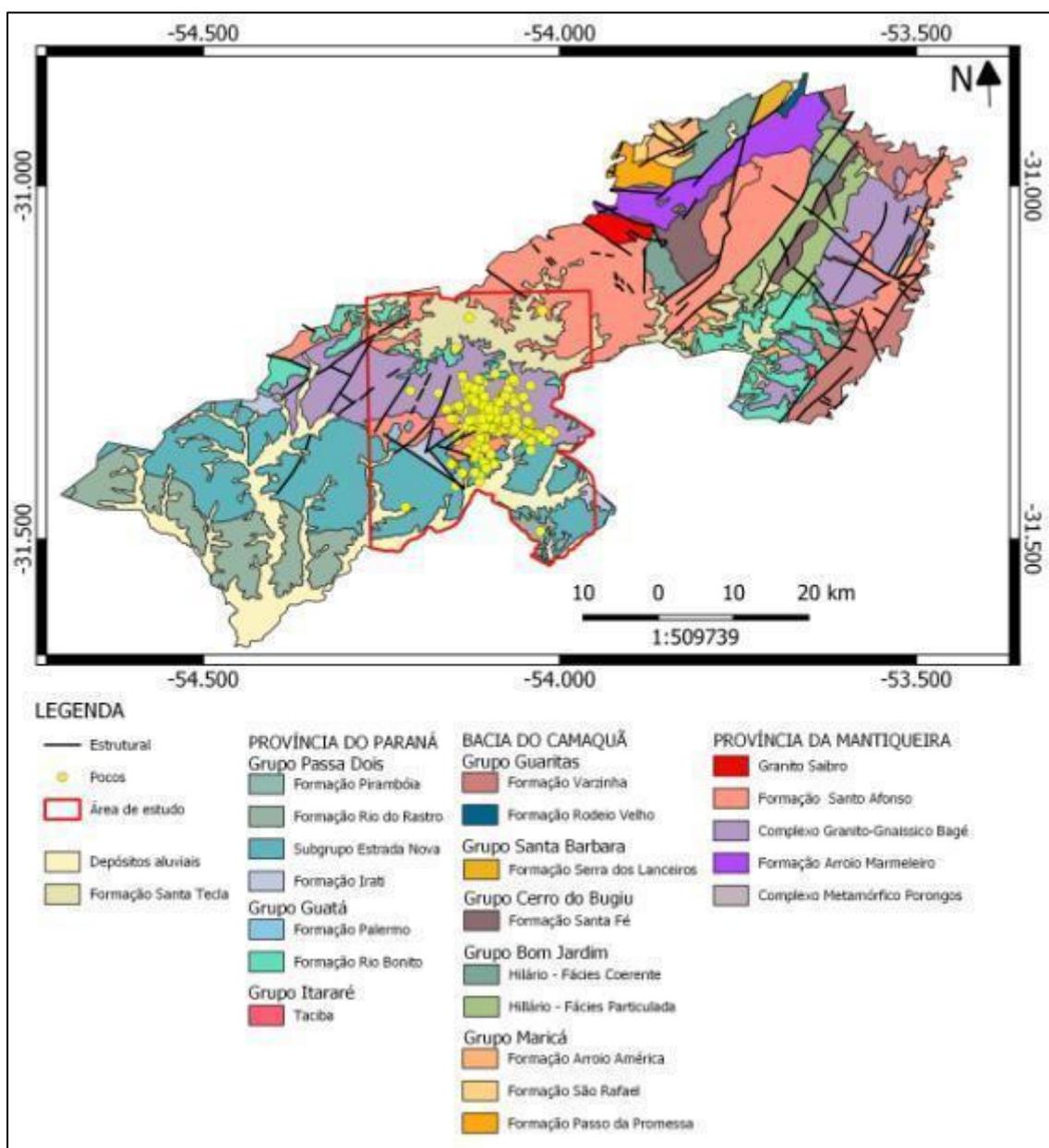


Figura 2: Localização dos poços tubulares (CPRM, 2013).

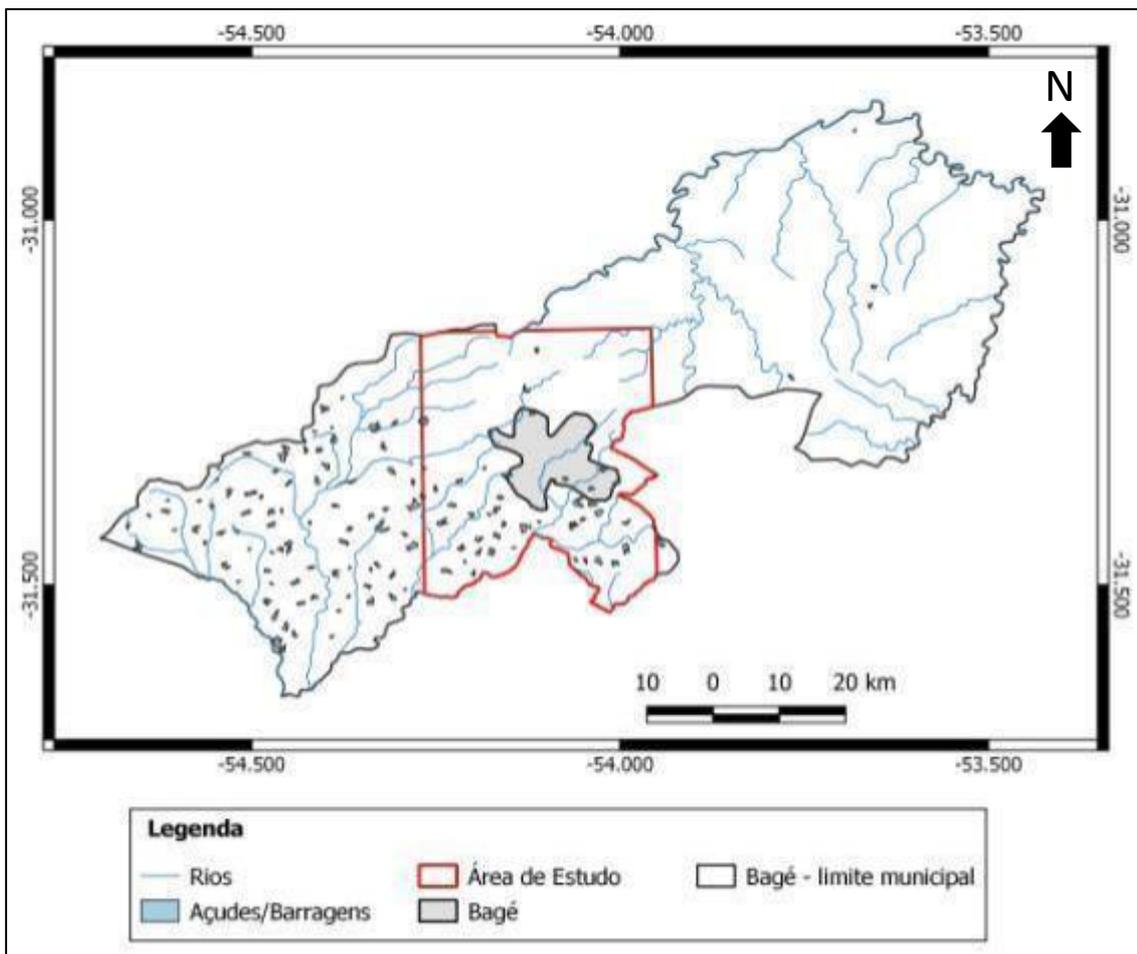


Figura 3: Município de Bagé indicando a concentração de açudes para captação de água na porção sul (pontos pretos), em relação a porção norte. Base dos dados fornecido pela Agencia Nacional de Águas (ANA).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal é realizar o estudo do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino na região de Bagé, por meio da integração de dados geofísicos, estruturais, geológicos e hidrogeológicos, visando com isso avaliar os fatores condicionantes e elaborar um modelo conceitual para esse sistema aquífero.

2.2 Objetivos Específicos

1. Individualizar e correlacionar as estruturas em superfície, através de dados de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Modelo Digital do Terreno - MDT), com as de subsuperfície (geofísica – aeromagnetometria e eletromagnético), com o objetivo de identificar os condicionadores dos aquíferos fraturados e as regiões de maior favorabilidade a ocorrência de água subterrânea;
2. Classificar e hierarquizar as estruturas identificadas, segundo critérios qualitativos de potencialidade hidrogeológica;
3. Produzir um modelo hidrogeológico conceitual do sistema aquífero fraturado na área de estudo;
4. Determinar regiões com maior potencial para captação da água subterrânea com base na análise de dados de sensoriamento remoto, geológicos, hidrogeológicos e geofísicos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os fundamentos conceituais sobre as características geológicas, estruturais, hidrogeológicas, do sistema aquífero embasamento cristalino na área de estudo, bem como sobre os métodos de levantamento e dados aerogeofísicos.

3.1 Contexto Geológico Regional

O Escudo Sul-rio-grandense abrange uma área aproximada de 65.000 km², sendo localizado na porção meridional da Província da Mantiqueira (CHEMALE, 2000) e englobando o Cinturão Dom Feliciano. Conforme Hartmann et al. (2007), o escudo é o resultado dos processos de geração e deformação de crosta continental e oceânica.

O Cinturão Dom Feliciano é composto por quatro unidades geotectônicas (Figura 4) relacionadas aos momentos pré, sin e pós-colisionais da Orogênese Brasileira: Terreno Taquarembó (Paleoproterozóico); Terreno São Gabriel; Terreno Tijucas e Batólito de Pelotas. Estas unidades geotectônicas correspondem a colisão entre os Crátons Rio de La Plata e Kalahary no Neoproterozóico. Após estes eventos temos a formação da calha tectônica, Bacia do Camaquã, como o estágio final de colisão Neoproterozóica. Desta forma, compreendendo o que foi definido por Fragoso-Cesar et al. (2003) como Supergrupo Camaquã.

Segundo Philipp et al. (2016), o Terreno Taquarembó ocorre no sudoeste do escudo com uma foliação de alto grau subvertical, próxima de EW gradando para NW. A principal unidade é o Complexo Granítico Santa Maria Chico, que se caracteriza por gnaisses tonalíticos a granodioríticos, gnaisses trondhjemíticos, metagabros e metapiroxenitos, corpos lenticulares de metaperidotitos, serpentinitos e xistos magnesianos a talco, tremolita e mármore. As rochas foram afetadas intensamente por retrometamorfismo de contato, devido à intrusão de grande volume de magma granítico Neoproterozóico. O Complexo Granulítico

Santa Maria Chico (Paleoproterozóico) é intrudido por granitos neoproterozóicos e coberto pela sequência vulcano-sedimentar da Bacia do Camaquã.

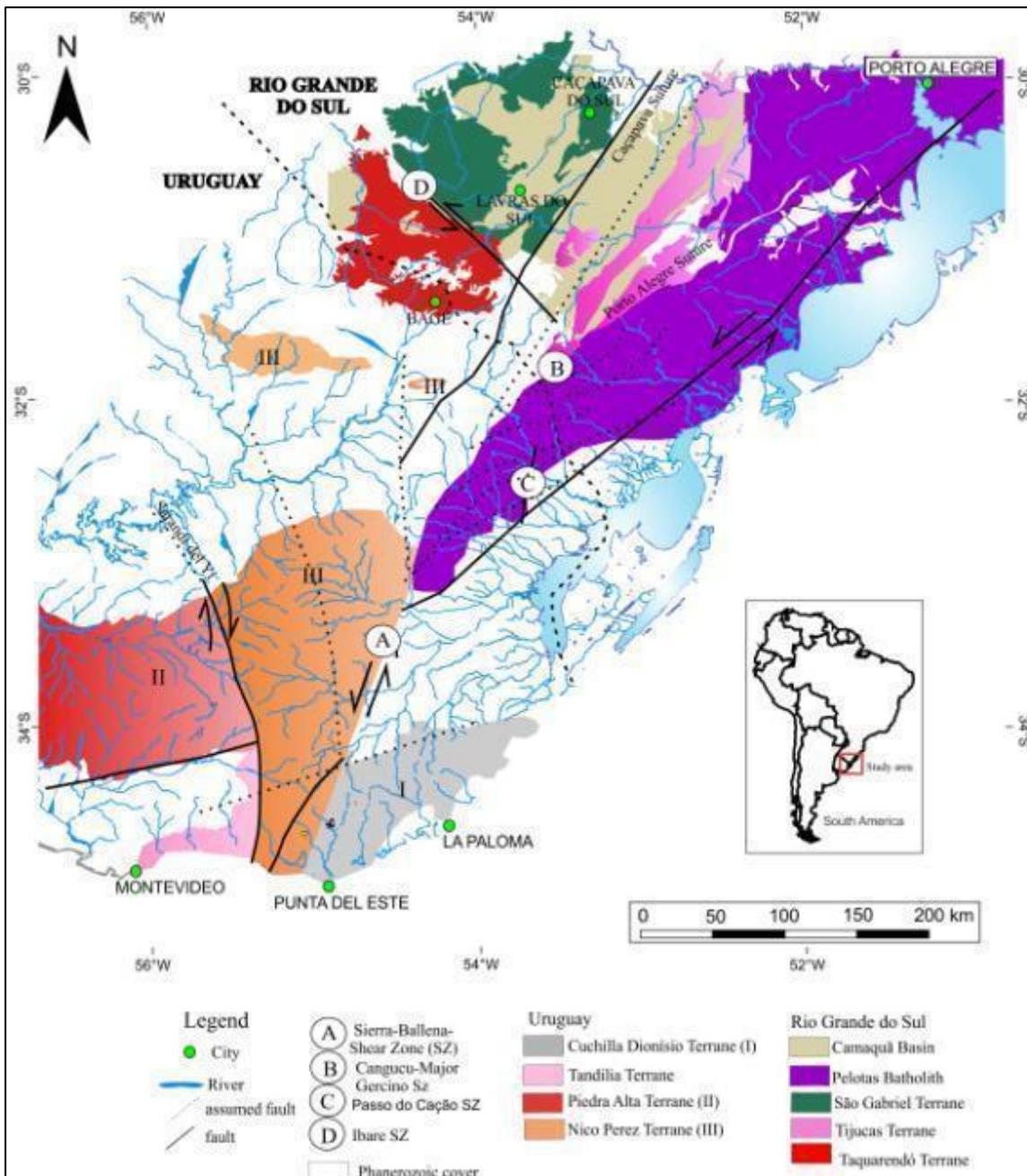


Figura 4: Mapa dos domínios geotectônicos do Rio Grande do Sul e Uruguai, modificado de CASTILLO LOPES 2009, CHEMALE ET AL., 2012, OLIVEIRA ET AL., 2016 e GRUBER ET AL., 2016. As linhas contínuas representam as estruturas regionais limítrofes das unidades tectono-estratigráficas.

O Complexo Granulítico Santa Maria Chico é limitado ao norte pela Zona de Cisalhamento Ibaré, a oeste do Escudo Sul-rio-grandense, e representa uma

faixa de direção aproximada norte-sul, abrangendo as cidades de Bagé, Dom Pedrito e Candiota (HARTMANN ET AL., 2007, PHILIPP ET AL., 2007). O complexo é recoberto a oeste e sul pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná e pela Formação Santa Tecla e por Depósitos Aluviais recentes.

O Terreno São Gabriel (TSG) corresponde a porção oeste do Cinturão Dom Feliciano, com forma alongada na direção NE e com uma área aproximada de 6.600 km²(PHILIPP, 2016). Este se apresenta limitado a sul pela Zona de Cisalhamento Ibaré e pelo Terreno Taquarembó, e a leste pela Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul (COSTA, 1997, HARTMANN ET AL., 2007 e PHILIPP, 2016). Este terreno compreende gnaisses cálcio-alcalinos juvenis cortados por metagranitóides, ambos englobados no Complexo Cambaí, intrusivos em uma sequência vulcano-sedimentar, cujas evidências são os Complexos Palma e Bossoroca (BABINSKI ET AL., 1996, HARTMANN ET AL., 1999, 2000, 2007). O Terreno São Gabriel corresponde ao complexo ofiolítico e três arcos magmáticos neoproterozóicos, sendo os mais antigos os arcos intra-oceânicos e os mais jovens representam as margens continentais ativas do Terreno São Gabriel e do Cinturão Dom Feliciano (PHILIPP, 2016).

O Terreno Tijucas (CHEMALE JR, 2000), corresponde a um cinturão que se estende de Santa Catarina ao Uruguai como uma faixa alongada, segundo a direção N20-45E – S20-45W. Abrange uma região de 15 a 30 km de largura com comprimento de 170 km, limitado a leste pela zona de cisalhamento Dorsal Canguçu ao lado das unidades do Cinturão Dom Feliciano. A oeste, o terreno está limitado pela anomalia magnética de Caçapava do Sul, que se distribui quase paralelamente a zona de cisalhamento NNE-SSW a leste do Granito Caçapava do Sul. Ao norte ocorre encoberta pela Bacia do Paraná, com depósitos de taludes e demais sedimentos cenozoicos (CHEMALE JR, 2000). Este terreno, ainda, é dividido em quatro unidades geológicas, sendo duas na fácies xisto verde a anfíbolito médio, o Complexo Encantadas e o Complexo Metamórfico Porongos. O primeiro é composto por rochas granito-gnaíssicas e anfíbolitos paleoproterozóico. Já o Complexo Metamórfico Porongos compreende as rochas supracrustais e plutônicas cálcio-alcalinas. A terceira unidade corresponde a rochas sedimentares siliciclásticas e as vulcânicas da Bacia do Camaquã, deformadas em ambiente rúptil-dúctil. A quarta unidade

corresponde as rochas graníticas geradas e deformadas durante o evento Dom Feliciano.

O Batólito de Pelotas (PHILIPP, 1998) está situado na porção leste do Escudo Sul-rio-grandense, definido por um complexo plutônico multintrusivo e polifásico. Apresenta uma extensão de 400km e largura variando de 80 e 120km. O batólito é composto por suítes e plútons de rochas graníticas, sendo reconhecidas ainda exposições de rochas básicas e septos dos metamorfitos encaixantes. Sua evolução temporal é resultante da adição de distintos processos tectônicos (PHILIPP, 1998). A partir da constituição interna e na subdivisão estratigráfica do batólito, foram individualizadas seis suítes graníticas: Suíte Intrusiva Pinheiro Machado, Suíte Intrusiva Erval, Suíte Intrusiva Viamão, Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul, Suíte Granítica Cordilheira e Suíte Granítica Dom Feliciano. Associados às rochas graníticas da Suíte Intrusiva Viamão, Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul e Suíte Granítica Dom Feliciano.

Sobre as rochas ígneas e metamórficas do Cinturão Dom Feliciano, repousam as rochas da Bacia do Camaquã. A Bacia do Camaquã (BC) registra, no Rio Grande do Sul, os episódios deposicionais vulcano-sedimentares do estágio de transição da Plataforma Sul-Americana e está relacionada geneticamente aos processos tectono-magmáticos tardios do Cinturão Dom Feliciano (PAIM ET AL., 2000).

A BC representa um *locus* deposicional onde foi preservado o registro da superposição de diversos tipos de bacias, com características geológicas próprias e mecanismos de subsidências distintos (PAIM ET AL., 2014). A bacia foi preenchida e suas camadas apresentam desconformidades angulares ou erosivas de caráter regional. Evidências indicam que os depósitos tenham evoluído de ambiente marinho (Grupo Maricá) para o transicional entre condições marinhas e lacustres (Grupos Bom Jardim e Santa Bárbara) e para ambientes fluviais e lacustres (Grupo Guaritas) (PHILIPP, 2016). Esta sucessão vulcano-sedimentar apresenta três unidades, Alogrupos Bom Jardim, Cerro do Bugio e Santa Bárbara, sobrepostas por uma unidade predominantemente horizontal, o Alogrupo Guaritas. Segundo Paim et al. (2000), estas unidades registram a porção preservada de sucessões sedimentares vinculadas a quatro

bacias que se formaram, foram preenchidas e tiveram seus depósitos deformados no decorrer das fases finais da Orogênese Brasileira. Incluem, assim, o registro da bacia de retro-arco de antepaís Maricá (Alogrupo Maricá), das bacias transcorrentes de retro-arco Bom Jardim (Alogrupo Bom Jardim) e Acampamento Velho (Alogrupo Cerro do Bugio), da bacia transcorrente Santa Bárbara (Alogrupo Santa Bárbara) e do hemi-graben Guaritas (Alogrupo Guaritas).

A Bacia do Paraná é uma extensa depressão intracratônica com área máxima de 1.500.000 km² e espessura aproximada de 7.000 m (MILANI ET AL., 2007). Ocorre recobrimdo porções da Bacia do Camaquã e do Escudo Sul-riograndense. No Eocretáceo, um vulcanismo fissural cobriu as formações sedimentares da Bacia do Paraná, com espessos derrames de lavas de composição ácida e básica englobados na Formação Serra Geral (MILANI e RAMOS, 1998). A evolução deste pacote deposicional é caracterizada por seis grandes sequências tectono-sedimentares regionais ordovício-siluriana, devoniana, carbonífera, eotriássica, neotriássica, jurrássica-eocretácea e neocretácea.

Formação Santa Tecla é uma cobertura sedimentar Cenozóica caracterizada por arenitos finos avermelhados, friáveis, com cimento ferruginoso e arenitos esbranquiçados com cimento silicoso aos quais se associam concreções silicosas mamelonares, formando um pacote homogêneo, sem estratificação visível. Localmente, conglomerados róseos a esbranquiçados, com cimento silicoso ou carbonático, matriz arenosa ou caulínica envolvendo grânulos e seixos arredondados de granito e quartzo (RAMGRAB e WILDNER, 2000). Conforme Dani (2013), na região de Bagé a Formação Santa Tecla é composta por três depósitos em sistemas fluviais/aluviais desenvolvidas em ambiente continental de clima árido, localmente pedogênese de solos calcários e silicosos.

3.2 Caracterização Estrutural

Quando abordamos o tema de sistemas aquíferos fraturados algumas características, como as estruturas, são importantes, pois condicionam o fluxo a recarga e descarga e o armazenamento da água subterrânea. Muitos autores, por exemplo Jey et al. (1993), Gibson (1994), Knife (1997) e Borba et al. (2004), trabalham com a ideia do comportamento de sistemas de falhas serem ou não selantes e como esta propriedade pode variar ao longo do tempo e espaço, com isso alterando o comportamento hidráulico de uma estrutura.

Jey et al. (1993), Gibson (1994), Knife (1997) e Borba et al. (2004) trabalham com reservatórios de petróleo, tentando compreender a relação das estruturas com o armazenamento e a alteração da transmissividade no tempo e espaço. Nestes trabalhos, os reservatórios estudados são controlados por falhas, onde se destacam quatro principais abordagens para a quantificação do potencial selante das falhas: justaposição, *gouge* de falha, cimentação/diagênese e geomecânica.

- Justaposição diz que um reservatório permeável em contato por falha com outro igualmente permeável poderá transmitir fluidos e pressão para a falha.
- *Gouge* da Falha é a formação de rocha de falha com seleção e granulometria diminuída, será formada uma zona de pressão capilar mais elevada e menos permeável neste local, restringindo o fluxo.
- Cimentação/Diagênese considera as zonas de falhas como sítios para a precipitação de cimento, devido à percolação de fluidos ao longo da história geológica, favorecida pela tendência de incremento da permeabilidade vertical ao longo do plano de cisalhamento.
- A Geomecânica considera o campo de tensões atual, a pressão de fluido, a reologia e a geometria de estrutura preexistente. Desta forma, em uma determinada área as falhas com uma direção preferencial poderiam estar seladas e outras não.

Borba et al. (2004) destacam que a evolução geológica pode alterar as tensões ao longo do tempo, fazendo com que falhas e fraturas originalmente abertas estejam hoje fechadas e vice-versa. Também a geometria e estilo estrutural pode gerar trapas estruturais e o desenvolvimento de locais para armazenamento de fluidos. A evolução geológica, relacionada com as litologias ocorrentes e a movimentação das estruturas, pode ter relação direta com a quantidade de deposição de argilas nas estruturas, assim afetando o fluxo nesta. Outro fator importante são as tensões atuais sobre as estruturas, podendo manter as falhas abertas ou fechadas.

Manoel Filho (2008), sugere que as juntas, fraturas, falhas e dobras são produzidas no sistema geológico por deformação, após deposição ou na cristalização. Estas estruturas são reconhecidas em superfície, seja em campo ou em imagens de satélite, fotos aéreas ou em dados aerogeofísicos, pelo seu aspecto linear ou forma de lineamento. O'Leary et al. (1976) definiram o lineamento como sendo uma feição linear mapeável, simples ou composto de uma superfície cujas partes estão alinhadas de forma retilínea ou curvilínea e que difere distintamente dos padrões de características adjacentes e presumivelmente reflete um fenômeno de subsuperfície. Estas correspondem a feições geomorfológicas, positivas e negativas, observáveis em imagens de Sensoriamento Remoto.

As falhas e fraturas são consideradas porosidades secundárias, responsáveis pela formação, circulação e armazenamento de água em sistemas aquíferos fissurais ou fraturados. São o resultado dos processos de solidificação do magma ou das pressões e temperaturas a que foram submetidas no interior da crosta (GIAMPÁ E GONÇALES, 2013). As rochas do embasamento cristalino apresentam porosidade/permeabilidade primária ou intersticial praticamente nula. Entretanto, sob o efeito dos esforços tectônicos a que foram submetidas apresentam rupturas, tais como falhas, fraturas ou fissuras que representam este tipo de porosidade/permeabilidade.

Outro processo de formação destas estruturas está relacionado com o alívio de pressão. Quando a rocha se forma no interior da crosta a mesma é submetida a uma pressão, sendo que quando a mesma é exposta a superfície,

há um alívio. Como resultado desse processo formam-se juntas de alívio (LEINZ,1966; Figura 5).



Figura 5: Algumas feições da estrutura de um plúton: T – diaclases transversais em relação a estrutura fluidal; L – diaclases longitudinais; E – diaclases paralelas às isotermas, podendo ser também produzidas pelo alívio de carga; C – diaclases de cisalhamento e V – diaclases preenchidas por meio de soluções ascendentes, constituindo os veios (LEINZ, 1966).

Neste contexto, a evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul está relacionada diretamente com os processos de geração e deformação de crosta continental, sendo marcada por dois principais ciclos, o Transamazônico (2,26-2,00 Ga) e o Brasileiro (900-535 Ma). Hartmann et al. (2007) sugerem que cada ciclo inclui a extração de magmas e de porções sólidas do manto, com a decorrente construção de crosta oceânica (planície basáltica e sedimentos abissais, platôs oceânicos, ilhas oceânicas), presença de microcontinentes nos oceanos e arco de ilhas vulcânicas.

O ciclo Transamazônico corresponde as discontinuidades crustais com orientação NW-SE e E-W, seguido da intrusão de diques máficos (ENDO, 1997).

O ciclo Brasileiro compreende dois eventos tectônicos em regime transpressivo, com plano de fluxo NE-SW. O primeiro evento, de cinemática dextral, gerou a formação de sistemas de dobramentos e cavalgamentos (ENDO, 1997).

Hausman (1995) identificou estruturas associadas a aquíferos fraturados nas rochas Pré-Cambrianas no Super Grupo Porongos. O primeiro evento relacionado com a Zona de Cisalhamento Canguçu, acompanhada de injeções graníticas, como o Complexo Granítico Caçapava do Sul, com direções médias de fraturamento N40E, com variações entre N35E e N75E. São falhas de gravidade escalonadas com largura entre 5 a 10 km, que deram origem ao *Horst* de Canguçu.

Outro evento importante é a Zona de Falha Passo do Marinheiro, com direção média NS com variações entre N5O e N15E. São falhas transcorrentes (*strike slip faults*) e injeções sob a forma de enxames de diques de riolitos e de diabásios em menor escala (HAUSSMAN, 1995).

O Grupo Camaquã representa a fase de preenchimento terrígeno, que ocorreu nas fossas geradas durante a Tectônica Açotéia-Piquiri, que foram movimentadas por evento tectônico posterior. A Tectônica Açotéia-Piquiri apresenta direções médias N30E variando entre 2° e 35° leste. Estas falhas são do tipo longitudinal de gravidade e com largura de 3 a 6 km, formando *horts* e *grabens*.

Dall'agnese (2015) realizou estudos no município de Santana da Boa Vista/RS, limite noroeste do Graben Arroio Moirão, no Escudo Sul-rio-grandense, sobre a Falha Açotéia-Piquiri (direção NE-SW). Na região ocorrem diversos litotipos: Unidade Ortognáissica do Complexo Metamórfico Porongos (NW) e as rochas sedimentares da Formação Sanga do Cabral (SE), classificada como aquitardos. Este autor identificou, em imagens de sensoriamento remoto do embasamento, lineamentos de direção NW e com direções preferenciais N20-30W (frequência absoluta = 27), N60-70W (frequência absoluta = 25) e secundariamente entre N30-60W (frequência absoluta = 64) (Figura 6). Na Bacia do Paraná os lineamentos analisados têm maior variação de direção, sendo as direções preferenciais N40-70W (frequência absoluta = 28), N70-90E (frequência absoluta = 24), N10-20E (frequência absoluta = 9) e N20-40E (frequência absoluta = 12).

Machado (2014) estudou a estruturação do Graben Arroio Moirão, Santana da Boa Vista/RS, com o objetivo de caracterizar a geologia e as

principais morfoestruturas desta região. Para este estudo foi realizado análises em separado para os grupos litológicos.

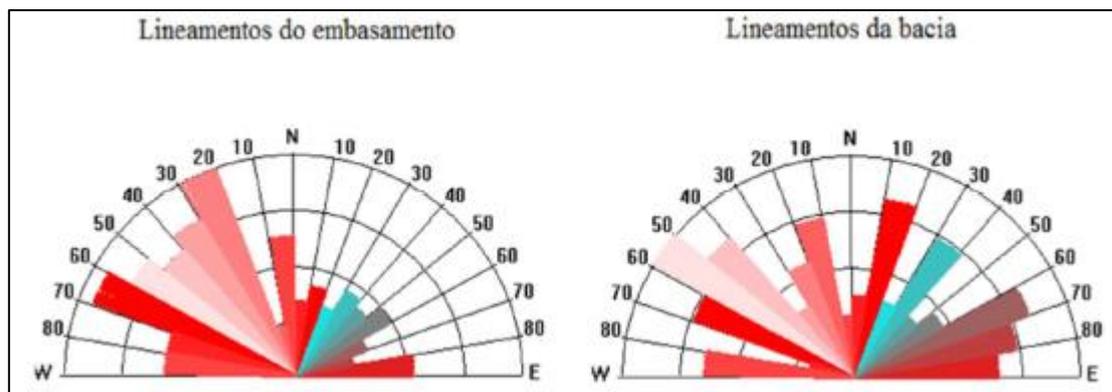


Figura 6: Diagrama de roseta com as frequências absolutas (DALL'AGNESE, 2015).

As rochas metamórficas, correspondendo ao embasamento da região, apresentam uma direção preferencial dos lineamentos para NS, variando entre N10E e N15-30W (MACHADO, 2014), conforme os diagramas de frequências dos lineamentos e diagrama de comprimento dos lineamentos no Terreno Tijucas interpretados em imagens de sensoriamento remoto (Figura 7). Desta forma, fica evidente que os lineamentos mais contínuos possuem direção N45W, com ampla variação entre N30-60W. Secundariamente ocorrem lineamentos na direção N60E com variação entre N50-70.

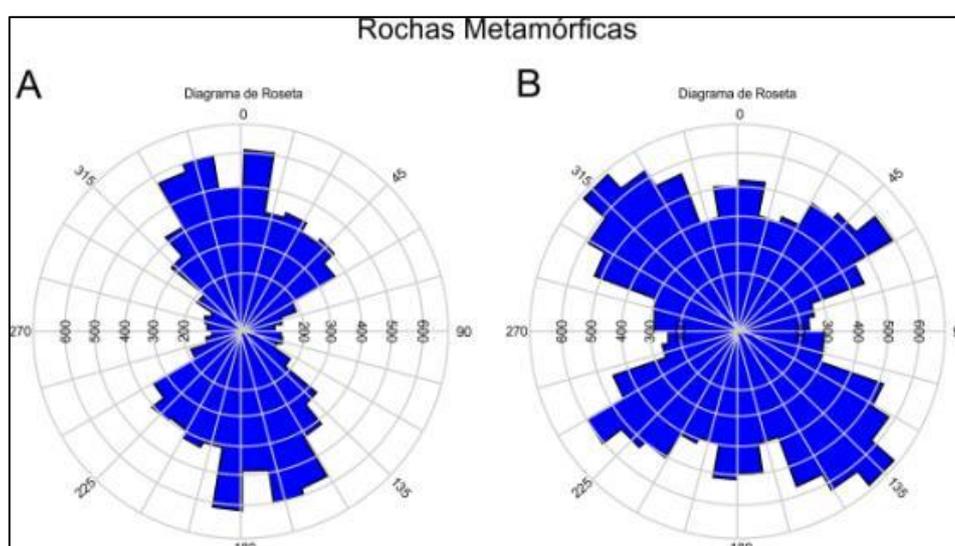


Figura 7: (A) diagrama de frequências dos lineamentos e (B) diagrama de comprimento dos lineamentos no Terreno Tijucas (MACHADO, 2014).

Conforme Machado (2014), o diagrama de frequência dos lineamentos para as rochas ígneas apresenta predomínio na direção N-S, com variações entre N30W e N30E (Figura 8). O diagrama do comprimento dos lineamentos mostra que os mais contínuos são na direção N60W e N45E, com variações entre estes valores.

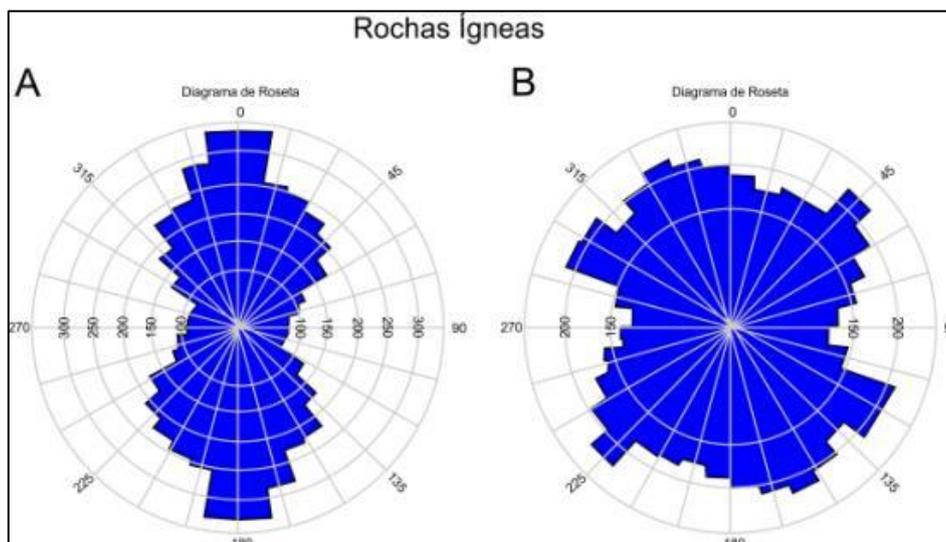


Figura 8: (A) diagrama de frequência dos lineamentos e (B) diagrama de comprimento dos lineamentos nos granitoides do Batólito de Pelotas (MACHADO, 2014).

Nas rochas sedimentares, Machado (2014) observou que ocorre uma densidade menor, visíveis nas imagens de sensoriamento remoto, de lineamentos e um padrão muito semelhante com as rochas metamórficas. As maiores frequências de lineamentos ocorrem na direção NS e uma variação entre N30W e N30E (Figura 9). Os lineamentos mais extensos, como nas rochas metamórficas, ocorrem nas direções N30W e N30-45E, não coincidindo com a frequência (densidade) dos lineamentos.

Assim, torna-se importante diferenciar os tipos de estruturas, pois dependendo da estrutura poderá haver uma maior ou menor possibilidade de ocorrência de um aquífero. Também identificar quais estruturas estarão condicionando o aquífero fraturado, assim compreendendo melhor o comportamento do aquífero na área de estudo.

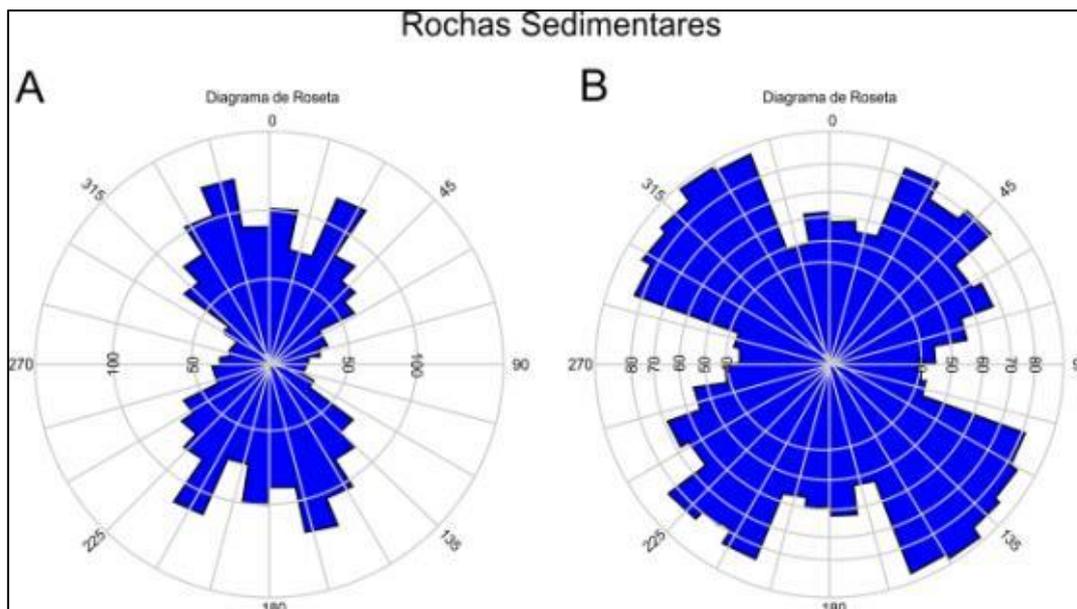


Figura 9: A) diagrama de frequência dos lineamentos e (B) diagrama de comprimento dos lineamentos nas rochas sedimentares da Bacia do Paraná (MACHADO, 2014).

3.3 Contexto Hidrogeológico

O termo água subterrânea é normalmente reservado à água subsuperficial que se encontra abaixo do nível freático em solos e formações geológicas que estão totalmente saturados (FREEZE E CHERRY, 1979).

A resolução Nº 15/2001 do Conselho Regional de Recursos Hídricos define aquífero como “o corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos”

Freeze e Cherry (1979) destacam algumas definições importantes para os estudos em hidrogeologia. Um aquífero é melhor definido como uma unidade geológica permeável saturada que pode transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos comuns. Um aquíclode é definido como uma unidade geológica saturada que é incapaz de transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos comuns.

Outro termo importante é aquítarde, que foi cunhado para descrever as camadas menos permeáveis de uma sequência estratigráfica. Tais camadas

podem transmitir água em quantidades que são importantes no estudo regional de fluxo das águas subterrâneas, mas a sua condutividade hidráulica não é suficiente para permitir a produção suficiente de água em poços (FREEZE e CHERRY, 1979).

A circulação da água nas rochas está diretamente relacionada com tipo litológico e o tipo e quantidade de espaços vazios por onde a água pode fluir, ou seja, a sua permeabilidade (DINIZ ET AL., 2014). Esta porosidade pode ser primária ou secundária. Porosidade primária corresponde a poros da rocha, ou vazios, onde a água se acumula e circula, ocorrendo em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos não consolidados e material arenoso decomposto. Porosidade secundária corresponde as fraturas ou falhas das rochas. Ocorrem nas rochas ígneas, metamórficas e em alguns casos em rochas sedimentares fortemente cimentadas, onde os canais do fluxo da água são representados por fraturas de diversas origens, tamanhos e aberturas (DINIZ ET AL., 2014).

Lisboa et al. (2004) realizaram uma síntese da ocorrência das águas subterrâneas do Rio Grande do Sul. Segundo estes autores, com exceção dos Sistemas Aquíferos Cenozoicos, os demais são afetados por falhas e fraturas. Destacam que as grandes falhas modificam muito a distribuição e as posições relativas dos aquíferos, condições de recarga, fluxo, armazenamento descarga das águas subterrâneas. Nos sistemas aquíferos em rochas cristalinas impermeáveis, as falhas e fraturas são os principais reservatórios de água subterrânea.

Na região onde está inserida a área de estudo, a hidrogeologia é representada pela ocorrência dos Sistemas Aquíferos Embasamento Cristalino II e Palermo/Rio Bonito, bem como dos Aquíferos Permianos e Aquíclides Eo-Paleozóicos (Figura 10). Nesse capítulo será dado enfoque para o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, pois este sistema é o que está sendo analisado nesse trabalho.

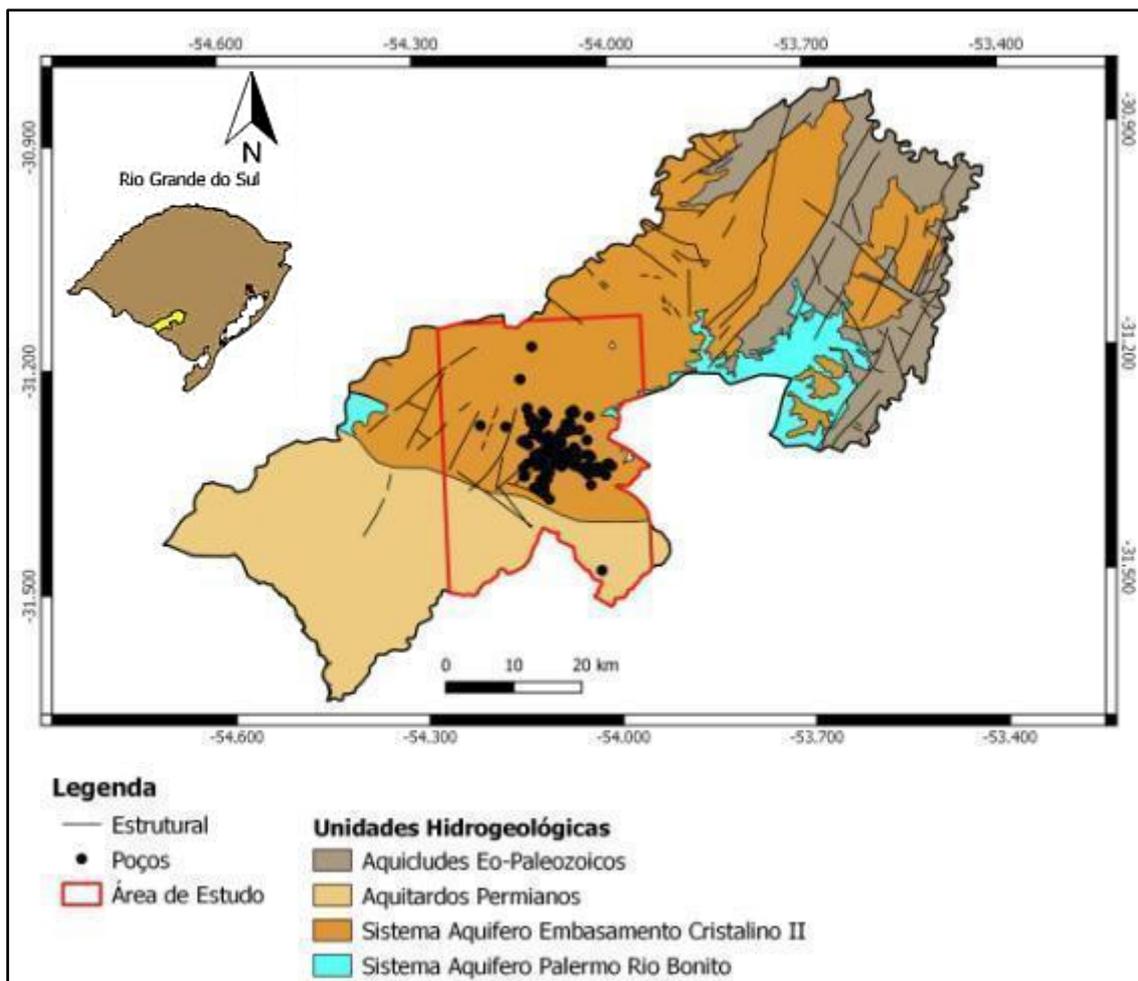


Figura 10: Mapa Hidrogeológico do município de Bagé, com destaque para a área de estudo, adaptado de Machado e Freitas (2005).

3.3.1 Sistema Aquífero Livre Palermo Rio/Bonito

Este sistema aquífero circunda a região mais elevada das rochas do embasamento cristalino, é constituído por arenitos finos a médios, cinza a esbranquiçados, intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos de cor cinza-escuro. As capacidades específicas são em média inferiores a 0,5 m³/h/m. As salinidades variam entre 800 e 1500 mg/l. Em grandes profundidades as águas são salinas com sólidos totais dissolvidos superiores a 10.000 mg/l (FREITAS, 2010).

Conforme Hausman (1960) a unidade Palermo, formada por arenitos finos e siltosos, é desinteressante para a pesquisa de água subterrânea. A unidade Rio Bonito apresentando folhelhos carbonosos, às vezes, abaixo dos horizontes

areníticos, que são bons produtores d'água. Assim, o seu confinamento e as suas condições de deposição podem fornecer fenômeno de artesianismo, bem como de semi-surgência.

O mergulho dessas camadas em direção N e NW, faz com que a profundidade dos poços cresça nessa direção na ordem de 14 a 16 m por km, dando grande possibilidade de artesianismo e mineralização das águas (Hausman, 1960).

3.3.2 Aquitardos Permianos

Os Aquitardos Permianos se enquadram no grupo dos aquíferos limitados de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas (VIERO E SILVA, 2010).

São constituídos por siltitos, argilitos cinza-escuros, folhelhos pirobetuminosos e pequenas camadas de marga e arenitos finos (VIERO E SILVA, 2010). Normalmente, os poços que captam somente essas litologias apresentam vazões muito baixas ou estão secos. As capacidades específicas são geralmente inferiores a $0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e as águas podem ser duras, com grande quantidade de sais de cálcio e magnésio sendo a origem deste tipo de aquífero relacionado a intrusões de diabásio que cortam os siltitos e folhelhos (MARQUEZAN, 2008).

Filho et al. (2010), consideram que os aquitardos estão relacionados aos sedimentos finos (argilitos e siltitos) das Formações Irati, Estrada Nova e Rio do Rasto.

3.3.3 Aquiclude Eopaleozóico

O Aquiclude Eopaleozóico ocupa as áreas do centro e do leste do embasamento cristalino, entre os municípios de Caçapava do Sul, Bagé, Lavras do Sul e Vila Nova do Sul (TRAININI ET AL., 2005). É formado por arenitos finos a médios, róseos a avermelhados, muito endurecidos pelos cimentos

ferruginosos, calcíticos e silicosos, proporcionando uma porosidade muito baixa. Também se intercalam espessas camadas de conglomerados e ritmitos pelíticos (turbiditos). Como decorrência da baixa porosidade, os poços tubulares são praticamente secos ou de vazões insignificantes.

As rochas sedimentares, que compõem esta unidade passaram por eventos de intensa diagênese e metamorfismo, conseqüentemente hoje encontram-se endurecidos. Devido a esses fatores, a porosidade é muito baixa, o que ocasiona condições muito desfavoráveis para o armazenamento de água subterrânea. Com isso, os poços ocorrentes nessa unidade são secos ou têm vazão insignificante (VIERO e SILVA, 2010).

3.3.4 Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II

O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II abrange uma área aproximada de 42.500 km², situada na porção centro-sul do estado e prolonga-se através do Uruguai (HAUSMANN, 1995). Durante os eventos de formação do escudo, este foi submetido a várias fases tectônicas seguidos de injeções magmáticas.

Os sistemas fraturados se comportam como sistemas anisotrópicos, sendo estudado por diversos autores (HAUSMANN, 1960, 1980, 1982, 1995; FREITAS, 1998; ROISENBERG 2003; LISBOA 2004, 2011, 2016; VIERO e ROISENBERG 2008; SOARES 2016; STEFANO e GALLAS 2017), que realizaram uma grande contribuição na compreensão hidrogeológica e hidroquímica do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II.

Conforme Trainini et al. (2005), o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II, compreende basicamente as áreas correspondentes aos limites do embasamento cristalino, e inclui os municípios de Bagé, Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul e pequena porção de Porto Alegre. É formado por rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas, xistos e filitos, localmente afetados por fraturas e falhas. Geralmente apresentam capacidade específica inferior a 0,5 m³/h/m, ocorrendo também poços secos. As salinidades nas áreas não cobertas por sedimentos de origem marinha, são inferiores a 300 mg/l. Poços nas rochas

graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor. Conforme Trainini et al. (2005), o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II e os Aquitardos Permianos se inserem no grupo dos Aquíferos Limitados de Baixa Possibilidade para Água Subterrânea em Rochas com Porosidade Intergranular ou por Fratura.

Freitas (2010) definiu que o Aquífero Embasamento Cristalino II apresenta capacidade específica inferior a $0,5\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, ocorrendo muito frequentemente poços secos. As águas apresentam salinidade inferior a 300 mg/l, comumente as águas captadas em poços construídos nas rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor.

Gonçalves (2011) realizou estudos geológicos e hidrogeológicos das cabeceiras do Arroio dos Ladrões, estação experimental Fepagro, em Encruzilhada do Sul/RS, voltado para o sistema aquífero fraturado, tendo sido identificado três unidades litológicas principais. As duas primeiras unidades relacionadas com rochas granitóides, Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III, e a terceira unidade corresponde a rochas sedimentares remanescentes da Bacia do Paraná. Nas rochas granitóides foi evidenciado falhas compressivas de médio e pequeno porte na direção NE, também com fraturas de alívio de pequeno porte concordante com diques de direção NW. As fraturas NW são as estruturas que condicionam a formação do aquífero fraturado.

Gonçalves (2011) destaca o reconhecimento em campo e a verificação dos principais contatos litológicos e lineamentos de médio porte na Zona de Cisalhamento Dorsal Canguçu, com associações de fraturas de alívio de pequeno porte com direção NW, principalmente associados a diques de riolito, importante para a hidrogeologia da região.

Neto (2016) sugere que no município de Dom Feliciano ocorrem os Sistemas Aquíferos Embasamento Cristalino II e III e Sistema Aquitardos Permianos, reconhecidos por sua improdutividade para captação de água por poços profundos. A partir dos mapas hidrogeológicos e geomorfológicos, e dos reconhecimentos das estruturas em imagens de satélite, foi gerado o Mapa de Favorabilidade (Figura 11) com as estruturas muito favoráveis (em verde), relacionadas aos lineamentos na porção geomorfológica cupuliforme com textura fina aplainada, nas zonas baixas. As áreas favoráveis (em azuis) estão

relacionadas aos lineamentos das unidades geomorfologia cupuliforme maciça com textura grossa, e normalmente se encontram em zonas altas. As áreas pouco favoráveis (amarelas) estão relacionadas às zonas baixas, porém com poucos lineamentos e as áreas não favoráveis estão relacionadas às zonas altas sem lineamentos (Neto, 2016).

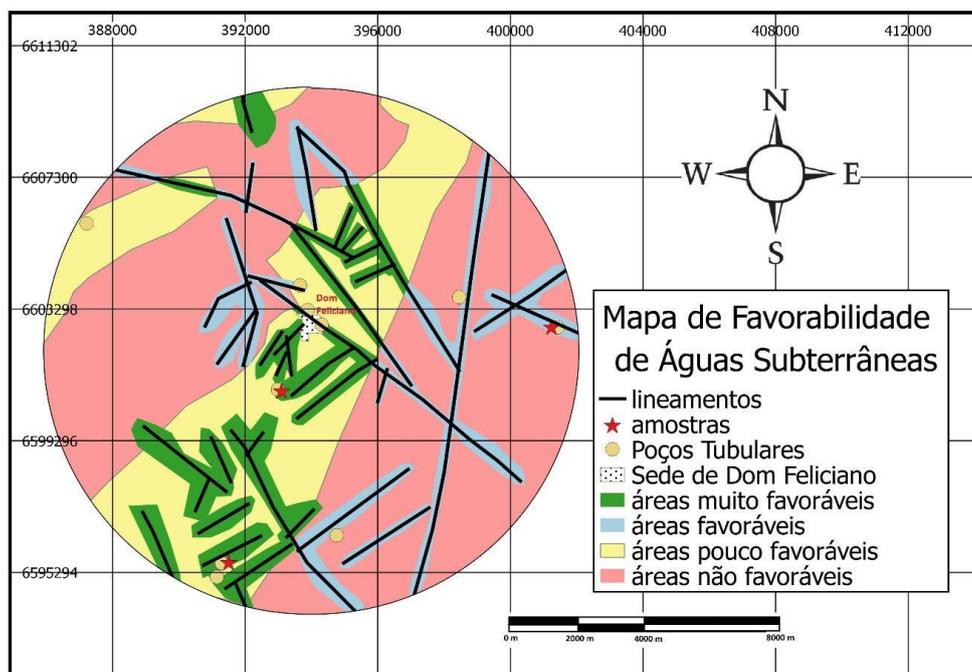


Figura 11: Mapa de favorabilidade de água subterrânea (Neto, 2016).

Roisenberg et al. (2003), realizou estudo para caracterizar as águas subterrâneas de Porto Alegre – RS, a partir composição química das águas e arcabouço geológico. Os lineamentos tectônicos de extensão regional são frequentes no embasamento pré-cambriano e podem aparecer preenchidos por quartzo leitoso, constituindo grandes falhas de direção NE-SW e NW-SE. No Embasamento Granítico-Gnáissico, aparecem diques ácidos e básicos com espessuras de até 20 metros e direção N20-40W e N30-50E. Estes diques identificam a existência de fraturas tectônicas abertas que geram porosidade e permeabilidade secundária nos maciços rochosos.

3.4 Geomorfologia

Com relação a geomorfologia, a região do município de Bagé e a área de estudo compreende quatro unidades, Planalto Residual Sul Rio-grandense, Planalto Rebaixado Sul Rio-grandense, Planície Aluvial-coluvionares e Depressão do Rio Negro (IBGE, 2019 - Figura 12).

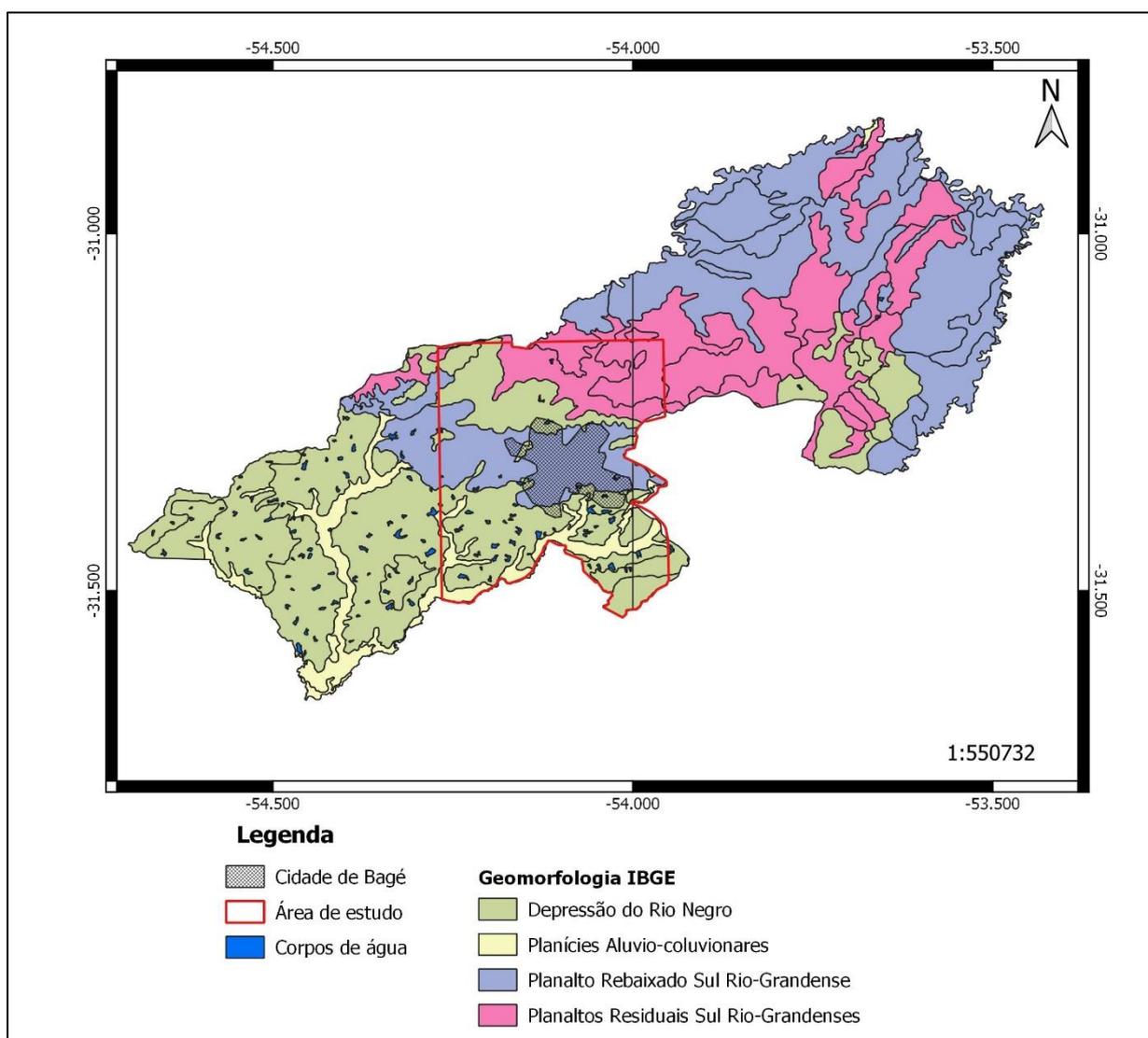


Figura 12: Mapa Geomorfológico do município de Bagé, com destaque para a área de estudo (IBGE, 2019).

Conforme o IBGE (2019), o Planalto Residual Sul Rio-grandense apresenta altitudes gerais que variam de 200 a 400 m. Se caracteriza por um relevo dissecado com topos predominantemente convexos, ocorrendo

isoladamente topos planos, remanescentes de uma antiga superfície de aplainamento. Há presença de alguns topos aguçados, vales estruturais e escarpas de falha, o que evidencia a influência litológica/estrutural. Esse relevo foi esculpido em rochas ígneas e metamórficas, pertencentes ao Escudo Sul Rio-Grandense, sendo o principal processo formador a dissecação homogênea.

O Planalto Rebaixado Sul Rio-grandense (IBGE, 2019) apresenta altitudes gerais que variam de 100 a 200 m. Sua característica geral é de um relevo dissecado com topos predominantemente convexos e com altitudes podendo atingir 400m em pontos isolados. Há presença de algumas linhas de cumeada e barras de relevo dobrado, fortemente influenciadas pela estrutura geológica. As formas residuais do tipo pontão disseminadas por toda unidade, sendo que eventualmente ocorrem morros testemunhos. O relevo é resultante da dissecação generalizada de rochas pré-cambrianas, pertencentes ao Escudo Sul Rio-Grandense.

Segundo o IBGE (2019), a Planície Aluvial-colvionar apresenta altitudes gerais que variam de 5 a 20 m. Sua característica geral é marcada pela ocorrência de uma superfície de terras baixas, levemente inclinada para o leste, podendo apresentar pequenas rampas em alguns pontos. No contato com os planaltos, ocorrem vários leques de espraiamento e cones de dejeção, sendo que estes terrenos foram formados por processos fluviais e gravitacionais. Na porção sudoeste da unidade predominam processos fluviais, responsáveis pelo transporte e acumulação de material proveniente dos planaltos adjacentes, dando origem a depósitos de enxurrada. Na parte norte, ao pé da Serra Geral, predominam processos gravitacionais do tipo rápido (deslizamentos), gerando depósitos grosseiros (tálus).

A Depressão do Rio Ibicuí (IBGE, 2019) apresenta altitudes gerais que variam de 100 a 200 m. Sua característica geral é de um relevo com formas alongadas de topo convexo ou plano e encostas com baixa declividade. As altitudes raramente superiores a 200 m, sendo que em alguns locais há ocorrência de dissecação mais intensa e encostas mais íngremes.

3.5 Solos

O município de Bagé, e a área de estudo, compreendem diversos tipos de solos (Figura 13) relacionados com a diversidade litológica e suas alterações, como rocha sã, rocha alterada e sedimento (KÄMPF e STRECK, 2010 e IBGE, 2019).

Conforme o IBGE (2019), o Argilossolo Amarelo Alítico Típico ocorre em áreas de relevos mais acidentados e dissecados, Planalto Residual Sul Rio-grandense. Este solo tem coloração amarela e está relacionado com processos de acumulação de argila, grupamento de solos com horizonte B textural, com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixas ou caráter alumínico (Figura 13).

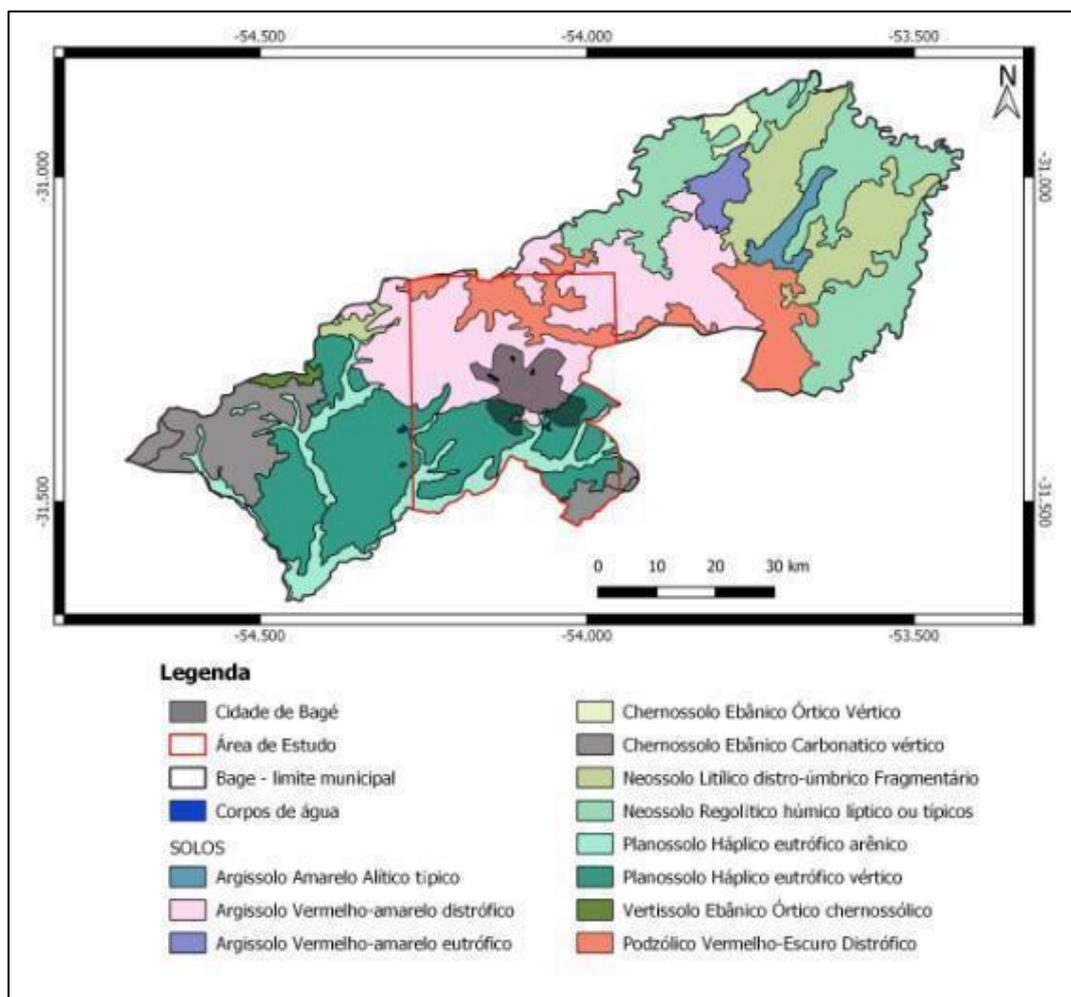


Figura 13: Mapa de solos do município de Bagé, com destaque para a área de estudo (IBGE, 2019).

Argissolos Vermelho-Amarelos Distrófico (IBGE, 2019) ocorrem em áreas de relevos mais acidentados e dissecados até as porções mais suaves e aplainadas, Planalto Residual Sul Rio-grandense e Planalto Rebaixado Sul Rio-grandense. Este solo é o resultado do processo de acumulação de argila, grupamento de solos com horizonte B textural, com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixas ou caráter alumínico. Também este solo apresenta baixa fertilidade e uma coloração vermelha-amarela.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos Eutrófico Típico (Figura 13) ocorre em áreas de relevos mais acidentados e dissecados, Planalto Residual Sul Rio-grandense. Este solo é o resultado do processo de acumulação de argila, grupamento de solos com horizonte B textural, com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alumínico. Solos com alta fertilidade e de cor vermelha-amarela (IBGE, 2019).

Para o Embrapa (2019) os Chernossolos Ebânico Órtico Vértico ocorrem em áreas de relevos mais acidentados e dissecados. Estes são formados pelo movimento descendente de matéria orgânica desde a superfície até camadas mais profundas, por isso, tendem a apresentar colorações mais escuras ou quase pretas. São solos com horizonte A chernozêmico, com argila de atividade alta e saturação por bases altas, com ou sem acumulação de carbonato de cálcio e caráter ebânico (IBGE, 2019).

Os Chernossolos Ebânico Carbonático Vértico (EMBRAPA, 2019) ocorrem em áreas de relevos mais suaves e aplainados, Depressão do rio Ibicuí. Estes são solos com horizonte A chernozêmico, com argila de atividade alta e saturação por bases alta, caracterizados pela presença de carbonato de cálcio (IBGE, 2019).

Neossolo Lítico distro-úmbrico fragmentário típico (EMBRAPA, 2019) ocorre em áreas de relevos mais acidentados e dissecados até as porções mais suaves e aplainadas, Planalto Residual Sul Rio-grandense e Planalto Rebaixado Sul Rio-grandense. Estes compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos, baixa fertilidade, presença de Horizonte

superficial, com boa estrutura, bom teor de carbono, mas de baixa fertilidade (Figura 13).

Neossolo Regolítico húmico lítico ou típico (EMBRAPA, 2019) ocorre em áreas de relevos mais acidentados e dissecados, Planalto Residual Sul Rio-grandense. Este tipo de solo é pouco desenvolvido, não hidromórfico e de textura normalmente arenosa, apresentando alta erodibilidade, principalmente na região com declives mais acentuados. Em geral, a camada superficial pode apresentar uma maior concentração de matéria orgânica (Figura 13).

Segundo o IBGE (2019), o Planossolo Háplico eutrófico arênico ocorre em áreas planas e planícies, Planície Aluvial-coluvionares. Estes são solos que apresentam horizonte B plânico, subjacente ao horizonte A, podendo ou não apresentar o horizonte E, alta fertilidade. Sua textura é arenosa desde a superfície do solo até no mínimo 50 cm e no máximo 100 cm de profundidade, por isso são suscetíveis à erosão (EMBRAPA, 2019).

O solo Planossolo Háplico eutrófico vértico arênico (Figura 13) ocorre em áreas planas, Depressão do rio Ibicuí. Estes solos apresentam horizonte B plânico, subjacente a qualquer tipo de horizonte A, podendo apresentar um horizonte E (álbico ou não). Podem apresentar alta fertilidade e são suscetíveis a erosão (EMBRAPA, 2019).

O Vertissolo ebânico órtico chernossólico (IBGE, 2019) ocorre em áreas planas, Depressão do rio Ibicuí. Este são solos com horizonte vértico, de caráter ebânico que apresentam movimentos de expansão e contração, provocados pela ocorrência de argilas expansivas (EMBRAPA 2019).

O Podzólico vermelho-escuro distrófico (Figura 13) ocorre em áreas de relevos mais acidentados e dissecados até as mais suaves, aplainadas e planícies, Depressão do rio Ibicuí, Planalto Residual Sul Rio-grandense e Planalto Rebaixado Sul Rio-grandense. Este solo apresenta cores vermelhas acentuadas devido a teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário, em ambientes bem drenados (IBGE, 2019 e EMBRAPA, 2019).

O Podzólico vermelho-escuro distrófico (Figura 13) apresenta fertilidade natural muito variável devido à diversidade de materiais de origem. O teor de argila no horizonte subsuperficial (de cor vermelha) é bem maior do que no horizonte superficial, sendo esse incremento de argila percebido sem dificuldade quando se faz o exame de textura, no campo. Ocorrem geralmente em áreas de relevo ondulado, mas podem ser identificados em áreas menos declivosas. São solos com baixa fertilidade (EMBRAPA, 2019).

Conforme Lisboa et al (2004), o manto de alteração existente sobre as rochas (regolito) tem um papel importante na hidrogeologia, pois pode formar aquíferos granulares, bem como podem propiciar a recarga do aquífero fraturado. As regiões de ocorrência de solos mais espessos e com textura mais arenosa tem mais importância para a ocorrência de aquíferos granulares associados ao solo, bem como para a recarga de aquíferos fraturados.

3.6 Aeromagnetometria na Hidrogeologia

Os geofísicos australianos acumularam uma experiência considerável na prospecção mineral em regiões tropicais e demais regiões onde se desenvolve manto de intemperismo ou outros tipos de cobertura que podem prejudicar a aplicação dos métodos geofísicos. Assim, uma metodologia que estava sendo pouco utilizada, foi reavivada pelas aplicações na prospecção mineral na Austrália, hoje já difundida nos outros países (Luiz e Silva, 1995).

A principal aplicabilidade, dos dados aeromagnéticos, ainda é a prospecção mineral relacionado com falhas e fraturas, mas recentemente tem-se desenvolvido interesse e obtido resultados em outras áreas, como a hidrogeologia.

Segundo Ernesto & Ussami (2002), quando se coloca um material na presença de um campo magnético, este corpo adquire uma magnetização na direção do campo que se anula quando ele é afastado da influência do campo. A esta magnetização dá-se o nome de magnetização induzida. Este fenômeno pode ser entendido quando se imagina que o material é constituído por pequenos dipolos (no caso das rochas os dipolos são os minerais com características

magnéticas) que se orientam na direção das linhas de força do campo aplicado ou indutor. Assim, ocorreu uma polarização magnética e como resultado do alinhamento o material passa a se comportar ele próprio como um dipolo.

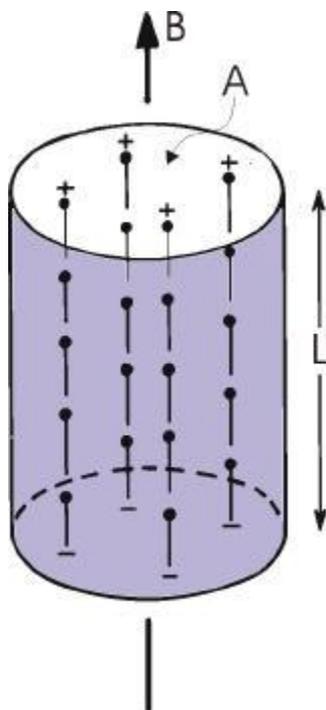


Figura 14: Polarização magnética

Zeil et al. (1991), realizaram pesquisa para água subterrânea em Botswana, em região recoberta pelas areias do deserto de Kalahari. O autor utilizou dados aeromagnéticos correlacionados com dados de imagens de satélite, para facilitar a identificação e interpretação dos dados aéreos. Estas associações de informações se mostraram uma ferramenta útil na prospecção de águas subterrâneas em sistemas fraturados. Os locais onde foram verificadas zonas lineares, pode-se realizar a locação de levantamentos terrestres com maior precisão e com isso reduzem os custos.

Como a cobertura sedimentar não contém nenhuma fonte magnética, na área de estudo, os dados aeromagnéticos refletem a susceptibilidade magnética do embasamento. Os testemunhos de sondagem recuperados durante uma campanha de exploração de carvão evidenciaram a presença de soleiras de dolerito em várias profundidades em toda a área, do perfil realizado de Molepolole a Letlhakeng. Em tal situação, falhas são comumente exibidas

indiretamente em levantamentos magnéticos aéreos (ASTIER e PATERSON, 1989 *in* ZEIL et al., 1991).

Blakely et al. (2000), realizaram estudo aeromagnético no deserto de Amargosa, Nevada/Califórnia, como ferramenta para compreensão da geologia e hidrogeologia para perfurações. O levantamento aeromagnético de alta resolução do deserto e arredores forneceu *insights* sobre a geologia de subsuperfície desta região estruturalmente complexa. A pesquisa abrangeu uma área de aproximadamente 7.700 km², que se estende desde Beatty, Nevada, até sul de Shoshone, Califórnia, e inclui partes do local de Testes de Nevada e do Parque Nacional do Vale da Morte. As anomalias magnéticas características ocorrem em terrenos vulcânicos e sobre rochas Proterozóicas.

Segundo Blakely et al. (2000), as anomalias magnéticas lineares são geradas por deslocamentos de rochas vulcânicas e permitem o mapeamento detalhado de falhas superficiais neste terreno vulcânico. De particular interesse são anomalias sutis que se sobrepõem a depósitos aluviais. Alinhamentos longos de anomalias magnéticas sugerem que essas anomalias são causadas por falhas que deslocam rochas magnéticas em profundidade e, eventualmente, influenciam o fluxo de água subterrânea. Os lineamentos magnéticos sobre as Funeral Mountains coincidem com um conjunto de falhas norte-nordeste que cortam o quartzito de Stirling pré-cambriano, que são rochas tipicamente não-magnéticas. A posição e orientação dessas anomalias em relação às nascentes ao norte do Furnace Creek sugerem que as falhas podem atuar como condutos para o fluxo de água do norte para o Vale da Morte.

Filho et al. (2002) trabalharam com dados aeromagnéticos no Sistema Aquífero Guarani para compreender o arcabouço estrutural e sua influência na hidrodinâmica. Para tanto, foram gerados os mapas magnéticos de Anomalia Magnética Reduzida ao Polo, mapa da Amplitude do Sinal Analítico, mapa da Fase do Sinal Analítico e o mapa do Gradiente Horizontal total. A partir dos magnéticos regionais foi possível interpretar e compreender controle gerado pela trama estrutural (Figura 15 e Figura 16).

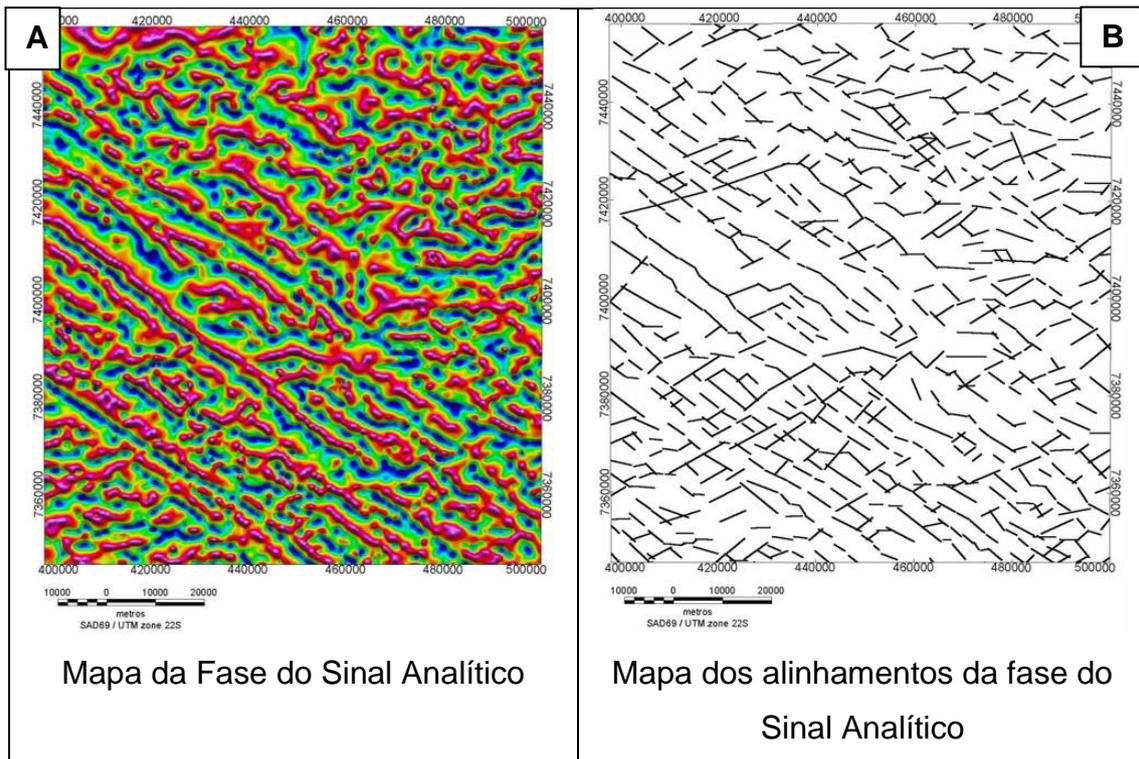


Figura 15: Mapa da Fase do Sinal Analítico (A) e dos lineamentos interpretados (B) (FILHO ET AL., 2002).

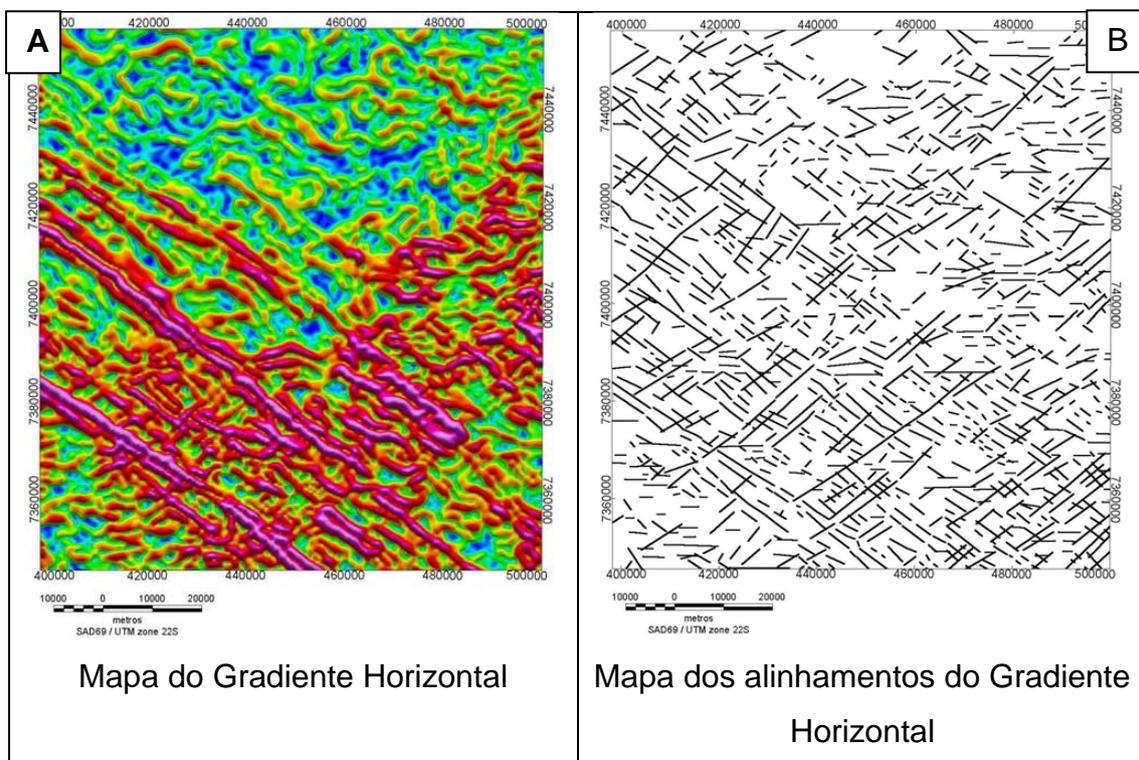


Figura 16: Mapa do Gradiente Horizontal (A) e dos lineamentos interpretados (B) (FILHO ET AL., 2002).

De acordo com Filho et al. (2002), a partir destes dois mapas foi realizado a interpretação qualitativa, onde foram identificadas estruturas com um predomínio na direção NW-SE, seguido das NE-SW e N-S.

Ferreira et al. (2004) e Ferreira et al. (2005) realizaram uma pesquisa integrando os dados aeromagnéticos e hidrogeológicos do Sistema Aquífero Serra Geral, com o objetivo de compreender o controle do fluxo das águas subterrâneas e identificar fraturas representativas de zonas de conexão hidráulica do Sistema Aquífero Serra Geral. Foram gerados os seguintes produtos aeromagnéticos: Mapa do Gradiente Horizontal, Mapa da Fase do Sinal Analítico e Amplitude do Sinal Analítico.

Ferreira et al. (2004) e Ferreira et al (2005), a partir destas informações fornecidas pelos mapas aeromagnéticos do Gradiente Horizontal Total e da Fase do Sinal Analítico e Amplitude do Sinal Analítico, definiram o mosaico de blocos tectônicos. Estes são delimitados por diques de diabásio NW-SE e que no subsolo da Bacia do Paraná as estruturas NE-SW ocorrem na porção central do Arco de Ponta Grossa. Também a interpretação dos dados magnéticos permitiu refinar a megaestruturação da região central da área, através da proposição de novos lineamentos de direção NW-SE (Figura 17). O Sistema Aquífero Serra Geral apresenta superfície potenciométrica acompanhando o relevo, sugerindo um comportamento de aquífero livre, indicando um controle estrutural.

Bettú et al. (2006) estudaram a compartimentação estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Caiuá e Serra Geral no Nordeste do Paraná – Brasil. A partir do contraste de susceptibilidade magnética entre os basaltos e os arenitos possibilitaram o emprego de dados aeromagnéticos para delinear as estruturas mais expressivas do basalto e dos arenitos. Para os arenitos foram analisadas as superfícies morfoestrutural a partir da rede de drenagem, Modelo Digital de Elevação (células de 90 m, proveniente do sensor SRTM - Shuttle Radar Topography Mission - NASA) e imagens Landsat 7/ETM+.



Figura 17: Mapa do Arcabouço magnético-estrutural gerado a partir dos dados magnéticos processados e interpretados e Modelo Digital do Terreno (FERREIRA ET AL., 2005).

Para esta análise foram gerados os seguintes mapas magnéticos: magnético residual, magnético residual continuado para cima para 1.000 m, solução de Euler continuado para 1.000 e 4000 m, amplitude do sinal analítico continuado para 1.000 e 4000 m, fase do sinal analítico continuado para 1.000 m, gradiente horizontal total continuado para 1.000 m (BETTÚ ET AL., 2006).

A partir da análise destes mapas foi gerado o mapa do arcabouço magnético-estrutural (Figura 18). As estruturas que ocorrem possuem grande penetrabilidade nas rochas da Bacia do Paraná, com profundidades que ultrapassam os 3.500 m. As estruturas orientadas nas direções NW-SE e E-W são contínuas, enquanto as demais direções são frequentemente segmentadas, principalmente pelas primeiras (BETTÚ ET AL., 2006).

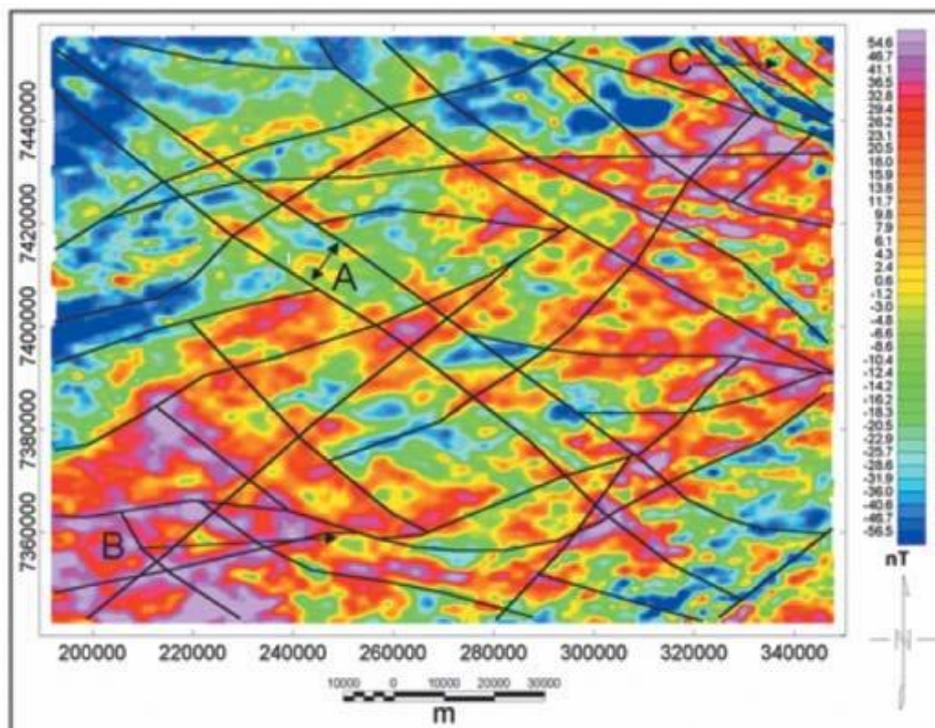


Figura 18: Mapa do arcabouço magnético-estrutural do Grupo Caiuá na área de estudo sobreposta ao mapa magnético residual micronivelado. A – Zona de Falha Cândido de Abreu – Campo Mourão; B – Lineamento de São Sebastião; C – Falha do Rio Alonzo (BETTÚ ET AL., 2006).

Mocellin e Ferreira (2009) realizaram a análise da conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no sudoeste do estado do Paraná, Brasil. Para a análise foram utilizados dados aeromagnéticos, o modelo digital do terreno e informações existentes, como geologia, hidrogeologia, estrutural e hidroquímica.

A partir da malha micronivelada do campo magnético residual e dos processamentos dos dados aeromagnéticos foram gerados os seguintes mapas: amplitude do gradiente horizontal total, amplitude do sinal analítico, inclinação do sinal analítico, gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico, *Theta Map* e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (MOCELLIN e FERREIRA, 2009).

Após a geração e interpretação dos mapas magnéticos, foi possível construir o mapa do arcabouço de subsuperfície, que sintetiza as principais estruturas e zonas magnéticas anômalas. Os lineamentos de direção NE-SW são preferenciais na porção sul da área, enquanto na porção norte dominam

direções NW-SE. As feições com direção E-W são subordinadas e ocorrem, preferencialmente, na região central da área de estudo. A ausência de tendências geofísicas na direção N-S deve-se ao paralelismo com as linhas de voo e ao micronivelamento executado naquela direção (MOCELLIN e FERREIRA, 2009).

A partir da interpretação dos dados gerados, foi possível realizar o mapa integrado do arcabouço estrutural-magnético (Figura 19). No arcabouço integrado foi evidenciado que todas as tendências estão segundo NW-SE, NE-SW, NNE-SSE e E-W.

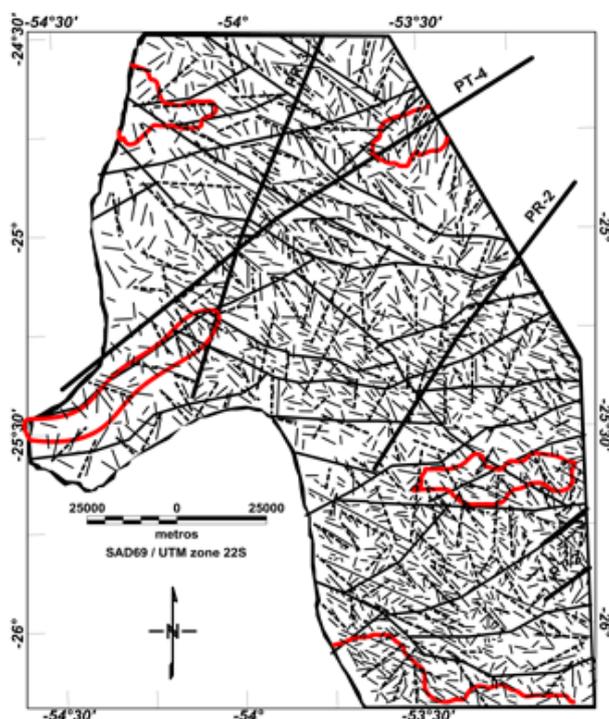


Figura 19: Mapa do arcabouço estrutural-magnético, linhas pretas, integrado com as principais zonas anômalas, em vermelho (MOCELLIN e FERREIRA, 2009).

Bongiolo et al. (2014) realizaram estudo da conectividade e compartimentação magnético-estrutural dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no centro do estado do Paraná. O objetivo foi compreender o controle estrutural do fluxo e do quimismo das águas subterrâneas e identificar também fraturas que possam representar zonas de conexão hidráulica.

Foram gerados diversos mapas aeromagnéticos como: Anomalia Magnética, Anomalia Magnética continuado para cima para 2.000m, Gradiente Horizontal Total, Mapa da Amplitude do Sinal Analítico, Ângulo *Tilt*, todos baseado nos mapas magnéticos continuado para cima para 2.000m, e correlacionados com a interpretação estrutural do MDE e a interpretação de Soares et al. (1982) e Zalán et al. (1987).

A partir desta base de dados foi gerado o Mapa Magnético-estrutural (Figura 20).

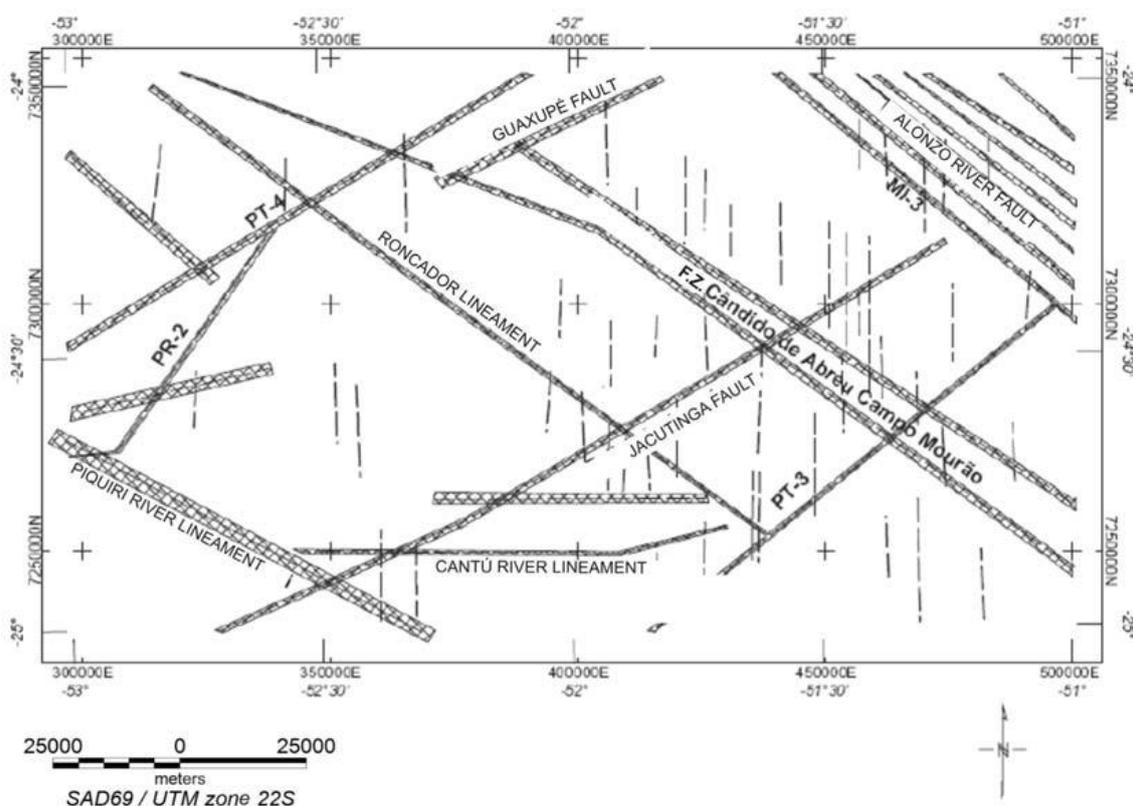


Figura 20: Mapa estrutural-magnético da área de estudo, com os lineamentos interpretados em imagens de sensoriamento, linhas tracejadas na direção NS (BONGIOLO ET AL., 2014).

Conforme Bongioio et al. (2014), as estruturas interpretadas de subsuperfície dos dados aeromagnéticos e dos dados de superfície, permitem refinar a estrutura da área e propor novos lineamentos ao longo das direções NW e EW. As estruturas com orientação de NS não foram detectadas nos mapas aeromagnéticos devido ao paralelismo com linhas de voo. No entanto, o Modelo

Digital de Elevação permitiu identificar as estruturas ocorrentes com tendência NS.

Hewaidy et al. (2015) realizaram uma pesquisa de exploração de águas subterrâneas com resistividade e dados magnéticos na parte noroeste do Golfo de Suez, Egito.

Para os dados magnéticos Hewaidy et al. (2015) produziram o mapa de Redução ao Polo Norte, que revela uma alta anomalia magnética ocupando as partes nordeste, noroeste e leste da área de estudo (linha tracejada preta), enquanto a baixa anomalia magnética ocupa a parte sudoeste (Figura 21).

Hewaidy et al. (2015) concluíram a partir dos dados aeromagnéticos as tendências das estruturas têm direções NE–SW, NW–SE, NNW–SSE e E–W.

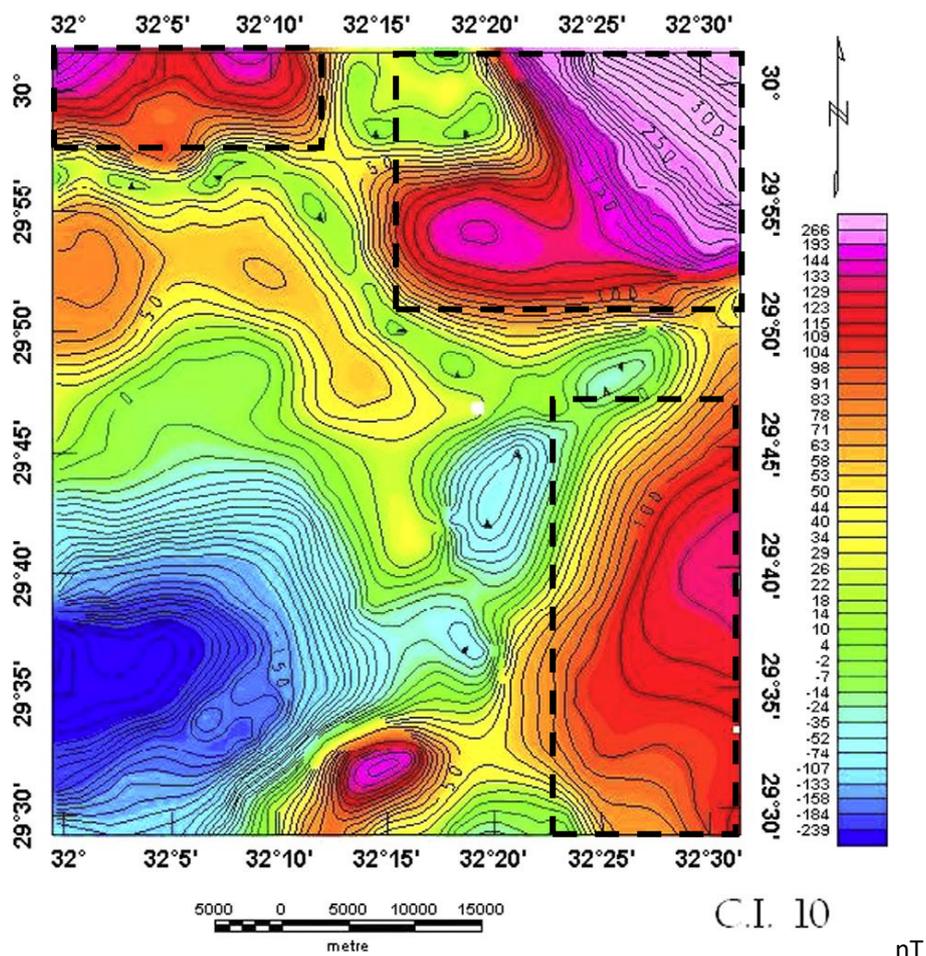


Figura 21: Mapa aeromagnético de Redução ao polo (HEWAIDY ET AL., 2015).

Ranganai et al. (2017) realizaram o estudo hidrogeológico utilizando dados aeromagnéticos, no Terreno Kraaipan-Granito-Greenstone, sudeste do Botswana.

A aplicação de métodos geofísicos na hidrogeologia aumentou nas últimas duas décadas, especialmente em áreas áridas e semiáridas. Um projeto para mapear o terreno de granito-greenstone Kraaipan no sudeste do Botswana foi recentemente realizado usando dados aeromagnéticos e gravimétricos com objetivo de mapear as rochas em profundidade, e assim entender a geologia, como também, avaliar a mineralização e potencial de água subterrânea na área de estudo (RANGANAI ET AL., 2017).

Os autores produziram os seguintes mapas: IGRF, intensidade total magnética (Figura 22), gravimétrico de Bouguer, solução da deconvolução de Euler, primeira derivada vertical e interpretação aeromagnético estrutural.

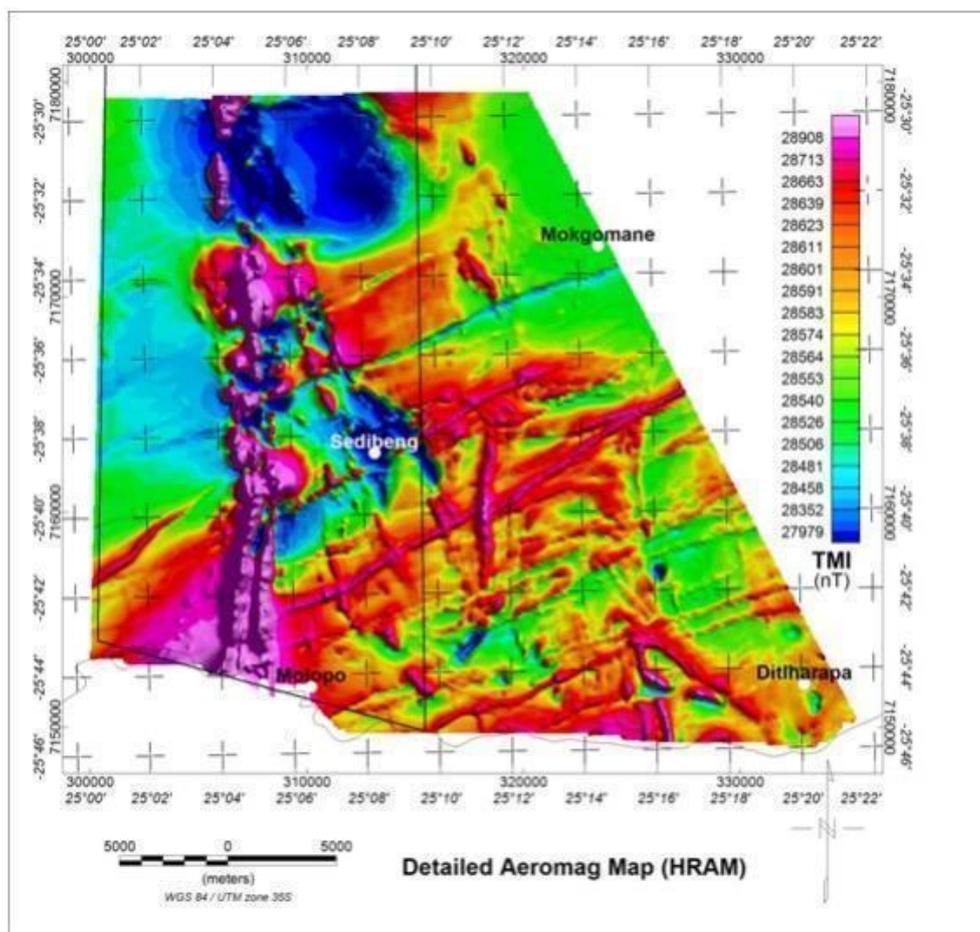


Figura 22: Mapa aeromagnético da Intensidade Magnética Total (RANGANAI ET AL., 2017).

Conforme Ranganai et al. (2017), os resultados dos métodos magnéticos e de gravidade revelaram que as litologias e o arcabouço tectônico, das rochas arqueanas do embasamento, se estendem para o sudeste de Botsuana a partir da África do Sul. Destaca-se que os mapas derivados, analíticos e de deconvolução de Euler revelam a complexa estrutura geológica das rochas e do embasamento para a avaliação do potencial da água subterrânea.

A Figura 23 apresenta composição 3D da primeira derivada vertical evidenciando os locais com maior possibilidade para água subterrânea. Na Tabela 1 são apresentados os dados compilados da Figura 23.

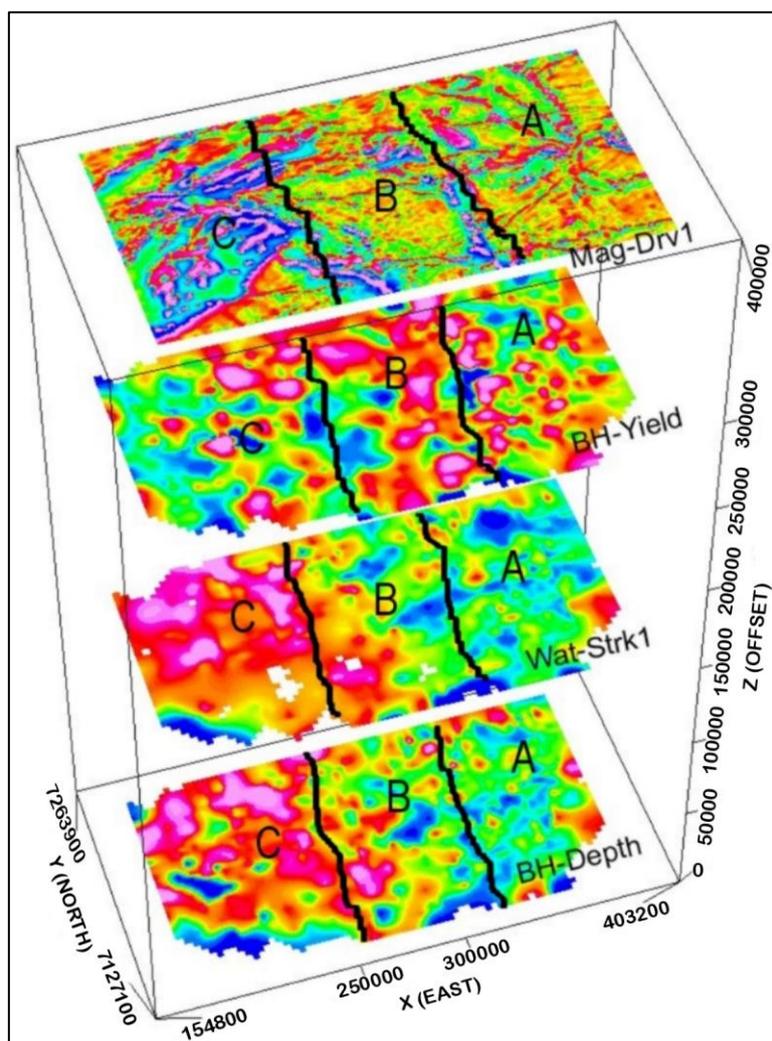


Figura 23: Composição 3D da primeira derivada vertical, evidenciando a profundidade de penetração da água (valores mais altos em vermelho/roxo e os valores mais baixos em azul) para correlação direta. Onde Mag-Drv1 (magnetic first vertical derivative), BH – Yield (borehole yield), Wat – Strk1 (water strike) e BH – Depth (borehole total depth) (RANGANAI ET AL., 2017).

Tabela 1: Compilação dos dados da Figura 23

Hidrogeofísica Variáveis/parâmetros	Zona A	Zona B	Zona C
Mag-Drv1	Vários lineamentos em vários ângulos, altamente fraturados	Magneticamente tranquilo, poucos lineamentos E-W	Algumas características lineares a curvilíneas, a maioria baixa magnética
Rendimento	Rendimento justo a alto	Zona de tendência NNE de alto rendimento de furo, ladeada por zona baixa a oeste	Pobre a localmente justo ou intermediário
Wat-Strk1	Raso; lençol freático alto	Geralmente águas rasas ladeadas por zonas profundas coincidentes com baixo rendimento	Principalmente grande profundidade, consistente com cobertura de areia
BH Depth	Raso	Profundidades intermediárias / moderadas a grandes	Principalmente grande profundidade, consistente com cobertura de areia
Tipo de aquífero; Comentários	Cárstico / dolomita e vulcânico	Principalmente granito-gnaisse, intrudido para N-S por BIF	Principalmente granito-gnaisse sob areias grossas do Kalahari

Pires (2020) realizou estudo no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (SAEC), no Paraná, para realizar uma análise qualitativa e quantitativa das regiões com maior produtividade de água subterrânea. Para tanto, foi realizada a correlação de dados aeromagnéticos com os dados dos poços tubulares ocorrentes na área de estudo. Para a análise hidrogeofísica foi gerado o mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ISA), e sobre este foram traçados os gradientes magnéticos orientados para estimar a profundidade das fontes (análise semiquantitativa). Segundo Pires (2020), foi possível identificar a profundidade medianas de até 800 para a fonte magnética.

Os dados aeromagnéticos coincidiram com os lineamentos interpretados no MDE, como destacaram estruturas nas direções NW-SE e ENE-WSW, reforçando os alvos para exploração de água subterrânea. Também, as estruturas magnéticas confirmam os lineamentos mapeados em superfície e evidenciam novas estruturas não aflorantes (PIRES, 2020).

3.7 Método Eletromagnético na Hidrogeologia

Este é um método geofísico ativo ou indutivo, baseado nas diferenças de condutividade das propriedades elétricas e magnéticas do subsolo, e da heterogeneidade da assembleia mineral das rochas em subsuperfície, assim as características da condutividade permitem identificar os diferentes tipos de rochas em subsuperfície.

Segundo Luiz e Silva (1973), a investigação eletromagnética da subsuperfície tem como base o fenômeno de indução, com uma corrente de baixa frequência que pode circular em uma bobina. Assim, inicia o processo de excitação através da indução, provoca a distribuição no campo magnético detectável por uma bobina receptora, que fornece informações sobre os condutores que as provocam.

Este método é aplicado na coleta de dados de condutividade aparente de subsuperfície, sendo muito utilizado na prospecção mineral, de água subterrânea e estudos ambientais, para contaminação de solo.

Conforme Telford (2003) e Luiz e Silva (1973), este método funciona utilizando uma corrente elétrica de baixa frequência definida pelo equipamento de transmissão, circulando através da bobina transmissora, que gera um campo magnético primário que induz uma corrente secundária em subsuperfície, representando o campo magnético secundário (Figura 24)

Para o levantamento de campo são utilizadas duas bobinas, uma transmissora e outra receptora, que são conectadas por um cabo as unidades transmissoras e receptoras a partir de cabos de diferentes tamanhos, para profundidades de investigação diferentes.

Quando o equipamento eletromagnético é aplicado sobre um corpo condutor, as ondas emitidas pela antena transmissora produzem um campo primário que induz um campo secundário (Figura 25). Este é o dado coletado, processado e passível de interpretação na investigação do subsolo.

O método eletromagnético terrestre é muito utilizado para a prospecção mineral e na pesquisa para água subterrânea em sistemas fraturados. Este

método, por apresentar resultados positivos na correlação com estruturas, tem uma forte aplicabilidade para a prospecção de sistemas aquíferos controlados por fraturas.

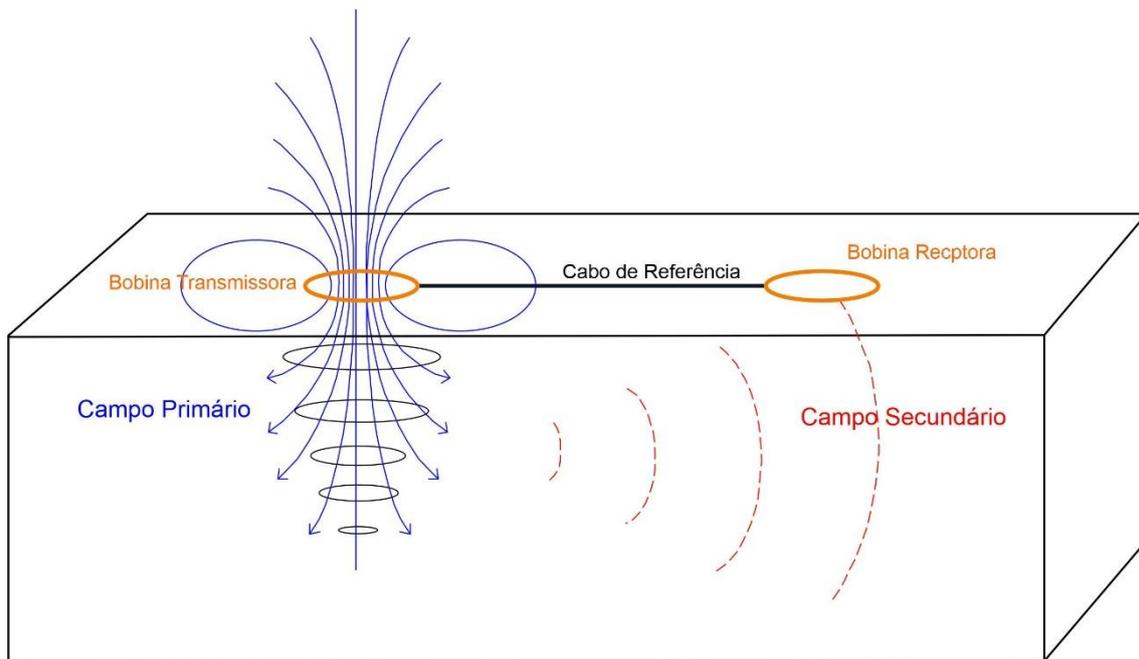


Figura 24: Princípio Eletromagnético (MOREIRA et al, 2007).

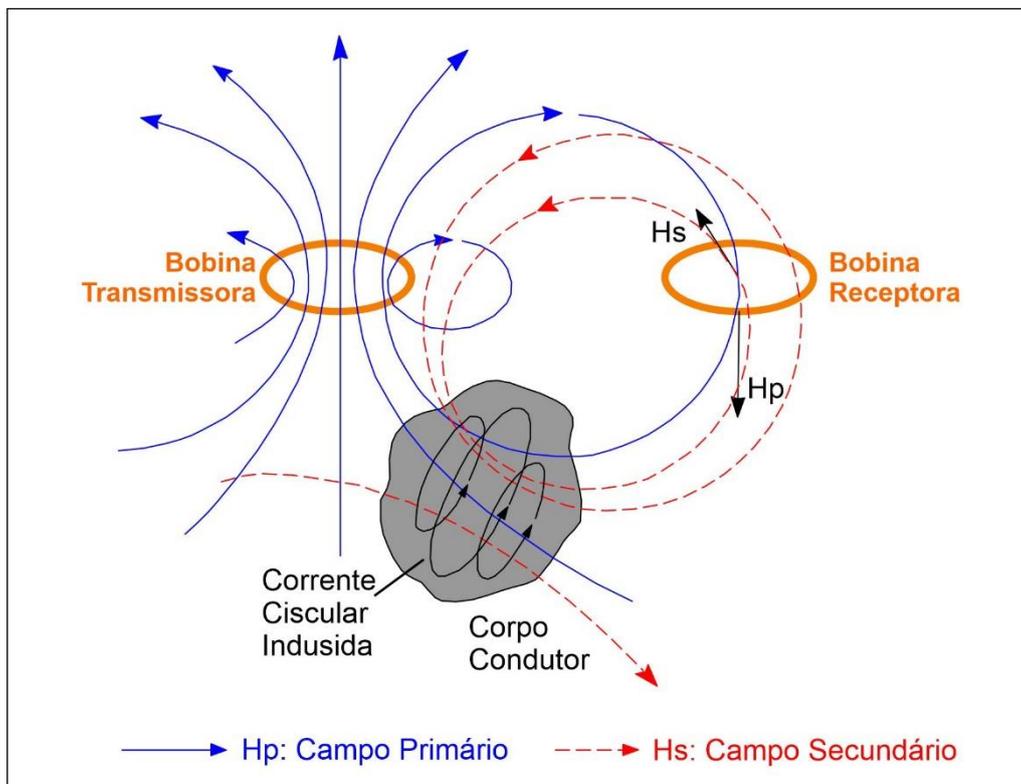


Figura 25: Princípio Eletromagnético que produz o campo secundário.

Fonseca e Bischoff (1982) utilizaram o método eletromagnético para pesquisa para água subterrânea na Ilha de Marajó, mapeando áreas predominantemente arenosas. Os resultados demonstraram bom desempenho para feições sedimentares, mais resistivas, (Figura 26) possibilitando a identificação da camada aquífera.

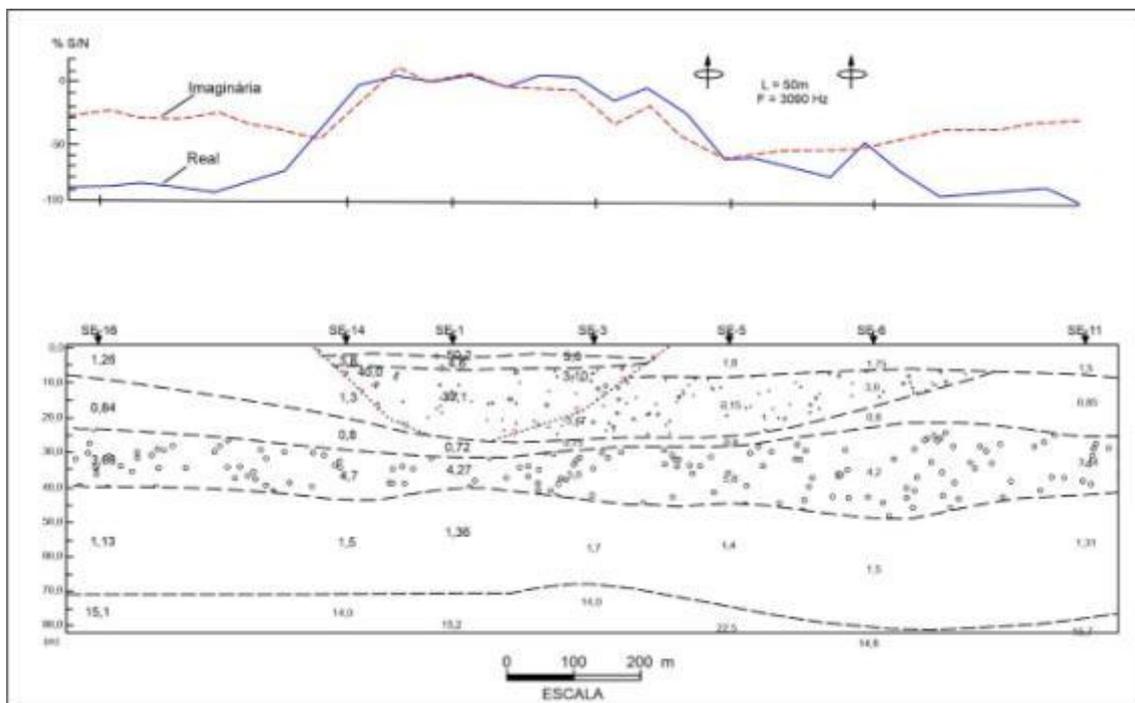


Figura 26: Perfil eletromagnético e perfil geológico (FONSECA e BISCHOFF, 1982)

Aquino (2000) realizou estudo geofísico para avaliar a contaminação do solo e água subterrânea em área industrial desativada, onde ocorreu a infiltração de resíduos perigosos diretamente no solo. Assim, foi realizado levantamento eletromagnético (EM) e georadar (GPR) para detectar e mapear a ocorrência de contaminantes em subsuperfície.

Os resultados dos levantamentos geofísicos mostraram o posicionamento da pluma de contaminação, sendo possível delimitar a extensão da contaminação do solo e água subterrânea (Figura 27). Também foi possível interpretar a direção de fluxo dos contaminantes, de acordo com o fluxo local da água subterrânea (AQUINO, 2000).

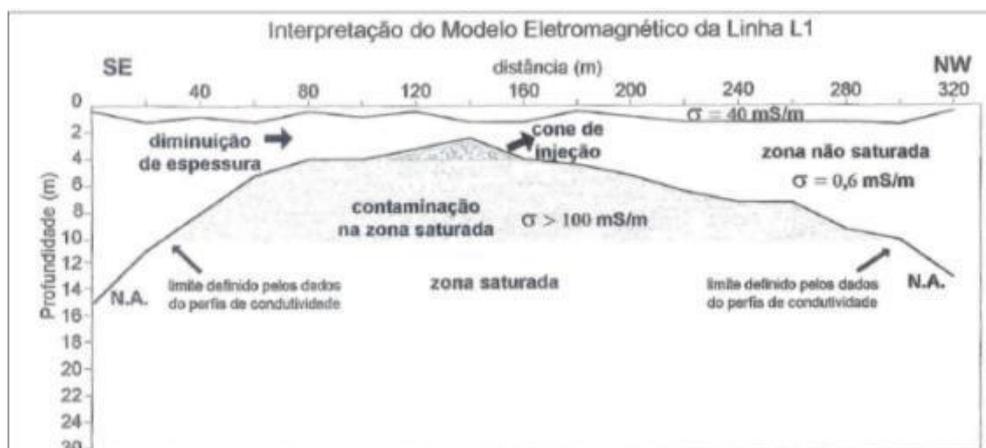


Figura 27: Modelo eletromagnético elaborado a partir dos perfis de condutividade aparente da Linha1 (AQUINO, 2000)

José e Cavalcante (2000) realizaram estudo para água subterrânea e contaminação do ambiente hidrogeológico, em regiões semiáridas para suprimento de pequenas populações (Figura 28). Segundo os autores, a locação de poços foi baseada apenas no mapeamento de fraturas, ou falhas, por meio de fotografias aéreas e na análise local, mostrando-se eficiente onde a cobertura do terreno é pouco espessa, porém, frequentemente falha no detalhamento de zonas mais convenientes de fraturamentos ou de rochas intemperizadas. Já o método eletromagnético tem sido utilizado com sucesso na busca desse detalhamento, reduzindo a margem de erro nas locações dos poços e diminuindo os custos envolvidos na construção.

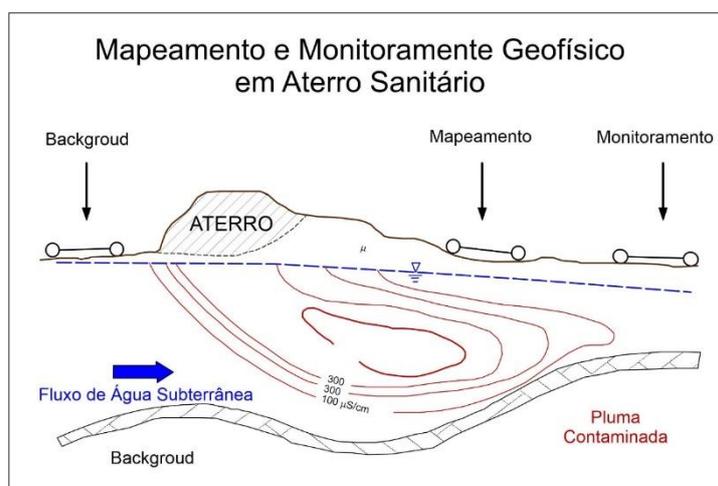


Figura 28: Esquemática dos processos de mapeamento e monitoramento da contaminação de água subterrânea usando instrumentos geofísicos (JOSÉ e CAVALCANTE, 2000).

Branco e Cunha (2001) realizaram estudo hidrogeológico na região de Fumo em Irauçú, Ceará, caracterizada por escassez de recursos hídricos. Para tanto, os autores utilizaram dois métodos, o Eletromagnético (EM) e eletromagnético VLF (very low frequency) com geologia de campo. Conforme os autores, os resultados mostram uma ótima aplicabilidade das técnicas eletromagnéticas para detectar anomalias importantes associadas a poços produtivos em região de embasamento cristalino (Figura 29).

Carrasquila e Ulugergerli (2006) realizaram teste com o método geofísico Transiente Eletromagnético (TEM) para o mapeamento estratigráfico e no delineamento hidrogeológico, na Bacia de Campo situada na borda leste da porção continental e dentro da planície fluvial do rio Paraíba, caracterizada geologicamente por sedimentos Terciários e Quaternários depositados sobre o embasamento gnáissico.

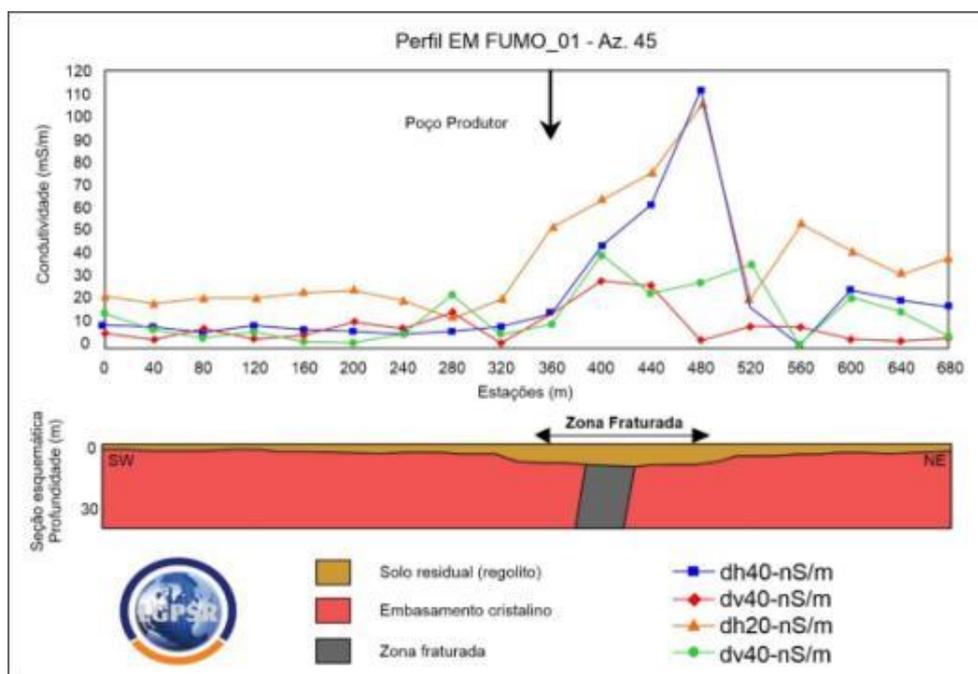


Figura 29: Zona anômala condutiva detectada ao longo do perfil realizado na área do Fumo, cruzando o poço profundo. A figura mostra os dados coletados com o arranjo dipolo horizontal e dipolo vertical (BRANCO e CUNHAM,2001).

Conforme Carrasquila e Ulugergerli (2006), os resultados mostram que o levantamento geofísico através de TEM foi capaz de detectar a presença de formações geológicas mais condutivas, em relação à presença de argila, a média camadas condutoras e uma camada resistiva profunda. O poço perfurado na área, conforme sugerido pelos resultados deste estudo, revelou que a camada resistiva profunda estava relacionada com um conglomerado com lentes de argila, que foi interpretado anteriormente como fraturas do leito rochoso.

O estudo foi importante para separar as camadas condutivas e resistivas (Figura 30), e a água doce só pode ser encontrada em camadas resistivas relacionado a sedimentos porosos (areia ou conglomerado) ou em fraturas presente na rocha (CARRASQUILA e ULUGERGERLI, 2006). Também foi possível diferenciar as rochas sedimentares do embasamento e interpretar possíveis fraturas.

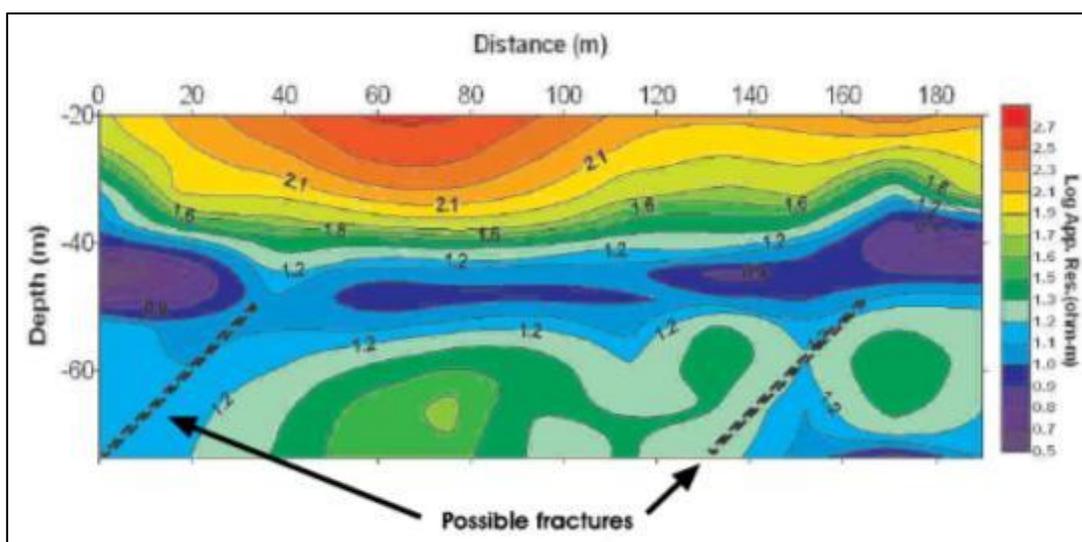


Figura 30: Pseudoseção da resistividade aparente com TEM do Perfil 1 (CARRASQUILA e ULUGERGERLI, 2006).

Poisson et al (2008) realizaram estudo em rejeito estéril, que são propensos a gerar drenagem ácida de minas devido à oxidação de minerais sulfídricos. Isto representa um perigo para o meio ambiente. Para o estudo, foi realizado levantamentos geofísicos de resistividade e EM, sendo possível identificar 3 camadas diferenciadas pelo seu conteúdo de material oxidado e rocha não oxidada. Também a granulometria e a sua homogeneidade ou heterogeneidade da camada confirmaram o modelo estrutural de empilhamento

dos rejeitos, exibindo uma estrutura estratificada horizontal grosseira com alternâncias de grão finos de alta capacidade de retenção de água e grão grossos de baixa capacidade de retenção de água.

O modelo geofísico, realizado a diferentes profundidades a partir dos dados de EM VD e HD, permitiu identificar a direção de fluxo dos contaminantes, visto que material não oxidado deve ser mais permeável à gravidade de fluxo do que o material oxidado pelo menos sob altamente saturado condições.

Koroney (2013) realizou estudo para água subterrânea utilizando os métodos geofísicos de resistividade e eletromagnético, para localizar falha documentada na região do Vale Gunter, Condato de Franklin. Segundo o autor, os métodos geofísicos auxiliaram na localização de zonas favoráveis a ocorrência de água subterrânea, zonas permeáveis. Também permitiram identificar as zonas secundárias de permeabilidade, relacionadas a falha documentada.

Cavalcante et al (2014) trabalharam na aplicação do método eletromagnético para a prospecção de água subterrânea no município de Paulistana, nordeste do Brasil, em região de clima semiárido localizado no embasamento cristalino. Neste estudo buscavam identificar descontinuidades (falhas e fraturas) favoráveis para o armazenamento de água subterrânea.

Na exploração de aquífero fissural o mergulho da fratura é de grande relevância na locação de poço e na escolha de alvos. Para a locação de poço, o mergulho deve ser levado em conta para que se possa interceptar a fratura em níveis mais profundos, dentro das possibilidades da técnica de perfuração. A opção por fraturas verticais ou subverticais podem ter maior interesse prospectivo, pois podem atingir níveis mais profundos, interceptando fraturas secundárias do sistema aquífero (CAVALCANTE et al, 2014).

Também se destaca a relevância da condutividade da fratura, cujos valores alteram a amplitude das anomalias, mas não a sua forma. Porém, por levar em conta a condutividade da água, ela pode trazer informações importantes a respeito da salinidade da água (CAVALCANTE et al, 2014).

Banks et al (2019) realizaram estudo hidrogeofísico usando levantamento eletromagnético, para obter imagens de subsuperfície na bacia de gás em camada de carvão sedimentar na Bacia de Gloucester – Austrália, interpretaram

que as falhas profundas, maiores que 200m, podem se estender até muitos metros da superfície. Quando analisadas as amostras de águas superficiais e subterrâneas perto das falhas, estas mostraram a ocorrência de *hotspots* de águas subterrâneas, mais profundas nas camadas de carvão, que descarregam na rede de córregos através do aquífero aluvial (BANKS et al, 2019).

Muchingami et al (2021) estudaram a formação gnaisseca Houtriver, na província de Limpopo na África do Sul, para a exploração de água subterrânea, região descrita como complexa em decorrência dos processos relacionados à recarga, características geológicas subjacentes e conectividade de fratura da matriz rochosa do aquífero. Assim, utilizaram os métodos geofísicos de eletromagnetometria e eletrorresistividade (Sondagem elétrica vertical - SEV).

Conforme Muchingami et al (2021), os resultados mostraram que as investigações hidrogeofísicas e o mapeamento geológico têm se mostrado ferramentas úteis na identificação de alvos de perfuração, para áreas sob a formação de embasamento cristalino no complexo gnaisse Houtriver. Isso foi reforçado pelo fato de que o armazenamento e a dinâmica da água subterrânea dentro de tal formação cristalina metamórfica são controlados principalmente pela extensão da zona de intemperismo e existência de fraturas e fissuras na rocha fresca, criando uma alta heterogeneidade na formação em termos de lineamento distribuição e sistema de fratura. Os resultados das investigações magnéticas e eletromagnéticas sugeriram que existem variações laterais drásticas no aquífero.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma abaixo está apresentado as atividades desenvolvidas e métodos empregados, nesse estudo, com os levantamentos, análises e interpretações dos dados geológicos, geofísicos e hidrogeológicos. (Figura 31).

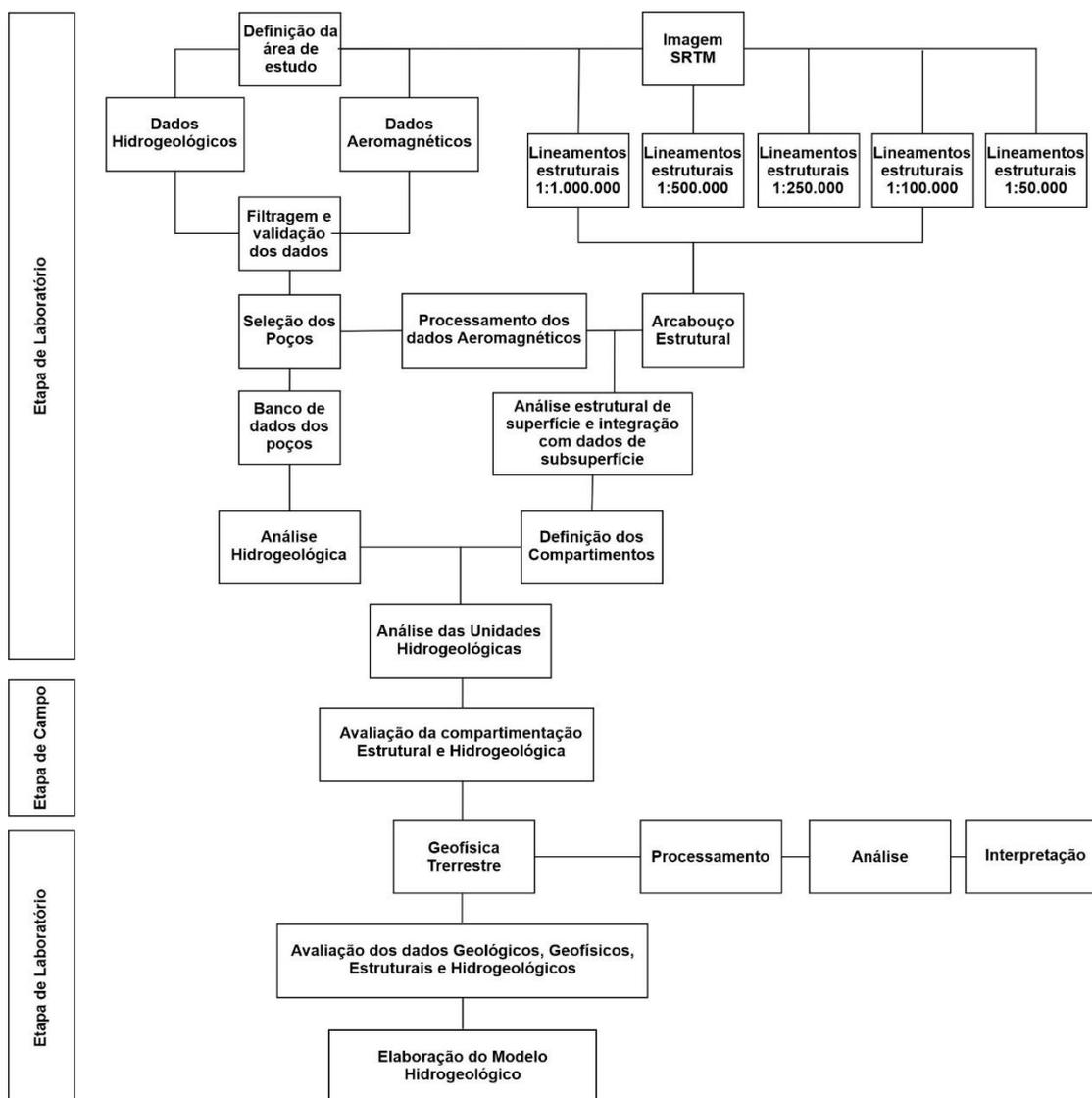


Figura 31: Fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo.

4.1 Levantamento dos poços tubulares

A identificação e cadastro de poços tubulares foi feita junto ao DRH/SEMA (Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Estadual do Meio Ambiente), Corsan (Companhia Rio-grandense de Saneamento), SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e empresas de perfuração. Os dados de poços coletados foram analisados para identificar quais se apresentavam confiáveis a serem utilizados no banco de dados.

Em sequência foi criado o banco de dados e alimentado com as características e parâmetros que foram utilizados na pesquisa: profundidade final, cota do terreno, entradas d'água, vazão, capacidade específica, localização, parâmetros físico-químicos da água, nível estático e dinâmico.

Este banco de dados, é muito importante para a compreensão da hidrogeologia e posterior correlação com os dados gerados com os levantamentos geológicos/estruturais e geofísicos.

4.2 Análise de Lineamentos Morfoestruturais e Magnéticos

Para a extração das morfoestruturas foi utilizada as imagens orbitais do projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), disponíveis no site da Earthdata para acesso livre. Os lineamentos magnéticos foram extraídos dos dados aeromagnéticos do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), também disponíveis para livre acesso.

Para a caracterização estrutural da área de estudo foram utilizados os softwares Qgis 3.4.6 e Geosoft (Oasis Montaj 6.4.2). O primeiro foi utilizado na criação do mosaico das imagens SRTM (resolução de 30 metros), que gerou o Modelo Digital de Elevação (MDE) e para extração de lineamentos morfoestruturais negativos. O recorte foi realizado, primeiramente, na escala 1:1.000.000 e, secundariamente, a partir do limite do município de Bagé/RS. Desta forma se obtendo uma visão mais abrangente das morfoestruturas e evitando-se os possíveis efeitos de borda.

Durante a extração dos lineamentos foi realizado o efeito de falsa iluminação, nas direções 45° e 315°, para destacar as estruturas existentes e facilitar a identificação e traçado dos lineamentos.

Os procedimentos para trabalhar no Qgis iniciaram com a homogeneização do sistema de referências, mantido o dos primeiros *shapefiles* importados, o WGS84. Após foram criados os *shapefiles* para extração dos lineamentos que representavam as feições morfoestruturais negativas. Assim, se criou *shapefiles* para cada escala definida para o traçado dos lineamentos, 1:1.000.000, 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000 e 1:50.000. As escalas foram escolhidas devido ao tamanho da área de estudo e pela influência de grandes estruturas na compartimentação dos blocos, bem como servir de subsídio para avaliação local, nas escalas de detalhe.

Nesta etapa de interpretação e extração de lineamentos iniciou-se com os dados na escala 1:1.000.000, seguindo para as escalas de detalhe. O procedimento de extração nesta sequência, objetivou a identificação dos lineamentos de grande porte, nas escalas 1:1.000.000, 1:500.000, de médio porte, na escala 1:250.000, e pequeno porte nas escalas 1:100.000 e 1:50.000, para a área de estudo. Também foram analisados e gerados diagramas dos comprimentos dos lineamentos.

No software Geosoft (Oasis Montaj 6.4.2) foi realizada a importação do banco de dados no formato GBD, do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), e posteriormente foi realizado o recorte da área definida para a pesquisa. Esta resultou em uma área na escala de 1:436.000. Após a conferencia dos sistemas de coordenadas, iniciou-se o procedimento dos métodos de realce de anomalias magnéticas. A partir deste ponto foi criada a base para os mapas aeromagnéticos e assim realizar a marcação das anomalias magnéticas. Posteriormente estes dados foram comparados com os lineamentos morfoestruturais na escala 1:500.000, desta forma trabalhando com as escalas mais próximas e possíveis de comparação.

4.3 Hidrogeologia

Para realizar a caracterização hidrogeológica foram utilizados os dados coletados e selecionados de relatórios das perfurações de poços da Fepam, Corsan, Daeb, Siagas e de empresas perfuradoras de poços. Inicialmente foram utilizados os dados das vazões e capacidade específica, visto que estes representam os principais indicadores de interesse na locação de novos poços nesta região.

A vazão é o valor retirado do teste de bombeamento e calculado para os parâmetros do teste de bombeamento. Assim, a análise da vazão permite compreender e caracterizar cada zona hidrogeológica definida para a área da pesquisa.

A capacidade específica corresponde a capacidade de produção de um poço. A definição deste valor é realizada a partir da vazão e do rebaixamento gerado, durante o teste de bombeamento, conforme os níveis estáticos e dinâmicos observados.

A avaliação da compartimentação estrutural e hidrogeológica, foi realizada por meio da geração de mapas de capacidade específica e vazão que foram correlacionados com os dados de lineamentos, existentes em cada um dos compartimentos estruturais que foram definidos para a área. Com isso, foi possível avaliar a ocorrência de zonas, caracterizadas pela ocorrência de diferentes estruturas e produtividades dos poços tubulares.

Foram calculadas as médias, medianas, desvio padrão e identificados máximos e mínimos para a caracterização geral da área, como também para cada zona hidrogeológica.

4.4 Processamento Aeromagnetométrico

Os dados utilizados para a análise e processamentos aerogeofísicos foram obtidos no Projeto Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), composto por 633 linhas de voo (N-S) e 34 linhas de controle na direção leste oeste,

perfazendo um total de 159.789,21 km de perfis e abrangendo uma área de 75.000 km² na região sul do estado (Figura 32).

O levantamento principal, com direção N-S, foi realizado com espaçamento de 500m e as linhas de controle, com direção E-W, com espaçamento de 10 km, sempre mantendo a altura de voo em 100 m.

O equipamento utilizado para coleta dos dados magnetométricos consistiu de um magnetômetro de bombeamento ótico de vapor de césio (SCINTREX CS-2) ajustado para coleta de dados a cada 0,1 segundo, com a um intervalo de amostragem de 6,3m e 7,5m.

Os dados magnéticos do projeto de aerolevanteamento do CPRM (2010) foram recortados conforme os limites da área de estudo e do limite do município, compreendendo 60 linhas de voo na direção N-S abrangendo a totalidade da área de estudo (Figura 33).



Figura 32: Localização do aerolevanteamento e a localização do município de Bagé e da área de estudo (em vermelho – CPRM, 2010).

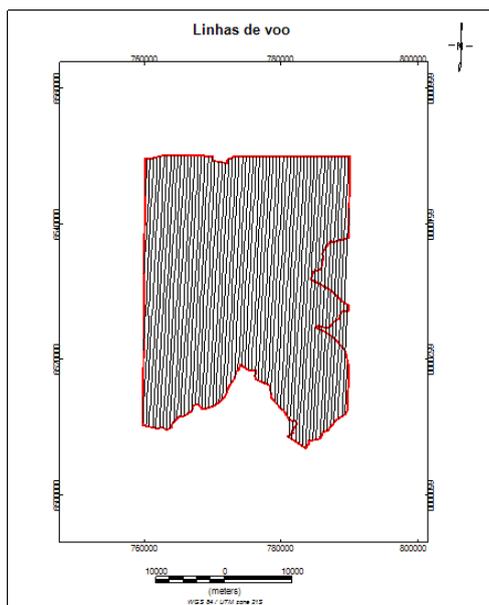


Figura 33: Recorte das linhas de voo do levantamento realizado no projeto de aerolevante da CPRM (2010), que abrange a área de estudo (limite vermelho)

4.4.1 Pré-processamento

O pré-processamento consiste em importar os dados no formato xyz para o *software* específico, a partir deste foram desenvolvidos testes visuais para avaliar as características de cada dos dados e começar o processo de construção da malha regular bi-direcional, objetivando eliminar objetos e anomalias que não correspondem à realidade do levantamento aéreo.

Os dados aeromagnéticos da área de estudo, do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), são disponibilizados já com a correção do IGRF (International Geomagnetic Reference Field) e foram processados no formato xyz (ASC II) GDB's, compatíveis com a plataforma do Oasis Montaj (Geosoft) e organizados pela ordem das linhas de voo, depois por pontos de medição.

Os dados magnéticos aéreos foram interpolados em uma grade regular de 100m de tamanho de célula (1/5 do espaçamento original das linhas de voo) e utilizando o interpolador pelo método Bi-Direcional (Geosoft, 2013). O mapa da Continuação para Cima da Redução ao POLO, ou somente POLO, constitui a base para a geração dos demais mapas e da interpretação qualitativa e quantitativa.

Para a geração dos mapas aeromagnéticos, para análise estrutural, os dados passam pelo processo de “continuação para cima”, simulando aquisição dos dados a uma altitude mais elevada da real, neste caso 500m. Este procedimento é realizado para remover ou minimizar os sinais de fontes rasas e ruídos, assim tornando os produtos mais passíveis de uma interpretação que corresponda a realidade da área estudada.

4.4.2 Processamento Qualitativo – Principais métodos de realce de anomalias

Para uma melhor interpretação dos dados aeromagnéticos foram utilizados os métodos de realce, processamento qualitativo, para destacar as anomalias magnéticas e remoção de ruídos que não correspondem à realidade. As equações dos principais métodos estão sintetizadas na Figura 34.

Para o refino dos dados aeromagnéticos foram realizados os seguintes métodos de realce: gradientes horizontais (G_x , G_y – CORDELL & GRAUCH 1985), gradiente vertical (G_z – EVJEN 1936), amplitude do sinal analítico (ASA – NABIGHIAN 1972, 1974, ROEST ET AL., 1992), gradiente horizontal total (GHT – CORDELL & GRAUCH 1985), inclinação do sinal analítico (ISA – MILLER & SINGH 1994), inclinação do gradiente horizontal total (IGHT – COOPER & COWAN 2006), gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT-ISA – VERDUZCO ET AL., 2004), *Theta Map* (WIJNSET AL., 2005), inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT – FERREIRA ET AL., 2010, 2013), *Signum Transform* (SOUZA & FERREIRA 2012, 2013, 2015) e ISA+IGHT e ISA-IGHT (CASTRO ET AL., 2018). Estes procedimentos se fazem necessários para evidenciarmos com maior eficiência o centro e as bordas das fontes magnéticas, auxiliando na interpretação e extração das informações dos lineamentos.

Onde M é a anomalia do campo potencial, x , y , z são os vetores unitários nas direções x , y e z .

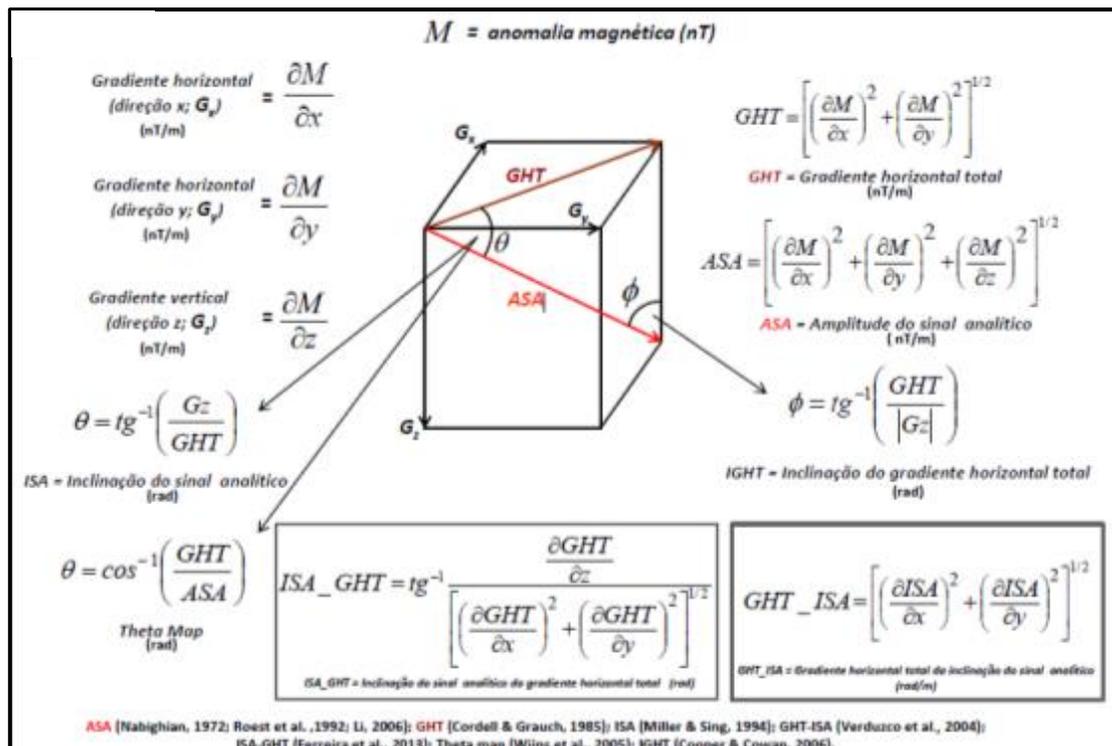


Figura 34: Principais métodos de realce das anomalias magnéticas (FERREIRA ET AL., 2010)

4.4.2.1 Redução ao Polo

A técnica de realce denominada de Redução ao Polo (RTP) é recalculado a partir dos dados do Campo Magnético Anômalo (BARANOV & NAUDY 1957, MACLEOD ET AL., 1993). Assim, o campo magnético é simulado e a localização da fonte no polo magnético ($I = 90^\circ$) (Castro ET AL., 2014), transforma a anomalia dipolar em monopulares ajustada sobre o corpo gerador da anomalia e as anomalias são ampliadas ao máximo e dirigidas ao centro ou borda das fontes (ISLES & RANKIN 2013). Desta forma a fonte anômala independe da latitude, inclinação e declinação magnética local, que durante a coleta apresenta um ângulo diferente de 90° e conseqüentemente a anomalia não corresponde a realidade.

4.4.2.2 Continuação Para Cima

Quando é realizada a Continuação Ascendente ocorre uma “simulação” de coleta de dados magnéticos a uma altitude maior do que originalmente foi

coletado, removendo e minimizando os ruídos, sinais de fontes fracas e alta frequência, apresentando dados mais limpos.

4.4.2.3 Gradiente Vertical (GZ)

O Gradiente Vertical é utilizado para destacar o centro dos corpos anômalos, realçando os sinais de comprimento de onda mais curto de origem rasa, (Tabela 2; EVJEN, 1936).

Tabela 2: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Gradiente Vertical realça as altas frequências (fontes rasas), em detrimento das baixas, eliminando os efeitos regionais, de longos comprimentos de onda, associados a fontes profundas.	Qualitativo	nT/m

4.4.2.4 Gradientes horizontais (GX e GY)

O Gradiente Horizontal em X e Y funciona como o Gradiente Vertical, apenas se diferenciando por ser aplicado nas direções horizontais para X e para Y separadamente (Tabela 3; CORDELL & GRAUCH 1985).

Tabela 3: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Filtros para profundidade dos corpos anômalos, sendo independentes da direção do campo magnético regional, da magnetização da fonte e do mergulho do contato.	Qualitativo	nT/m

4.4.2.5 Gradiente Horizontal Total (GHT)

O Gradiente Horizontal Total tem por finalidade destacar as bordas da anomalia magnética, desta forma realça os limites de corpos e estruturas geológicas que causam as anomalias (CORDELL & GRAUCH 1985).

Este método de realce transforma a fase em um realce das altas frequências, assim proporciona um estreitamento destes picos para aumentar a definição das bordas dos corpos (Tabela 4).

Tabela 4: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Vetor resultante das derivadas de primeira ordem nas direções x e y , para realçar os limites (bordas) dos corpos e estruturas causadoras das anomalias.	Qualitativo	nT/m

4.4.2.6 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

Por Amplitude do Sinal Analítico (NABIGHIAN 1972, 1974, ROEST ET AL., 1992) entende-se que anomalias são causadas por contatos verticais, o sinal analítico é usado para estimar a profundidade usando uma regra de meia largura de amplitude simples (Tabela 5). Assim o valor máximo corresponde ao topo da fonte e a largura está relacionada com a profundidade.

Tabela 5: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Função das derivadas nas direções x , y , z do campo magnético. Os picos da ASA são simétricos e ocorrem diretamente sobre as bordas dos corpos e diretamente sobre o centro dos corpos estreitos.	Qualitativo	nT/m

4.4.2.7 Inclinação do Sinal Analítico (ISA)

A Inclinação do Sinal Analítico (MILLER & SINGH, 1994) é utilizado para fontes anômalas do campo potencial e informar a extensão horizontal, ou seja, destaca o centro do corpo. Este é definido através de duas derivadas horizontais e da derivada vertical, que tem a propriedade positiva sobre a fonte anômala, zero próximo da borda e negativo ou valores baixos fora da fonte (Tabela 6). Assim este método de realce é aplicado para identificação da fonte em diferentes profundidades e identificar a extensão horizontal.

Tabela 6: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Ângulo formado entre os vetores real e imaginário do sinal analítico representando o quociente entre G_z e o GHT. Método detector de centros de corpos ou estruturas magnéticas.	Qualitativo	Radiano (rad)

4.4.2.8 Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT_ISA)

O Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (VERDUZCO ET AL., 2004) auxilia na identificação de estruturas não reconhecíveis em métodos anteriores (Tabela 7).

O autor destaca que o GHT_ISA não depende da direção de magnetização e possibilita uma melhor definição da função centro e sobre os limites dos corpos. Também este método de realce é muito indicado para mapeamento de estruturas rasas do embasamento e na prospecção mineral.

Tabela 7: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Combinação da ISA e suas derivadas horizontais G_x e G_y . Para destacar centro e as bordas dos corpos	Qualitativo	Radiano (rad)/m

4.4.2.9 Theta map

Este é um método que auxilia no reposicionamento da anomalia magnética sobre a fonte geradora (WIJNS ET AL., 2005). O *Theta Map* corresponde a normalização do gradiente horizontal total pela amplitude do sinal analítico, realça as baixas amplitudes (Tabela 8).

Tabela 8: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Normalização do GHT pela ASA. Posiciona as anomalias diretamente sobre suas fontes.	Qualitativo	Radiano (rad)

4.4.2.10 Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA_GHT)

Os principais atributos deste método são para fornecer amplitudes máximas nas bordas da fonte e equalizar sinais de fontes superficiais e profundas (FERREIRA ET AL., 2010). Este é utilizado para mapeamento de estruturas e prospecção mineral por destacar, com melhor resolução, os limites dos corpos em profundidade distintas (Tabela 9).

Tabela 9: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016)

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Aplicação do ISA nos dados derivados do GHT. Melhor resolução das bordas dos corpos, devido a equalização do GHT pelo ISA.	Qualitativo	Radiano (rad)

4.4.2.11 Inclinação do Gradiente Horizontal Total (IGHT)

A Inclinação do Gradiente Horizontal Total representa a normalização do GHT pelo GZ (COOPER & COWAN 2006), apresentando desempenho similar

ao *Theta Map*. É utilizado principalmente para bordas de corpos magnéticos tanto para fontes rasas como profundas (Tabela 10).

Tabela 10: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Normalização do GHT pelo Gz. Posiciona as anomalias diretamente sobre suas fontes. Utilizado para delimitar as bordas dos corpos, equalizando o pico de corpos rasos e profundos.	Qualitativo	Radiano (rad)

4.4.2.12 Signum Transform

Este método de realce tem por finalidade estimar a profundidade das fontes magnéticas (SOUZA & FERREIRA 2012, 2013, 2015). Segundo Souza & Ferreira (2015) é um simples derivado baseado em método de interpretação qualitativa e quantitativa de anomalias magnéticas de fontes discretas. A metodologia baseia-se na normalização de uma filtragem função, que é um derivado do campo anômalo ou função disso, pelo seu valor absoluto (Tabela 11). O *Signum Transform* é utilizado para definir os limites das estruturas.

Tabela 11: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (com base em FEDALTO 2015, WEIHERMANN 2016, in SILVA, 2016).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Normalização do GHT pelo Gz. Posiciona as anomalias diretamente sobre suas fontes. Utilizado para delimitar as bordas dos corpos, equalizando o pico de corpos rasos e profundos.	Qualitativo e Semi-quantitativo	Radiano (rad)

4.4.2.13 Inclinação do Sinal Analítico mais Inclinação do Gradiente Horizontal Total (ISA+IGHT) e Inclinação do Sinal Analítico menos Inclinação do Gradiente Horizontal Total (ISA-IGHT)

Estes métodos estão baseados em duas técnicas de realce, ISA e IGHT (CASTRO ET AL., 2018). Os métodos compreendem a adição ou subtração destes dois filtros, produzindo valores constantes sobre as fontes das anomalias epicos sobre o centro dos corpos (Tabela 12).

Tabela 12: Características da técnica de realce aplicado na área de estudo (CASTRO ET AL., 2018).

Característica	Tipo de Realce	Unidade
Definidos pelo arco tangente de razões envolvendo o gradiente horizontal total e a derivada vertical. Estes filtros são úteis para localizar tanto fontes rasas quanto profundas.	Qualitativo	Radiano (rad)

4.4.2.14 Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler é o método para estimar a profundidade de uma fonte de anomalia magnética, ou gravimétrica, que realiza uma varredura dos dados residuais através de uma janela móvel, onde são estimadas as profundidades de suas fontes causadoras.

A técnica de deconvolução de Euler (NABIGHIAN *et al.*, 2005) usa derivados x , y e z de primeira ordem para determinar a localização e a profundidade dos alvos (esfera, cilindro, dique fino, contato), cada um caracterizado por um índice estrutural específico.

O cálculo do método está relacionado com a inversão da equação homogeneizada de EULER (GEOSOFT, 2010c) sendo interpretada como a derivada horizontal e vertical da localização da fonte utilizada para o grau de homogeneização (η), índice estrutural (THOMPSON, 1982).

O índice estrutural é definido pela medida da variação da intensidade do campo potencial em relação à distância entre a fonte e o detector, para uma determinada geometria do modelo.

Conforme Castro (2014) e Bongioiolo (2011), a equação de Euler é resolvida pelo método dos mínimos quadrados, em cada ponto da malha, dentro de uma janela pré-estabelecida que se move sobre as colunas da malha. As soluções são obtidas para um determinado índice estrutural (η) e é considerada válida quando a profundidade calculada for menor que a tolerância especificada e se a localização da fonte estiver a uma distância limite pré-determinada do centro da janela.

A equação de Euler para dados de campos potenciais, pode ser escrita da seguinte forma:

$$(x - x_0) dT/dx + (y - y_0) dT/dy + (z - z_0) dT/dz = \eta (B - T),$$

Onde x_0 , y_0 , e z_0 marcam a posição da fonte magnética da qual T é o campo medido no ponto (x, y, z) . O valor de B representa o regional do campo e o grau de homogeneidade (índice estrutural).

A escolha do índice estrutural (CASTRO, 2014 e GEOSOFT, 2010) é atrelada ao conhecimento geológico da área de estudo, sendo as feições geológicas relacionadas a formas geométricas simples, para as quais são utilizados valores padrão para corpos magnéticos.

No método padrão de Euler, a modelagem de profundidade das fontes resolve o posicionamento das fontes (x_0, y_0, z_0) juntamente com os erros associados. A janela de busca é centrada em cada posição da solução, sendo todos os pontos da janela utilizados para resolução das soluções de Euler. As soluções de profundidade que excedam ao limite de tolerância, normalmente 15%, e de distância entre a fonte e a janela pré-definidos, são rejeitadas. Cabe ao intérprete a seleção das soluções restantes, de modo que estas sejam coerentes com a realidade geológica.

Tabela 13: Índices estruturais dos corpos magnéticos.

Corpo Magnético	Índice Estrutural
Contato/degrau	0
Soleira/dique	1
Cilindro/pipe	2
Esfera	3

A aplicabilidade de um mapa de soluções de Euler é avaliada pelo grau de concentração das mesmas, ou seja, são consideradas satisfatórias quando estão alinhadas em modelos 2D ou quando se superpõem nos modelos 3D. Soluções dispersas indicam resultados insatisfatórios (CASTRO, 2014).

4.5 Análise das Unidades Hidrolíticas

A geologia local foi referenciada a partir de dados preexistentes, como mapa geológicos na escala 1:750.000 (2006) e 1:100.000 (2018) da CPRM e relatório das perfurações de poços do DRH/SEMA, Corsan, Daeb, Siagas e de empresas perfuradora de poços.

A determinação das unidades hidrolíticas foi realizada tendo como base a geologia da área de estudo, sendo que após foi gerado o mapa das unidades hidrolíticas. Nesse mapa foram plotados os poços, sendo que a avaliação do comportamento hidrogeológico de cada unidade foi feita com base na avaliação dos parâmetros vazão e capacidade específica.

4.6 Análise da Compartimentação Estrutural e Hidrogeológica

A análise da compartimentação estrutural e hidrogeológica foi realizada por meio da integração dos dados geológicos, estruturais (lineamentos morfoestruturais e magnéticos) e hidrogeológicos que foram obtidos nas etapas anteriores.

Com base nisso foram identificados compartimentos, avaliadas as características geológicas, estruturais e hidrogeológicas de cada compartimento, bem como elaborados mapas para representação da compartimentação.

4.7 Levantamento Geofísico Terrestre –Eletromagnético

O equipamento utilizado na coleta de dados de campo foi o EM34 modelo XL da Geonics da UNIPAMPA, composto de duas bobinas, uma transmissora e

outra receptora, com distâncias entre bobinas de 10, 20 ou 40m. Para o levantamento de campo (Figura 35) foram realizados 8 levantamentos utilizando o cabo de 40m.

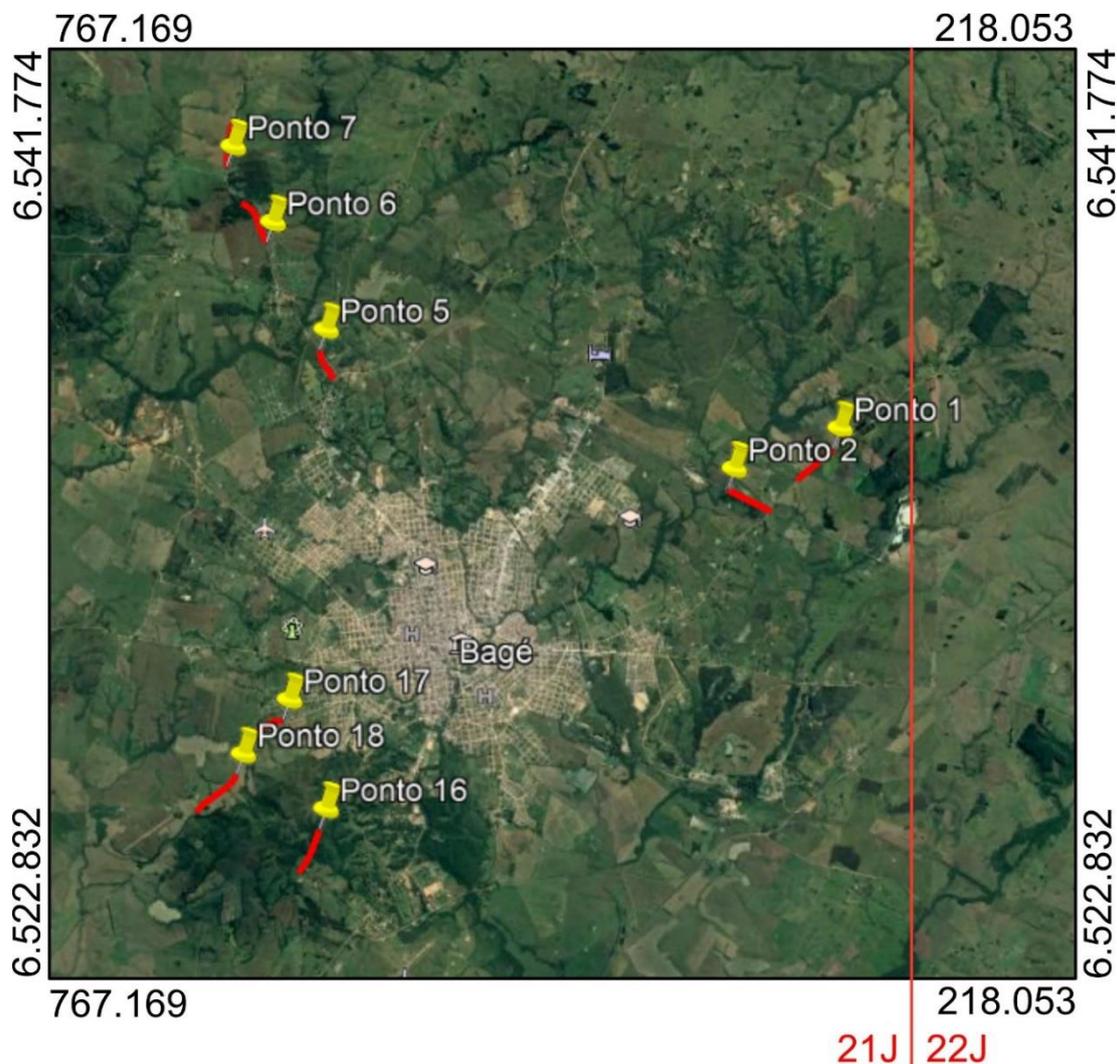


Figura 35: Localização dos levantamentos com relação a cidade de Bagé.

Cada comprimento de cabo apresenta uma frequência operacional (6,4 kHz - 10m; 1,6kHz – 20m e 0,4kHz - 40m), sendo que todos os comprimentos de cabo, distância entre bobinas, permite operar em dois modos: campo vertical (dipolos/bobinas horizontais) e campo horizontal (dipolo/bobinas verticais), conforme a Figura 36. As profundidades de investigação são estimadas conforme a Tabela 14.

Os dados de campo foram coletados com o equipamento EM-34 e utilizado na configuração do domínio da frequência, fonte induzida, com o cabo de 40m e

uma frequência de 400Hz. As coletas foram realizadas com as bobinas na posição vertical e horizontal, com profundidade de exploração, respectivamente, de 30 e 60m (Tabela 15).

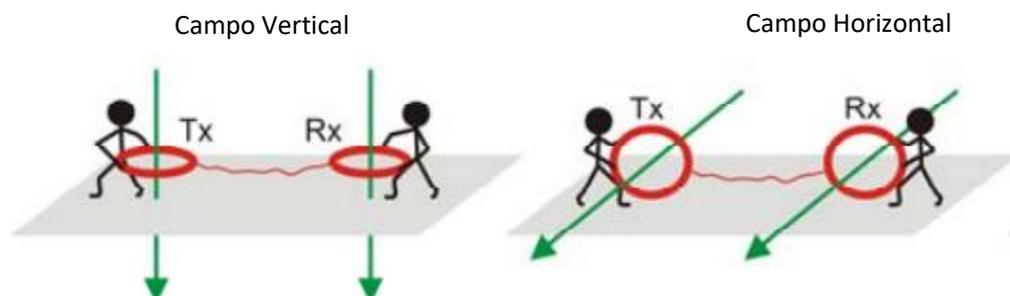


Figura 36: As duas configurações das antenas dipolares utilizadas em campo (adaptado de BORGES, 2007).

Tabela 14: Apresenta a relação distância entre bobinas e a profundidade nos Dipolos Horizontais e Verticais.

Distância entre bobinas	Profundidade Atingida	
	Dipolo Horizontal	Dipolo Vertical
10m	7,5m	15m
20m	15m	30m
40m	30m	60m

Tabela 15: Profundidades de exploração do EM-34 e o espaçamento entre bobinas.

Espaçamento entre Bobinas	Posição	Profundidade de Exploração
40	Vertical	30m
40	Horizontal	60m

4.8 Modelo Hidrogeológico Conceitual do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino da Região de Bagé

O modelo hidrogeológico foi elaborado a partir da integração dos dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos, obtidos com o desenvolvimento das etapas anteriores. Com base na avaliação da compartimentação hidrogeológica foram avaliadas em cada compartimento as características estruturais, hidrolíticas. Os dados geofísicos dos levantamentos de campo foram cruzados com os dados do traçado de lineamentos SRTM e os lineamentos aeromagnéticos, que permitiram identificar as principais estruturas condicionadoras do fluxo de água subterrânea.

A representação do modelo foi realizada com uso de mapas e perfis, sendo que estes representam as principais estruturas condicionadoras da ocorrência de água e dos caminhos preferenciais de circulação de água.

Também foi elaborado um mapa de favorabilidade de ocorrência de águas subterrâneas, com base no modelo hidrogeológico para a área de estudo.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos relacionados com a identificação e análise de lineamentos, avaliação do arcabouço magnético e estrutural, análise estrutural de superfície e integração com dados de subsuperfície, avaliação hidrogeológica e da compartimentação do sistema aquífero embasamento cristalino.

5.1 Identificação e Análise de Lineamentos

Na interpretação dos lineamentos, no mapa em escala 1:1.000.000 (Figura 37), foram identificados 57 morfoestruturas, que ocorrem com direções Norte-Sul e NE preferencialmente (N20-40E), com ocorrências secundárias NNE (N0-10E) e NW (N30-40W e N60-70W). Assim foi possível observar que ocorrem 14 lineamentos na área de estudo com aproximadamente 10 a 30km, com predomínio na direção NE e 5 lineamentos principais com extensões variando de aproximadamente 9 a 30 km, sendo estes concordantes ou encaixados em vales. No mapa de lineamentos, na escala 1:500.000 (Figura 38), foi possível identificar 97 morfoestruturas com maior destaque para NE (N30-50E), de ENE (N70-80E), com ocorrências secundárias NNW (N0-20W) e NW (N50-70W).

Na interpretação do mapa em escala 1:250.000 (Figura 39) foram marcados cerca de 260 lineamentos morfoestruturais. Foi possível observar uma maior dispersão das direções de lineamentos, diferentemente dos mapas anteriores, além do predomínio ENE (N70-90E) e NE (N40-60E), também ocorrem com grande destaque as direções NNW (N10-20W) e NW (N50-70W).

No mapa na escala 1:100.000 (Figura 40) foram marcados cerca de 2324 lineamentos morfoestruturais com direção preferencial NE. As direções preferenciais são N10-20E, N30-40E e N70-80E e comprimento médio de 1,308 km e predomínio das direções para nordeste.

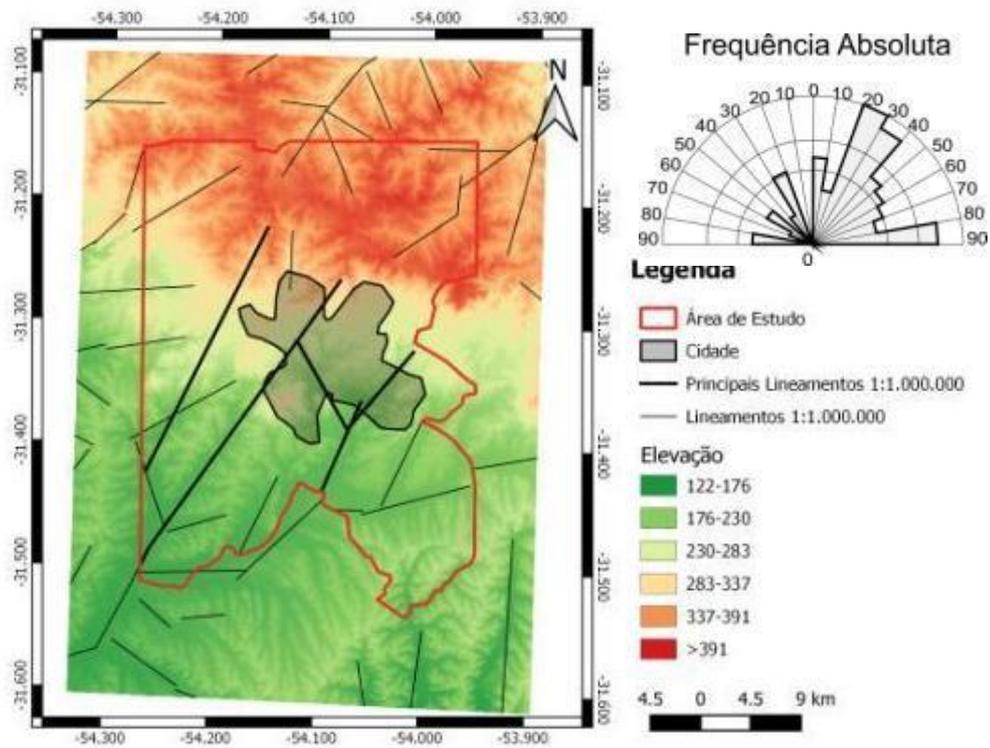


Figura 37: Mapa de lineamentos interpretados na escala 1:1.000.000.

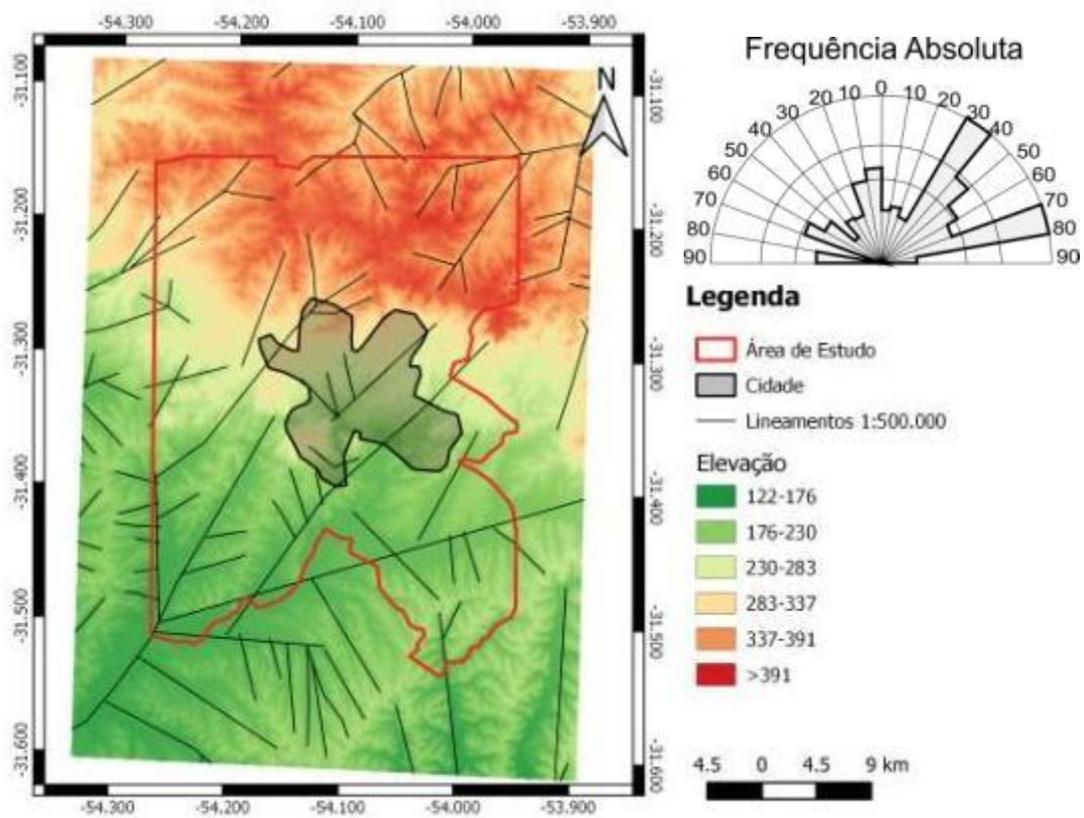


Figura 38: Mapa de lineamentos interpretados na escala 1:500.000.

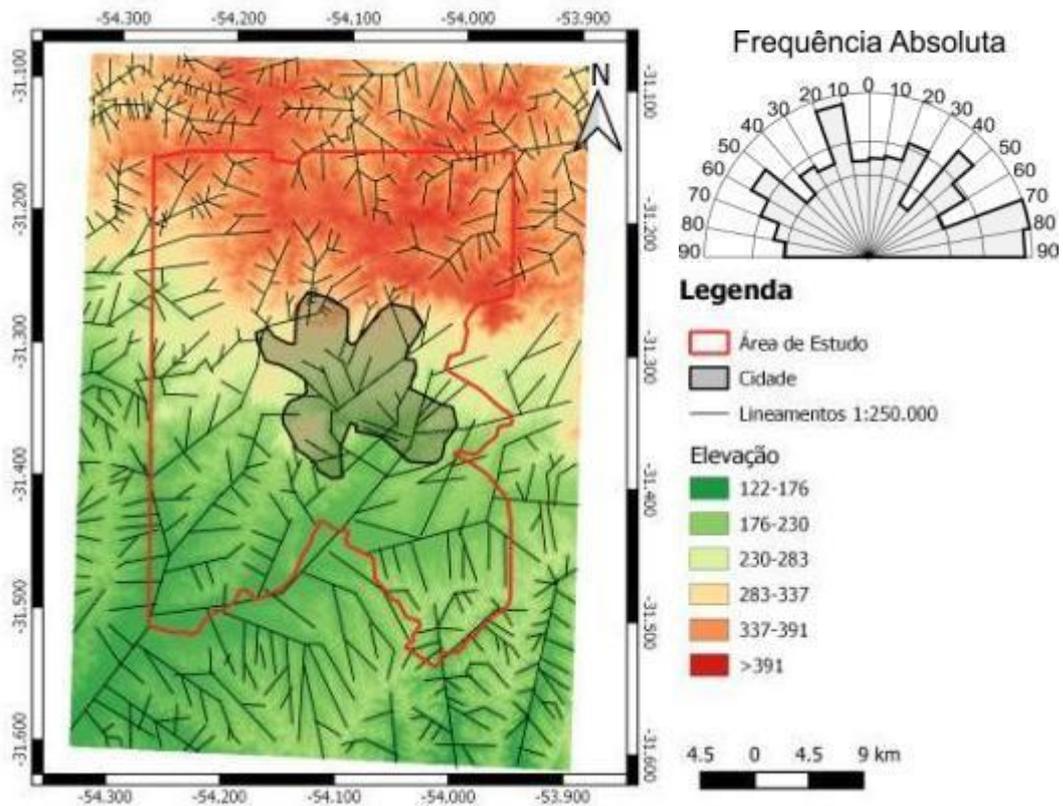


Figura 39: Mapa de lineamentos interpretados na escala 1:250.000.

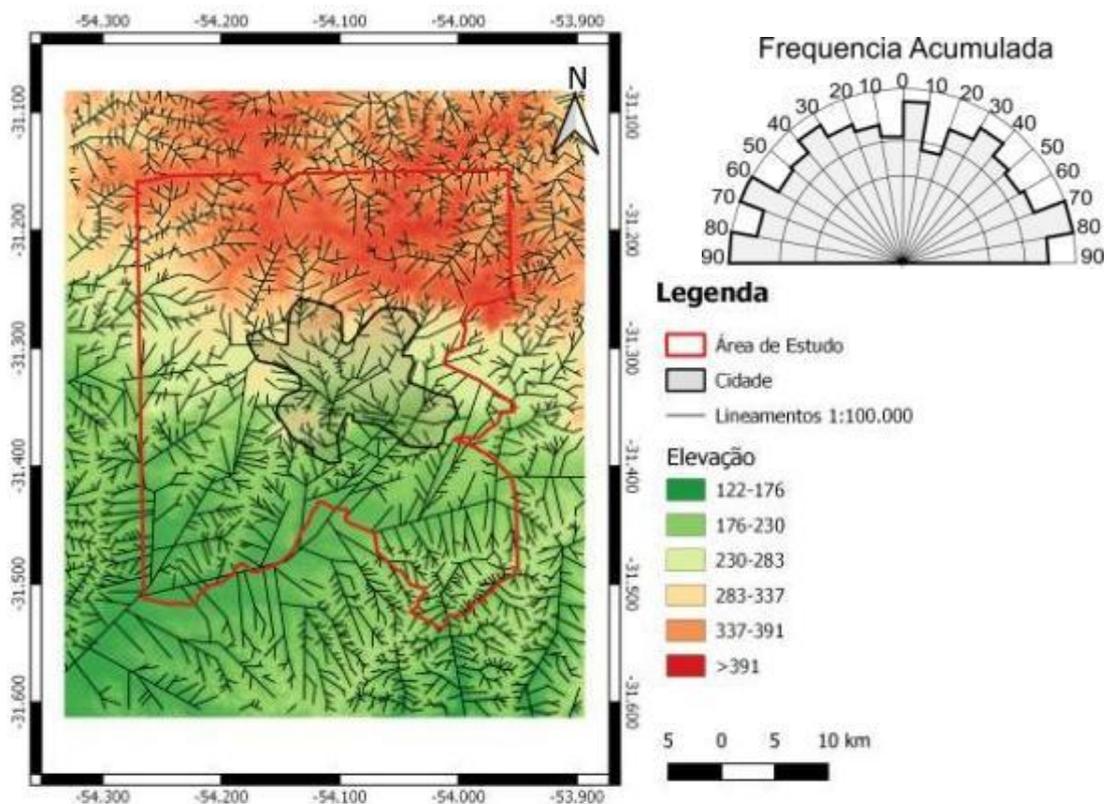


Figura 40: Mapa de lineamentos interpretados na escala 1:100.000.

No mapa na escala 1:50.000 (Figura 41) foram marcados cerca de 5821 lineamentos estruturais, com direção preferencial NE e NW. As direções preferenciais, nestas direções gerais, são N80-90E, N80-90W e N70-80E e comprimento médio de 0,811 km e predomínio das direções para nordeste.

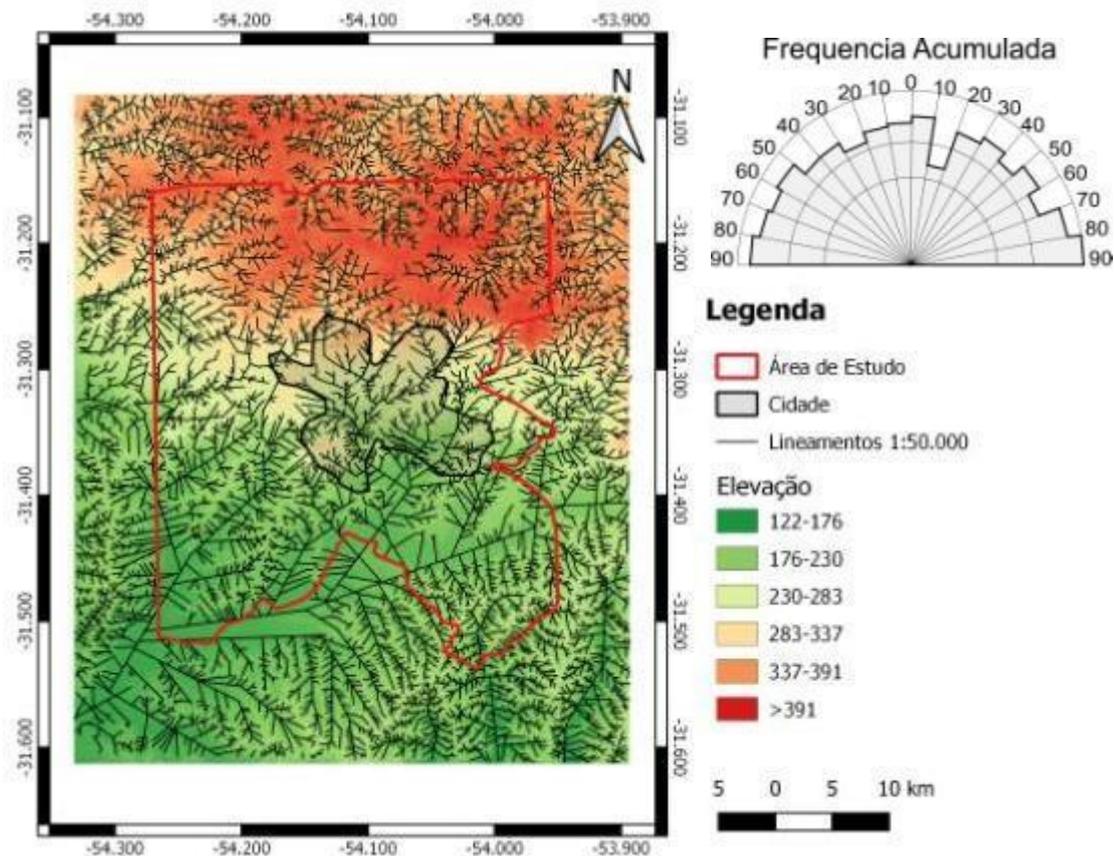


Figura 41: Mapa de lineamentos interpretados na escala 1:50.000.

A maior tendência, ou picos, nas direções dos lineamentos interpretados é para NE, mas com quantidades de lineamentos nas escalas de detalhe para a direção NW. Na escala 1:50.000 ocorre quase uma homogeneidade nas quantidades de lineamentos nas duas direções.

5.2 Arcabouço Magnético-Estrutural

Nos mapas de realce dos dados aeromagnéticos foram identificados um total de 6.463 lineamentos, para a área de estudo.

Os mapas resultantes da utilização dos métodos de realce destacaram as estruturas regionais magnéticas-estruturais são apresentados na escala

1:430.000. Os resultados dos mapas estão apresentados na Tabela 16 e nas Figura 42 a Figura 55.

Tabela 16: Resultados da interpretação dos lineamentos dos mapas aeromagnéticos.

Mapa	Número de Lineamentos Interpretados	Principais Orientações
MAGIGRF	365	N80-90W, N60-70W e N60-70E
POLO	58	N60-70W, N80-90E e N60-70E
Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	246	N60-70W, N60-70E e N50-60E
Inclinação do Sinal Analítico (ISA)	848	N80-90W, N60-70W, N50-60W, N60-70E e N80-80E
Gradiente Horizontal em X (GX)	179	N30-40E, N40-50E e N50-60W
Gradiente Horizontal em Y (GY)	215	N60-70W, N60-70E e N70-80W
Gradiente Vertical em Z (GZ)	246	N60-70W, N60-70E e N70-80E
Gradiente Horizontal Total (GHT)	282	N50-60E, N70-80W e N60-70W
Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA_GHT)	846	N80-90W, N60-70E e N70-80E
Inclinação do Gradiente Horizontal Total (IGHT)	1070	N80-90W, N60-70E e N80-90E
Theta Map	780	N60-70E, N50-60E e N70-80E
Signal Transform (ST)	697	N80-90E, N50-60E, N80-90W e N60-70W
ISA+IGHT	247	N60-70W, N80-90E e N70-80E
ISA-IGHT	384	N60-70W, N80-90W e N50-60E

As estruturas denominadas de “Inferidas” correspondem as feições magnéticas fora do intervalo de valores máximos, mas que apresentavam continuidade. Também foi Inferida uma grande estrutura cortando e gerando descontinuidade das principais estruturas magnéticas na direção NW-SE, sendo interpretada como uma possível estrutura transcorrente (Figura 42), interceptada por estrutura regional e produzindo deslocamento lateral do lineamento interpretado.

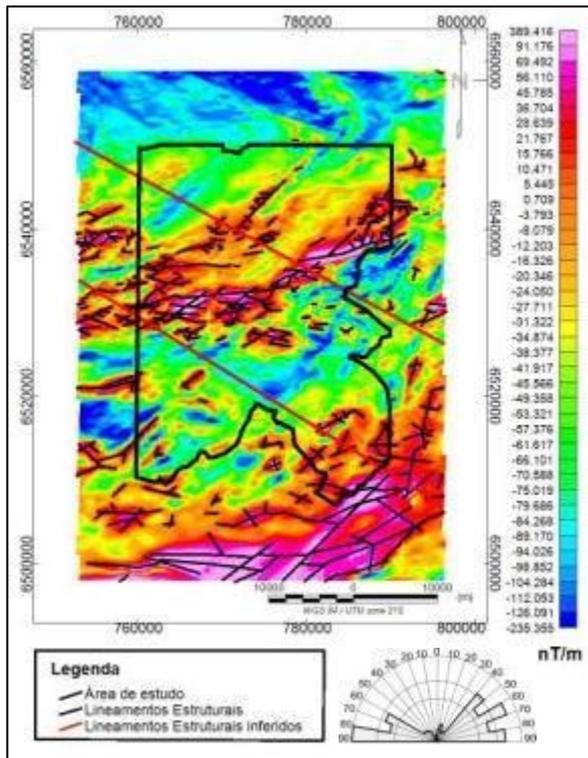


Figura 42: Mapa MAGIGRF com o traçado dos lineamentos magnéticos

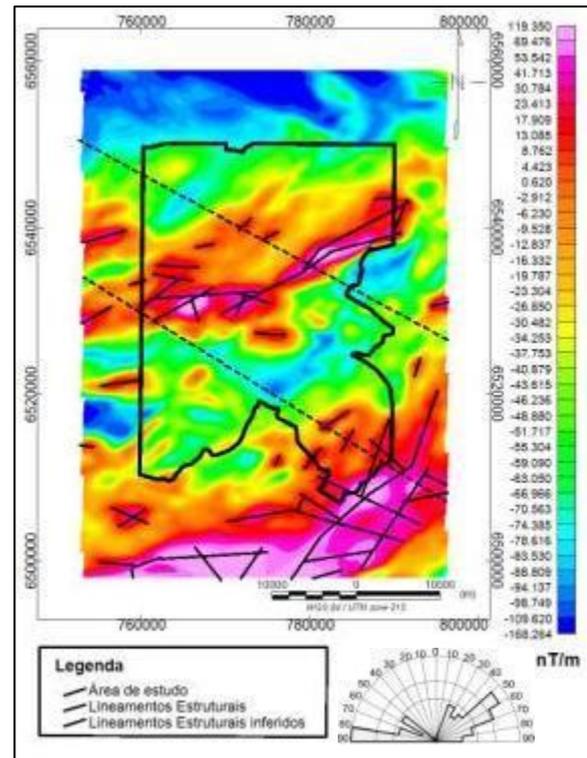


Figura 43: Mapa POLO com continuação para cima de 500m com o traçado dos lineamentos magnéticos

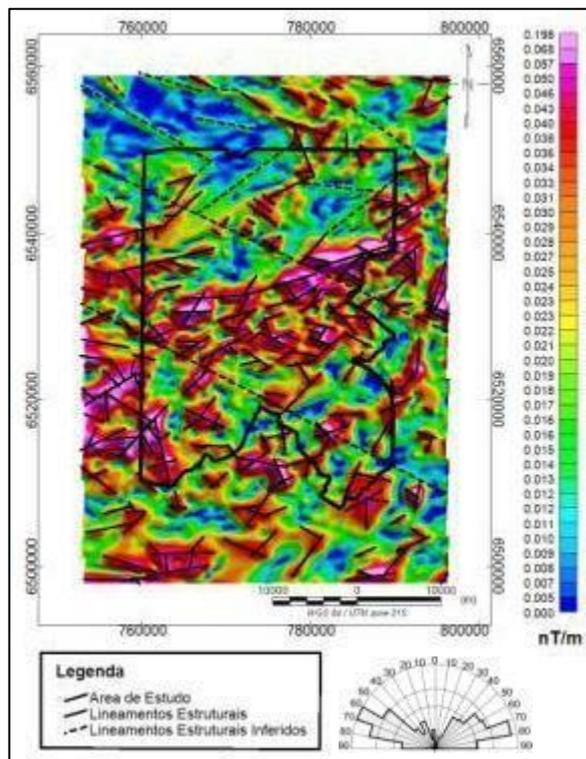


Figura 44: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

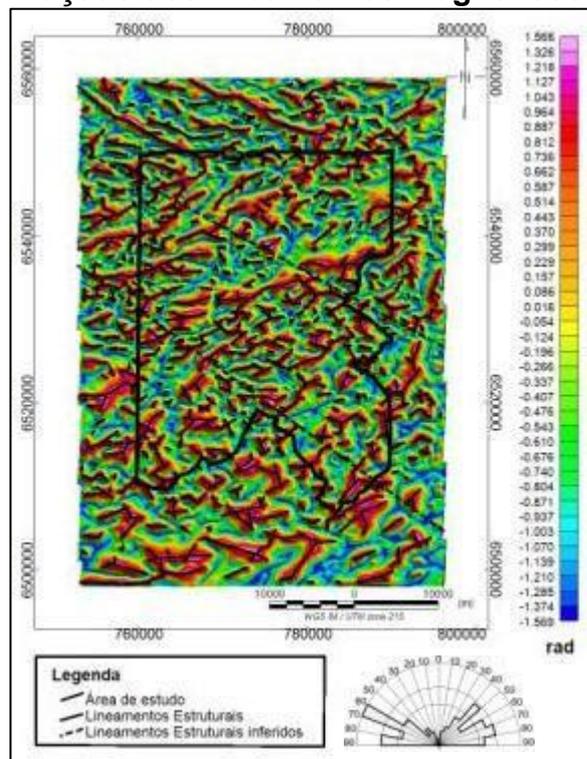


Figura 45: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ISA) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

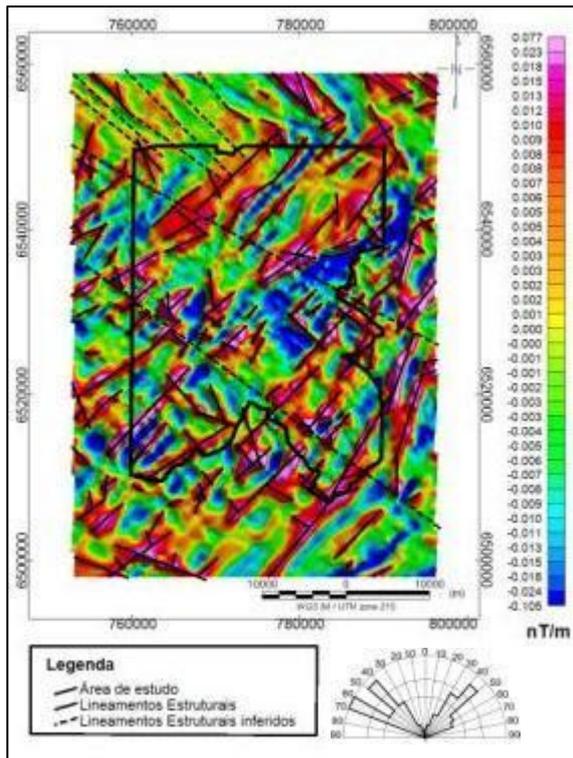


Figura 46: Mapa do Gradiente Horizontal em X (GX) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

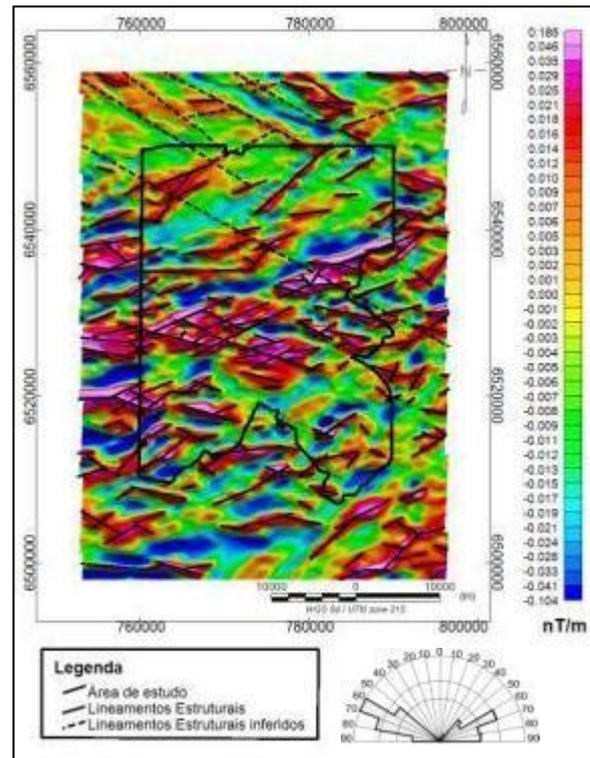


Figura 47: Mapa do Gradiente Horizontal em Y (GY) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

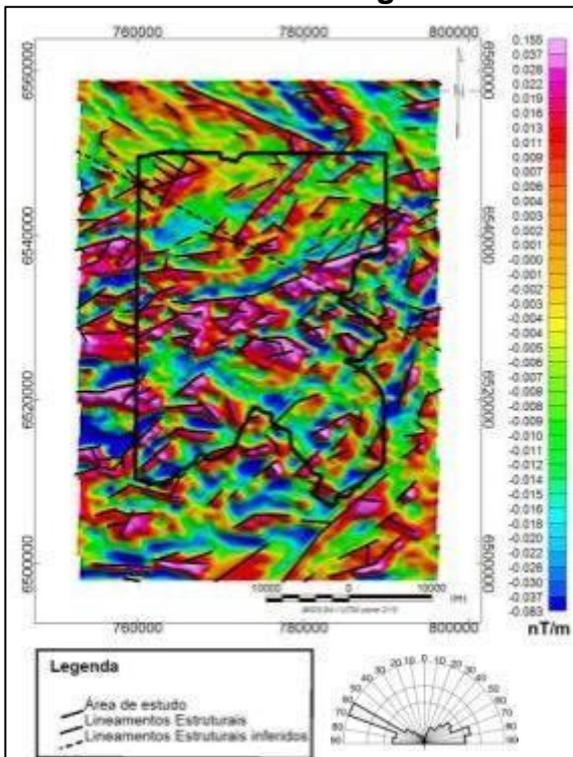


Figura 48: Mapa do Gradiente Vertical em Z (GZ) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

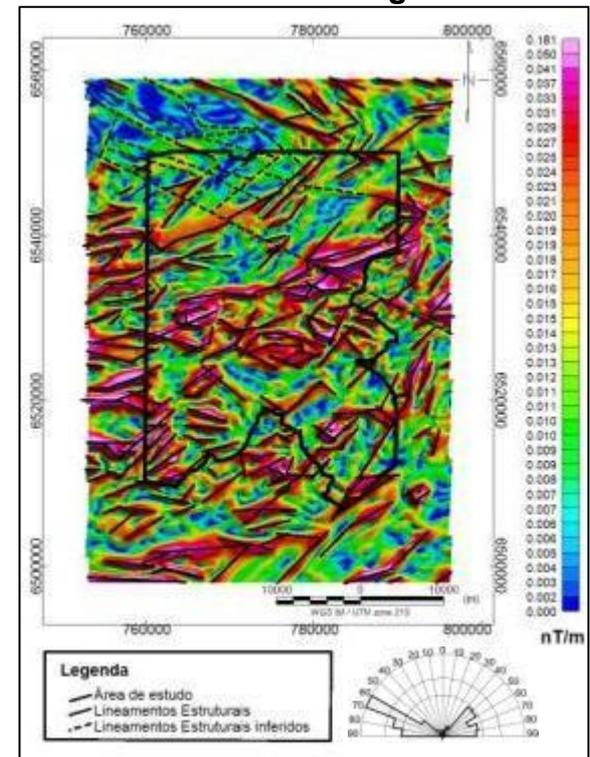


Figura 49: Mapa do Gradiente Horizontal Total (GHT) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

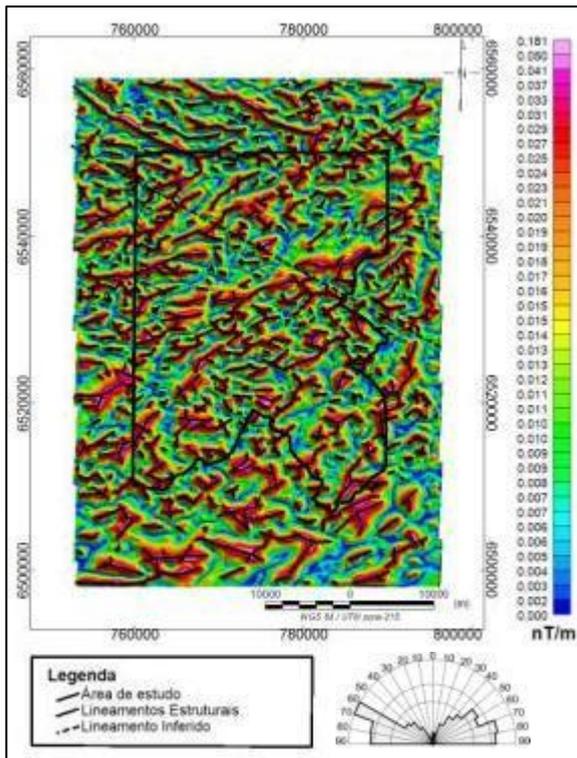


Figura 50: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA_GHT) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

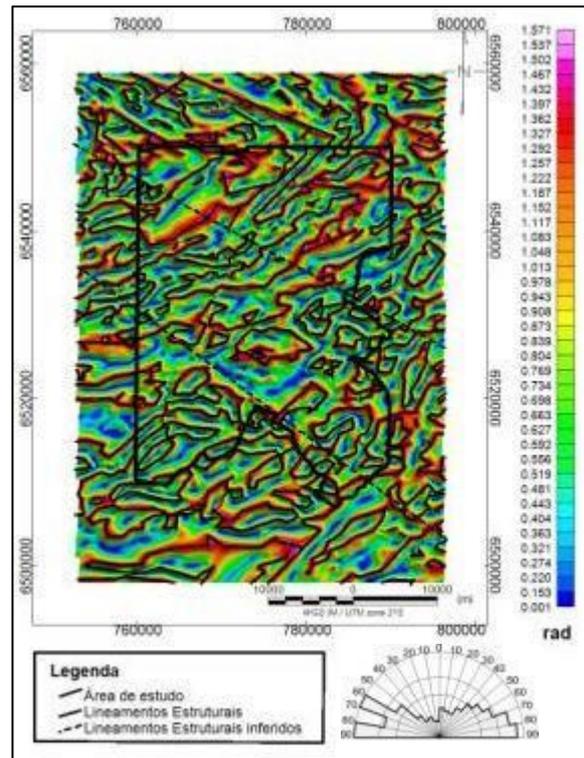


Figura 51: Mapa da Inclinação do Gradiente Horizontal Total (IGHT) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

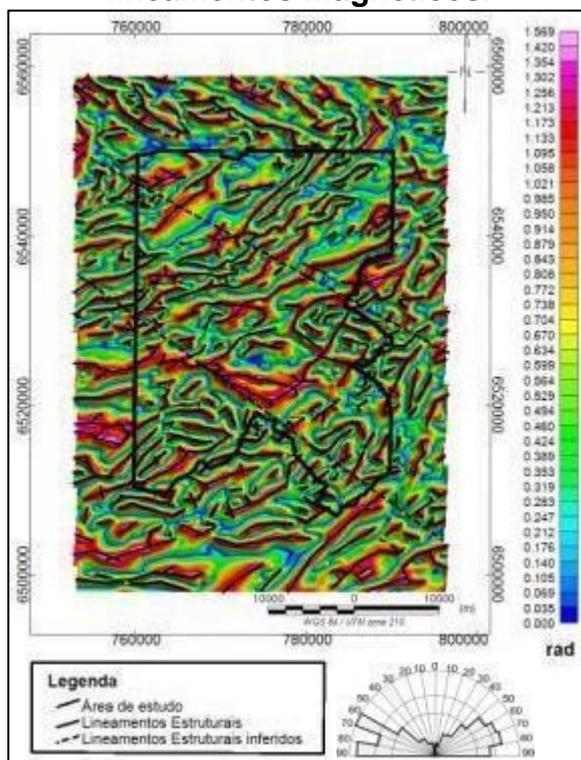


Figura 52: Mapa THETA MAP com o traçado dos lineamentos magnéticos.

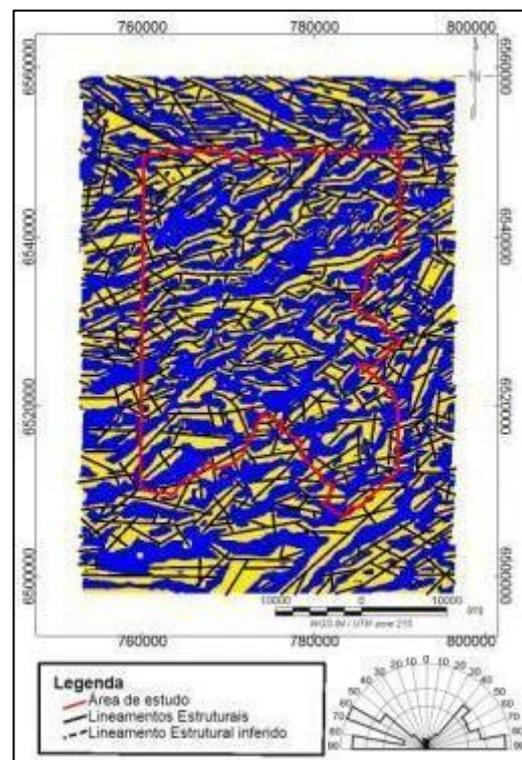


Figura 53: Mapa do Signal Transform (ST) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

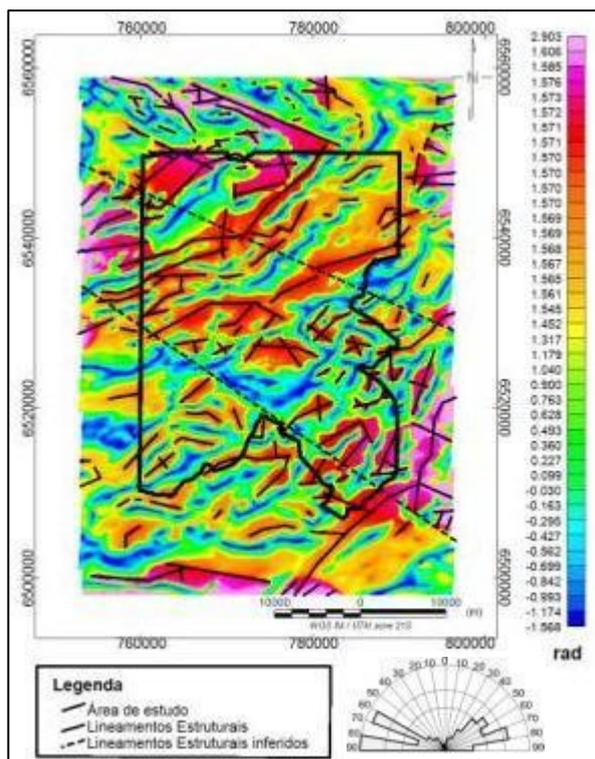


Figura 54: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico Somado a Inclinação do Gradiente Total (ISA+IGHT) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

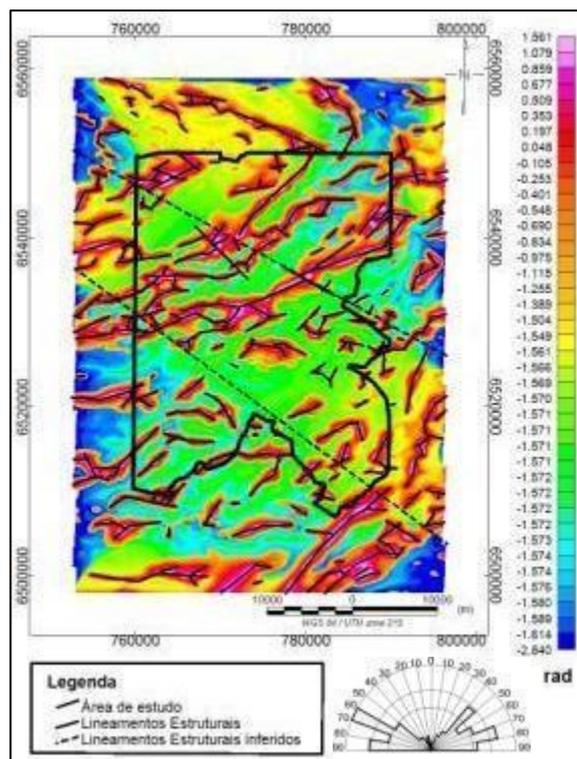


Figura 55: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico Subtraído da Inclinação do Gradiente Total (ISA-IGHT) com o traçado dos lineamentos magnéticos.

De forma geral, a integração e construção de um mapa com os diversos lineamentos e realçado pela utilização do Mapa GZ, interpretados em todos os mapas de realce, foram sintetizados na Figura 56. Fica evidente a distribuição homogênea nas estruturas na direção NE e NW.

O método da deconvolução de Euler, também (Figura 57), permitiu estimar a profundidade do topo das principais fontes magnéticas. Assim, a comparação com os mapas gerados permitiu uma interpretação regional lineamentos magnéticos, estes associados às estruturas em subsuperfície, mapas aeromagnéticos, e subsuperfície, lineamentos estruturais nas imagens SRTM, que compõem o arcabouço do sistema aquífero da área de estudo.

O método da deconvolução de Euler foi relacionado com os lineamentos magnéticos do *Grid ASA* (Figura 57), pois este mostra uma visualização mais clara e auxiliando na interpretação das profundidades do topo das fontes magnéticas. É possível interpretar uma associação das principais estruturas em subsuperfície que compõe o arcabouço estrutural da área de estudo, e fica

evidente uma maior quantidade de estruturas passíveis de se comportar como aquífero ou como limitante da circulação da água em subsuperfície.

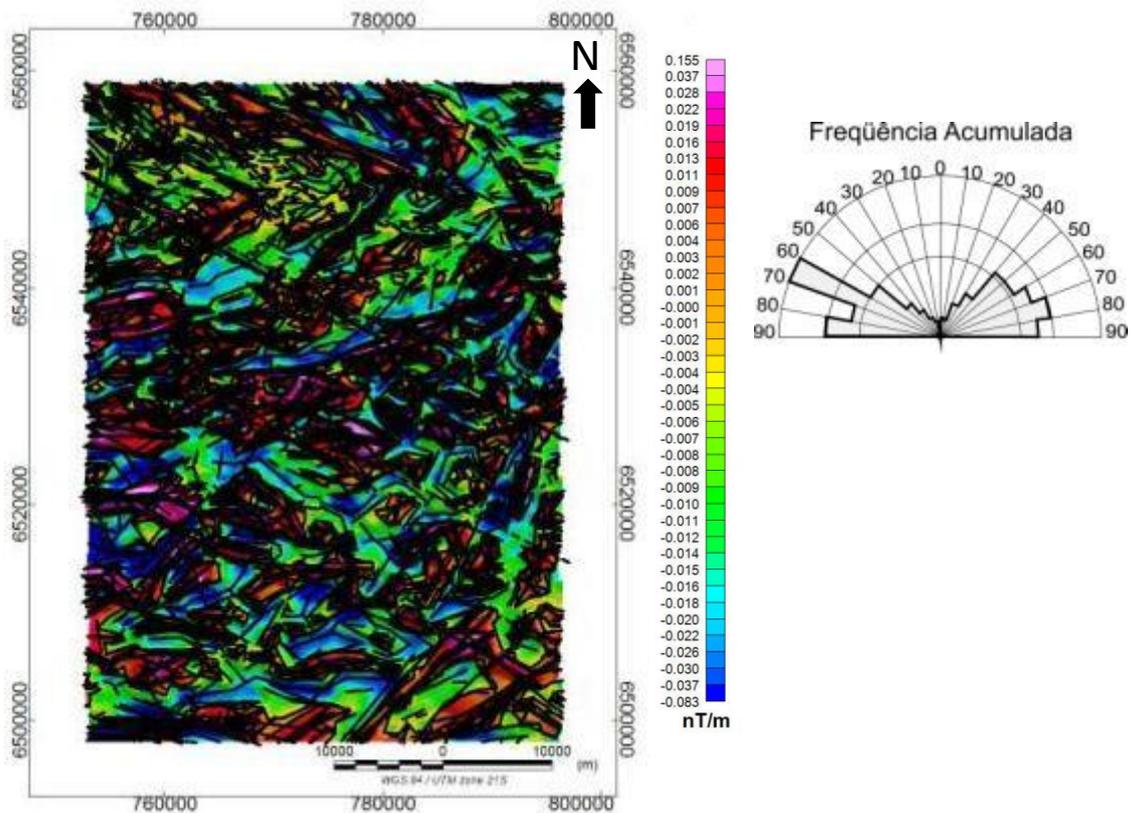


FIGURA 56: Mapa do Arcabouço magnético/estrutural geral sobre o mapa da Derivada Vertical para a área de estudo.

O método de Deconvolução de Euler permitiu observar uma heterogeneidade das profundidades, de 55 a 717m, distribuídas por toda a área de estudo, não ficando específica uma concentração ou anomalia significativa nas morfoestruturas (Figura 57). O mapa da Deconvolução de Euler apresenta uma correlação positiva em relação aos lineamentos interpretados, aeromagnéticos, SRTM ou da bibliografia, confirmando a sua existência e posição.

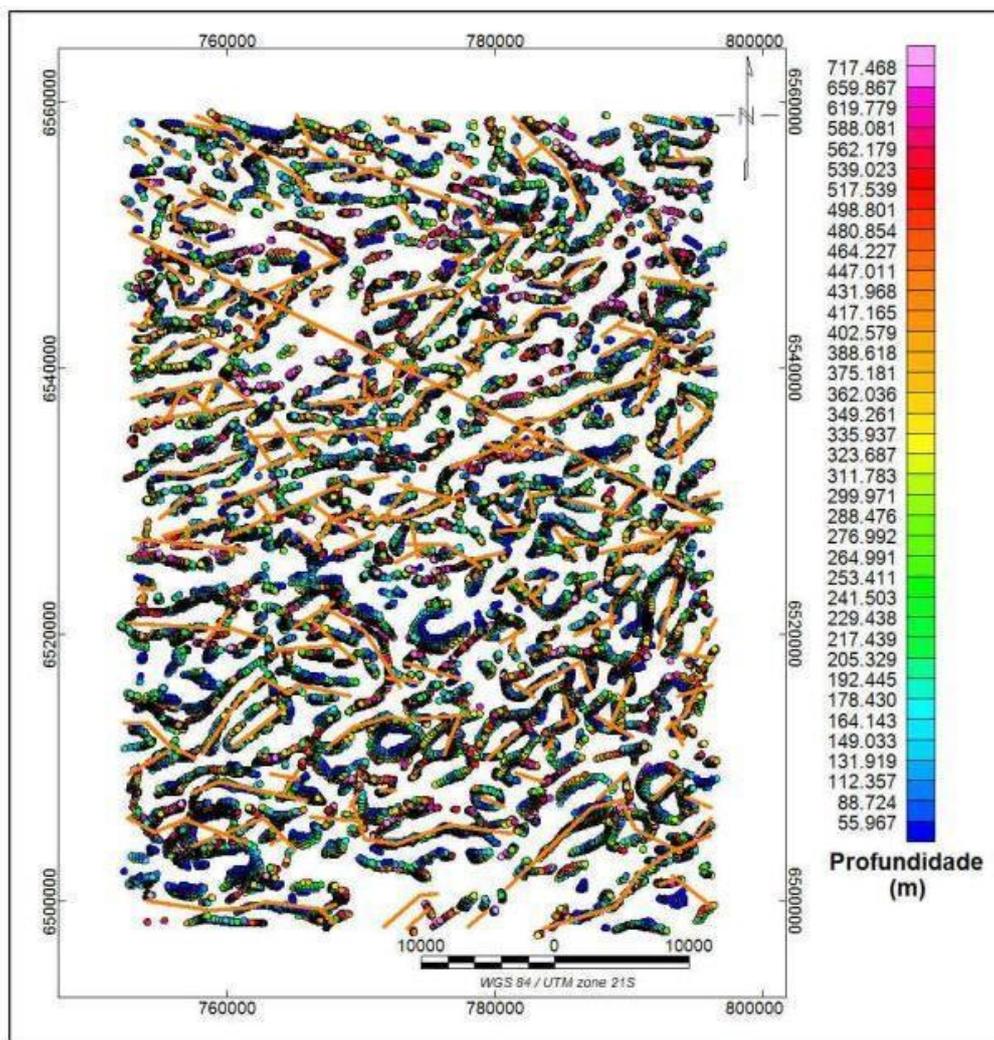


Figura 57: Deconvolução de Euler relacionado com os lineamentos magnéticos do Grid ASA para a área de estudo.

5.3 Análise Estrutural da Superfície e Integração de Dados de Subsuperfície

A análise estrutural de superfície e integração com os dados de subsuperfície foi realizada com a interpretação dos lineamentos das imagens SRTM na escala 1:500.000, das morfoestruturas e sobre os diversos processamentos dos dados aerogeofísicos, mapas ASA e GZ. A seguir, as informações integradas são apresentadas em um mapa passível de interpretação e a comparação entre os dois métodos, ilustrado por diagrama de rosetas (Figura 58) e o mapa das zonas interpretadas (Figura 59).

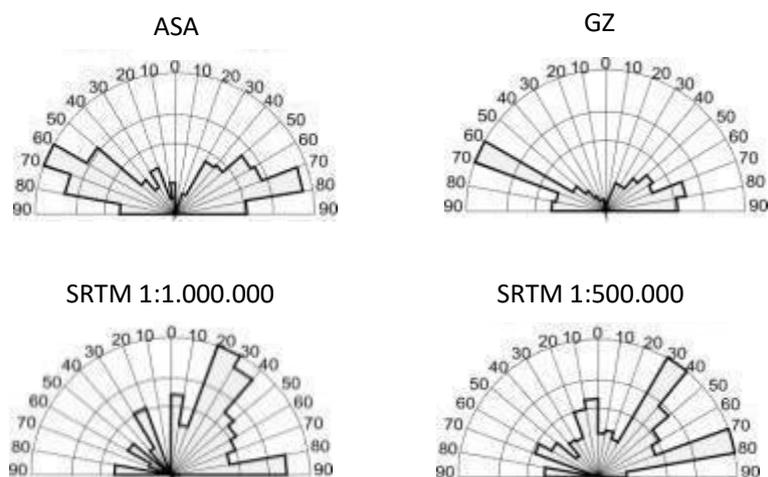
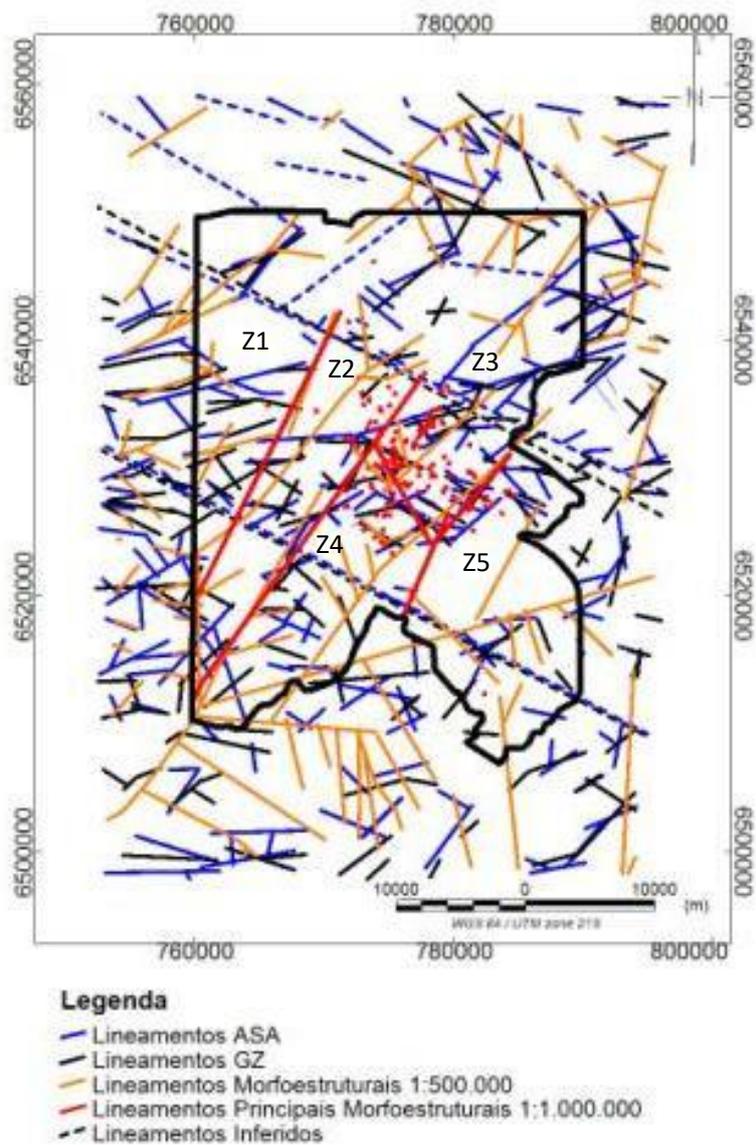


Figura 58 – Mapa da análise dos lineamentos de superfície, SRTM, integração com os lineamentos de subsuperfície, dados aeromagnéticos, diagramas de frequência absoluta e os poços (pontos vermelhos).

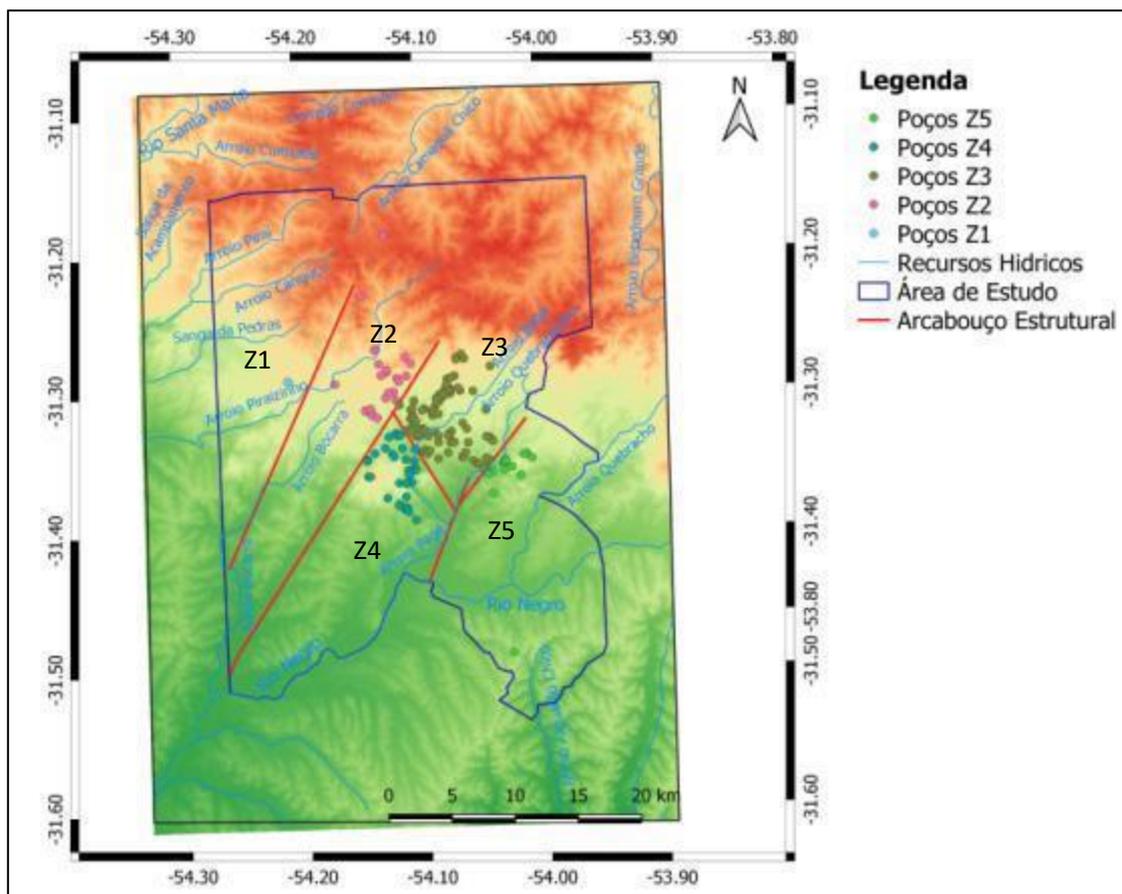


Figura 59: Mapa das Zonas Estruturais feitos com base na análise de lineamentos.

Ambos os produtos apresentam predomínio de estruturas na direção NE, o que revela que esta é a principal direção estrutural na área de estudo. Nos mapas magnéticos foi reconhecido um maior número de estruturas, bem como um maior número de estruturas na direção NW em comparação com os dados SRTM. Desta forma, para esta escala analisada os produtos aeromagnéticos gerados se mostram mais eficientes do que o SRTM.

5.4 Análise Hidrogeológica

A análise hidrogeológica foi realizada com base no banco de dados dos poços montado a partir das informações disponíveis e sintetizados na Tabela 17, assim apresentando o comportamento geral do sistema aquífero.

Tabela 17: Caracterização geral da área de estudo com base nos dados dos poços.

5.4.1.1.1	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Desvio Padrão
Profundidade Final (m)	200	15	75,12	71,50	34,81
Nível Estático (m)	80	0	8,56	6,55	9,09
Profundidade das entradas de água (m)	45	15	29,63	25,50	10,95
Número de entradas de água	5	1	2,17	2,00	1,17
Capacidade Específica (m ³ /h/m)	13,64	0,01	0,724	0,16	1,94
Vazão (m ³ /h)	30	0,13	4,122	2,90	4,27

Os poços apresentam profundidades que variam de 200 a 15m, com valor da mediana de 71,5m. O nível estático varia de 1 a 80m com mediana 6,55 m. As entradas d'água mais frequentes ocorrem no intervalo de 12 a 42m, podendo ocorrer, em menor frequência, a maiores profundidades entre 50 e 80m. O número de entradas d'água varia de 1 a 5 entradas, sendo a mais recorrente de 1 e a de menor frequência 5, com apenas 2 ocorrências. A profundidade de ocorrência dessas entradas está situada entre 15 e 45m, evidenciando que nessas profundidades há maior chance de ocorrência de estruturas abertas. Isso possui relação com a profundidade dos poços, pois tanto os valores de média (75,12m), como mediana (71,5m), estão próximos desses intervalos. Assim, poços mais profundos tem menos chance de interceptar estruturas, por isso são menos frequentes na região.

A análise dos dados das entradas de água evidencia que a água que circula pelos aquíferos fraturados, na área de estudo, está localizado na porção mediana dos poços, conforme pode ser observado nos valores de média (29,63m) e mediana (25,50m).

A avaliação dos dados gerais de capacidade específica, indica a ocorrência de valores muito diferentes, com variação entre 0,01 a 13,64 m³/h/m. Essa variação acaba tendo reflexo nos valores de média e desvio padrão, por isso a mediana acaba refletindo melhor a produtividade do aquífero. Além disso, deve-

se destacar que essa variação encontrada para os parâmetros estatísticos, está relacionada com as condições anisotrópicas do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, pois dependendo dos tipos de estruturas (orientação, comprimento, densidade, conexão, entre outras características), haverá diferentes capacidades de produção dos poços. No entanto, valores baixos de capacidade específica, para aquíferos fraturados associados a rochas graníticas, já foram identificados em diferentes estudos, como os realizados por Fernandes (2008), Machado e Freitas (2005), Gofferman et al. (2015).

5.5 Análise das Unidades Hidrolitológica

Para essa análise foi gerado o mapa de unidades hidrolitológicas (Figura 60) que foi cruzado com os dados de poços apresentados na Tabela 18.

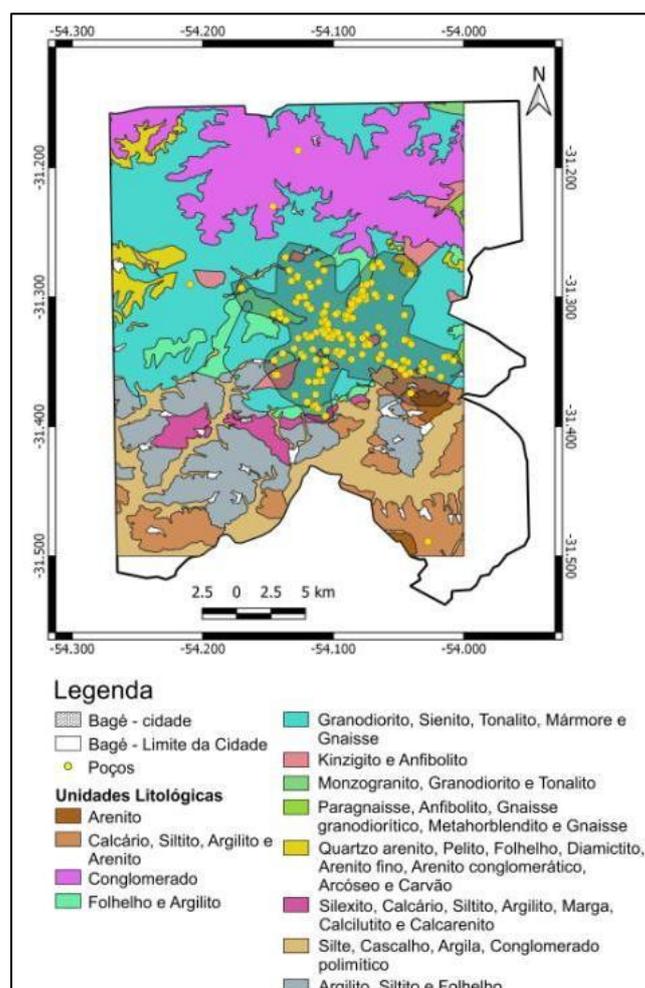


Figura 60: Mapa litológico simplificado utilizado na correlação com a produção dos poços.

Tabela 18: Produtividade dos poços das unidades hidrolíticas.

Unidades Hidrogeológicas	Mediana da Q/s (m ³ /h/m)	Número de Poços	Profundidade Mediana das Entradas de Água	Número de Poços com as entradas de água	Número de entradas de água	Mediana do número de entradas de água	Poços com descrição litológica
Granodiorito, Sienito, Tonalito, Mármore e Gnaiss	0,1620	148	33,5	16	27	1	148
Kinzigito e Anfibolito	0,4515	3	36	3	7	3	3
Folhelho e Argilito	0,1360	15	20	1	1	1	15
Calcário, Siltito, Argilito e Arenito	0,1390	4	19	2	7	3,5	4
Conglomerado	0,1515	2	-----	-----	-----	-----	2
Silexito, Calcário, Siltito, Argilito, Marga, Calcilutito e Calcarenito	-----	1	-----	1	1	-----	1
Quartzo arenito, Pelito, Folhelho, Diamictito, Arenito fino, Arenito conglomerático, Arcóseo e Carvão	-----	1	-----	-----	-----	-----	1

As rochas Granodiorito, Sienito, Tonalito, Mármore e Gnaiss comportam 148 poços (Tabela 18) e com uma produtividade mediana de 0,162 m³/h/m, mas com um valor acima da mediana geral do banco de dados, de 0,157 m³/h/m. A mediana do número de entradas d'água é de 1, igual a mediana dos Folhelho e Argilito e Silexito, Calcário, Siltito, Argilito, Marga, Calcilutito e Calcarenito.

As rochas Kinzigito e Anfibolito comportam 3 poços (Tabela 18) e com uma produtividade mediana de 0,4515 m³/h/m, mas com um valor acima da mediana geral do banco de dados. A mediana do número de entradas d'água é de 3, a segunda maior atrás apenas dos Calcário, Siltito, Argilito e Arenito com 3,5.

As rochas Folhelho e Argilito comportam 15 poços (Tabela 18) e com uma produtividade mediana de 0,1360 m³/h/m, mas com um valor acima da mediana geral do banco de dados e com mediana do número de entradas d'água sendo de 1.

As rochas Calcário, Siltito, Argilito e Arenito comportam 4 poços (Tabela 18) e com uma produtividade mediana de $0,1390 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, mas com um valor acima da mediana geral do banco de dados e com mediana do número de entradas d'água é de 3,5.

As rochas Conglomeráticas, comportam 2 poços (Tabela 18) e com uma produtividade mediana de $0,182 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, mas com um valor acima da mediana geral do banco de dados. Mas este valor é referente a apenas o dado de um dos poços, com isso, estatisticamente irrelevante para a análise hidrolitológica da área de estudo.

As rochas Silexito, Calcário, Siltito, Argilito, Marga, Calcilito e Calcarenito, comportam 1 poço (Tabela 18) e com uma produtividade mediana de $0,0420 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, mas com um valor abaixo da mediana geral do banco de dados e com mediana do número de entradas d'água é de 1.

As rochas Quartzo arenito, Pelito, Folhelho, Diamictito, Arenito fino, Arenito conglomerático, Arcóseo e Carvão comportam 1 poço (Tabela 18).

A unidade de rochas Granodiorito, Sienito, Tonalito, Mármore e Gnaisse, que engloba a maiores números de poços, apresenta valores de capacidade específica variáveis, com áreas com ocorrência de valores elevados. Assim, evidencia-se que as estruturas associadas as litologias é que possuem maior importância e que vão definir as regiões que apresentam maior ou menor produtividade, também as discontinuidades e os contatos litológicos.

Na possibilidade de ser realizado um mapeamento geológico de detalhe, se poderia fazer uma melhor avaliação do comportamento hidrogeológico das unidades geológicas.

5.6 Compartimentação Estrutural

A partir da integração dos dados das imagens SRTM e dos dados aeromagnéticos foi possível evidenciar a compartimentação estrutural da área de estudo, como resultado da interpretação dos lineamentos de médio e grande porte. Essa compartimentação foi definida com base nos lineamentos

interpretados na escala 1:1.000.000, com isso dividindo a área em blocos denominados de zonas: Z1, Z2, Z3, Z4 e Z5 (Figura 61).

A caracterização de cada Zona Hidrogeológica é apresentada na Tabela 19, sintetizando as principais características estruturais (Figura 62).

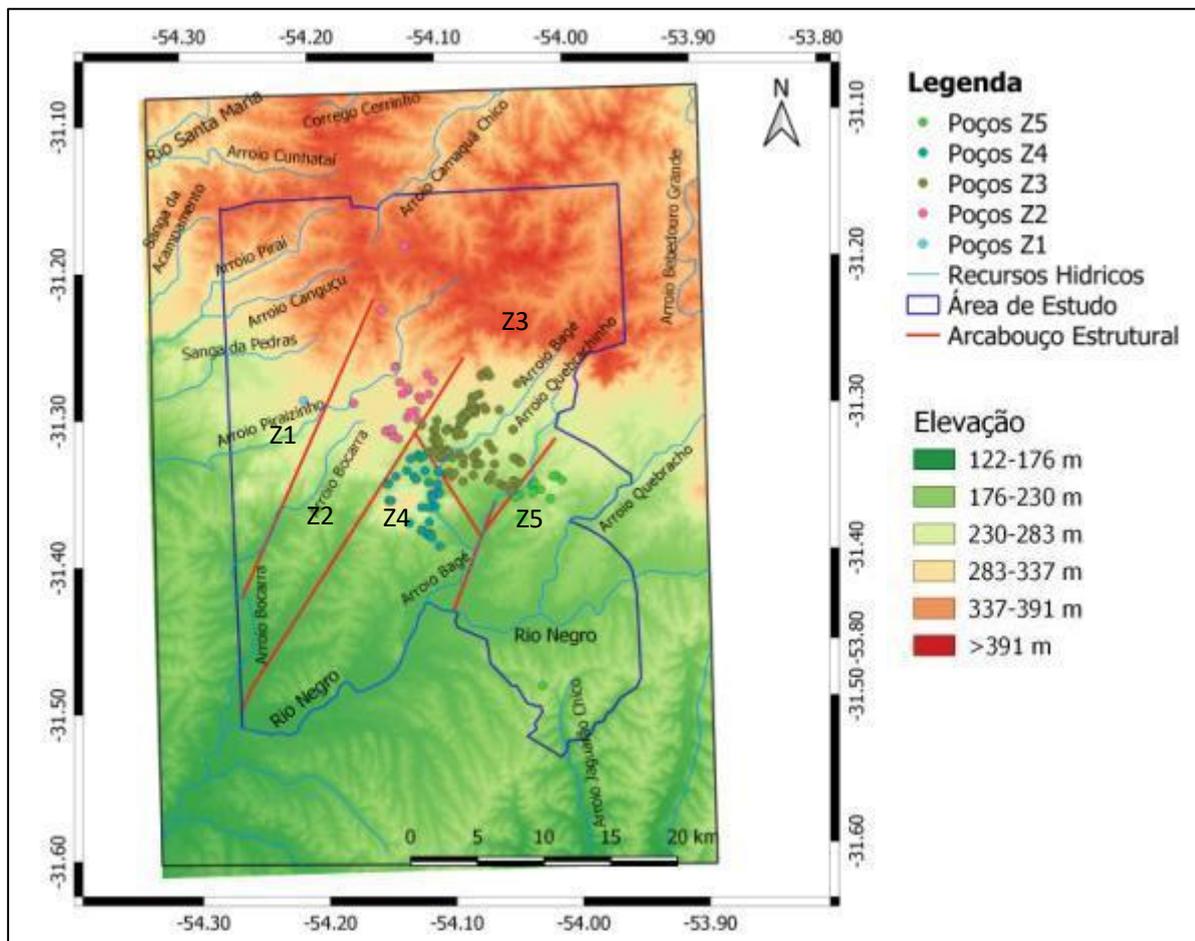


Figura 61: Mapa do arcabouço estrutural com as delimitações das zonas hidrogeológicas e dos recursos hídricos.

Tabela 19: Síntese das características de cada Zona

Zona	Porte Predominantes dos Lineamentos	Direção Predominante	Principais Trends
Z1	médio a pequeno	NE	N80-90E, N60-70E e N40-60E
Z2	médio	NE	N20-30E, N40-60E e N30-40E

Z3	médio e pequeno	NE	N50-60E, N30-50E e N50-60W
Z4	pequeno	NE	N70-80E, N20-30E e N80-90E
Z5	médio	NE e NNW	N70-80E, N20-30E e N00-10W

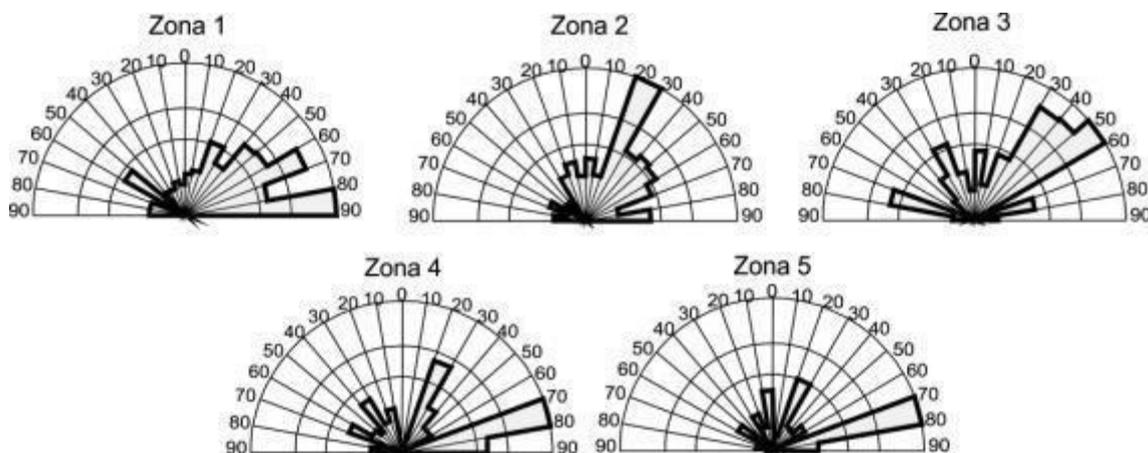


Figura 62: Diagramas de Roseta por zonas.

A análise das diferentes zonas permitiu a identificação das seguintes características:

1. **Zona 1:** caracteriza-se por lineamentos de médio a pequeno porte, em relação aos que compartimentaram a área de estudo, com predomínio na direção NE (Figura 62). Os principais *trends* para esta porção da área de estudo são N80-90E (12 lineamentos), N60-70E (7 lineamentos) e N50-60E (4 lineamentos).
2. **Zona 2:** apresenta uma maior quantidade de estruturas de médio porte em relação as de pequeno porte. Esta área apresenta direção preferencial das estruturas para NE, com os principais *trends* para N20-30E (5 lineamentos), N40-50E (6 lineamentos) e N50-60E (4 lineamentos).
3. **Zona 3:** apresenta uma homogeneidade nas estruturas de médio e pequeno porte, com predomínio para a direção geral NE. As direções preferenciais são N50-60E (12 lineamentos), N40-50E (9 lineamentos) e N30-40E (8 lineamentos).

4. **Zona 4:** composta por predomínio de lineamentos de pequeno porte, em relação aos de médio porte. Esta área tem direção geral principal para nordeste, com os principais *trends* para N70-80E (12 lineamentos), N20-30E (6 lineamentos) e N80-90E (5 lineamentos).
5. **Zona 5:** composto principalmente por lineamentos de médio porte e secundariamente de pequeno porte. Este compartimento apresenta predomínio da direção geral nordeste, mas com um pico na direção nortenoeste, com os principais *trends* para N70-80E (12 lineamentos), N20-30E (4 lineamentos) e N00-10W (3 lineamentos).

As zonas hidrogeológicas, definidas nas imagens SRTM, não coincidem diretamente com os produtos aeromagnéticos. Todavia, os lineamentos 1:1.000.000 apresentam relação com a estrutura inferida cisalhante identificada nos dados magnetométricos (Figura 63), evidenciando uma ruptura em sua continuidade.

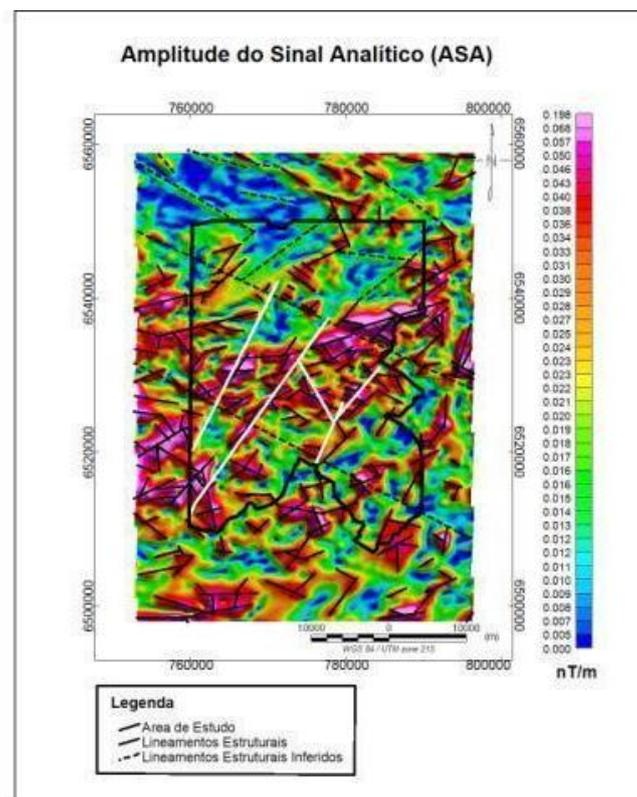


Figura 63: Mapa magnetométrico ASA com as estruturas inferidas e a relação com os lineamentos 1:1.000.000 (linhas brancas), da compartimentação.

5.7 Compartimentação Hidrogeológica

A compartimentação hidrogeológica foi realizada com base na avaliação de dados de poços que estão localizados em cada um dos compartimentos estruturais. Para isso foram avaliados os parâmetros capacidade específica e vazão, sendo os resultados apresentados nas tabelas Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 20: Caracterização da capacidade específica (m³/h/m) por Zonas

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Máximo	0,005	6,933	3	2,133	1,500
Mínimo	0,005	0,087	0,016	0,009	0,035
Média	0,005	1,298	0,411	0,424	0,556
Mediana	0,005	0,121	0,175	0,157	0,255
Desvio Padrão	-----	2,453	0,632	0,587	0,623
Número de Poços	1	23	100	36	14

Tabela 21: Caracterização da vazão (m³/h) por Zonas

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Máximo	0,460	16,50	20,37	12	30
Mínimo	0,460	1	0,002	0,580	0,800
Média	0,460	3,437	3,945	3,747	7,293
Mediana	0,460	2,400	2,9	3	3,250
Desvio Padrão	-----	3,277	3,845	2,778	8,974
Número de Poços	1	23	100	36	14

Do total de poços utilizados na área, 18% apresentam capacidade específica de 1 a 13 m³/h/m e 82% de 0,875 a 0,005 m³/h/m. Na Zona 1 ocorre apenas um poço com valor de capacidade específica de 0,005 m³/h/m. Considerando os valores da mediana, que não tem a influência gerada na média pelos máximos e mínimos, os maiores valores de capacidade específica ocorrem nas Zonas 5, 3 e 4 (Tabela 20).

Já para a vazão, ocorrem 70% dos poços com vazão entre 2 a 30 m³/h e 30% com valores entre 1,92 a 0.002 (Tabela 21). Na Zona 1 ocorre apenas um poço com valor de vazão de 0,46 m³/h. Conforme os valores da mediana, as maiores vazões ocorrem nas Zonas 5, 4 e 3.

5.8 Análise Hidrogeológica e Relação com a Compartimentação Estrutural

A avaliação hidrogeológica dos compartimentos estruturais foi realizada com base na avaliação do parâmetro capacidade específica (Tabela 22). A Zona 1, por conter dados de apenas um poço, não foi incluída na análise estatística.

Tabela 22: Caracterização da capacidade específica (m³/h/m) por Zonas

	Z2	Z3	Z4	Z5
Máximo	6,933	3	2,133	1,5
Mínimo	0,087	0,016	0,009	0,035
Média	1,298	0,411	0,424	0,556
Mediana	0,121	0,175	0,157	0,255
Desvio Padrão	2,453	0,632	0,587	0,623
Total de Poços	22	102	35	14

Conforme os dados expostos na tabela anterior, pode-se observar que as diferentes zonas apresentam comportamentos semelhantes com relação a capacidade específica. Se analisarmos os dados das médias, observa-se que a Zona 2 possui os maiores valores, seguido pela Zona 5 que apresenta um valor um pouco superior as Zonas 3 e 4.

Se avaliarmos a distribuição da frequência do parâmetro capacidade específica e relacionar com as zonas identificadas (Figura 64), é possível observar melhor o comportamento de cada uma das zonas. Observa-se que todas as zonas apresentam a maior distribuição da frequência para valores inferiores a 1m³/h/m, mas possuem comportamentos diferentes para intervalos superiores de capacidade específica. A zona 2 é a única que apresenta a ocorrência de valores de capacidade específica superiores a 3 m³/h/m. Para o intervalo de valores de 2 a 3 m³/h/m, a zona 2 continua apresentando a maior frequência, seguido pelas zonas 4 e 3. A zona 5, que apresentou valores de mediana um pouco mais elevados, só apresenta valores de capacidade específica para intervalos inferiores a 2m³/h/m.

Na zona 2 as morfoestruturas e lineamentos magnéticos, relacionados com os poços com maior capacidade específica (1,4 – 2,8 e 5,5 – 6,9 m³/h/m) apresentam as direções NE, para SRTM e o mapa ASA, bem como NW no mapa GZ. Estas com orientação principal para N30-40E.

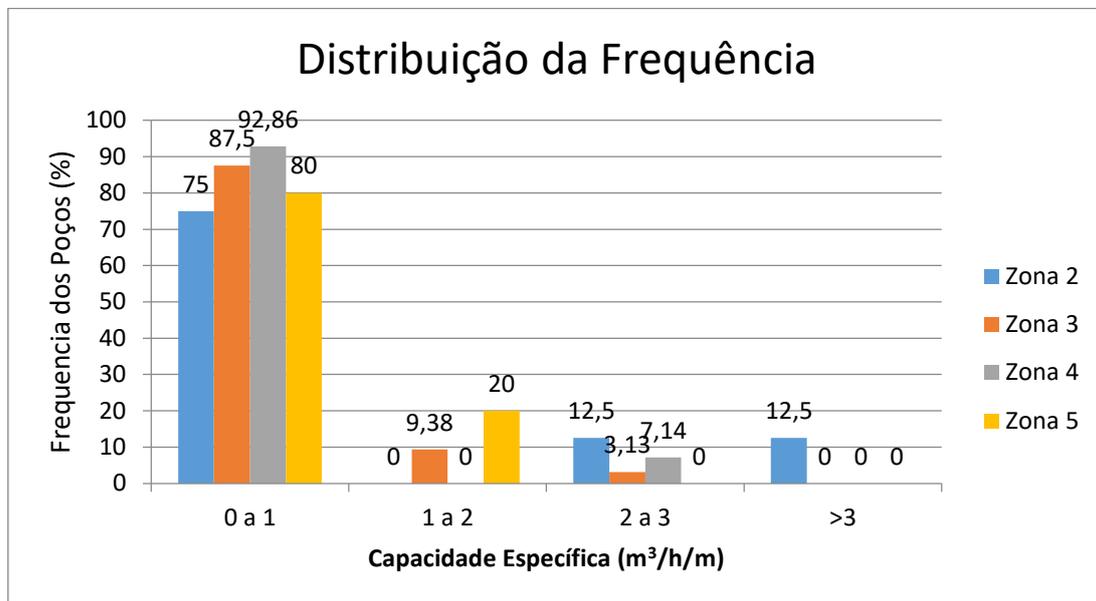


Figura 64: Gráfico da Distribuição da Frequência da produtividade dos poços utilizados no estudo.

A Figura 65 mostra a relação entre a capacidade específica e os lineamentos morfoestruturais e magnéticos, em cada uma das zonas.

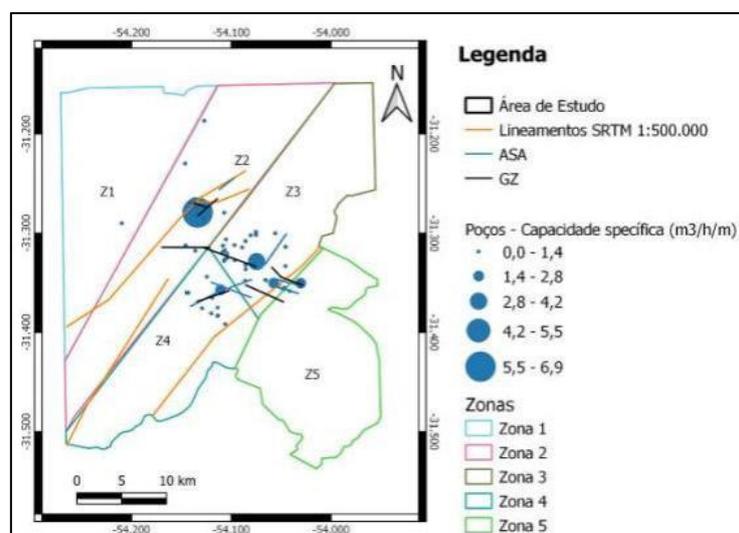


Figura 65 – Mapa de Lineamentos relacionados com os maiores valores de Capacidade Específica.

A zona 3 compreende a maior quantidade dos poços com capacidade específica variando de baixa a alta, onde é possível observar um lineamento morfoestrutural relacionado com os poços mais produtivos, na direção NE. Enquanto os lineamentos magnéticos apresentam dois ou mais lineamentos relacionados a esses poços, com 2 lineamentos para NW e um NE no mapa de ASA e três NW no mapa GZ. Estas com orientação principal para N60-70W.

A zona 4 apresenta um poço com capacidade específica relacionado com valor médio (1,4 – 2,8 m³/h/m), sendo que este ocorre relacionado apenas com os lineamentos magnéticos. Nos mapas magnéticos foram identificados dois lineamentos em ASA, um NW e um NE, e um lineamento em GZ, na direção NE. Estas com orientação principal para N40-50E.

Na zona 5 ocorrem poços com baixa produtividade (0,0 - 1,4 m³/h/m) e um com valor médio (1,4 – 2,8 m³/h/m), que estão associados a lineamentos magnéticos de direção NW. Estas com orientação principal para N70-80W.

5.9 Caracterização Estrutural e Hidrogeológica das Zonas

Com base nos dados apresentados nos itens anteriores, foi possível avaliar e caracterizar cada uma das zonas definidas, com relação aos aspectos estruturais e hidrogeológicos:

1. **Zona 1:** apresenta comportamento estrutural nordeste e predomínio para as direções N80-90E, seguido de N60-70E. Com relação a hidrogeologia não há como fazer maiores avaliações, pois nessa área só há ocorrência de um poço que apresentou uma capacidade específica baixa de 0,005m³/h/m;
2. **Zona 2:** apresenta comportamento estrutural predominante para nordeste, com *trend* principal N20-30E. Esta se caracteriza por uma capacidade específica máxima de 6,933 m³/h/m e pela ocorrência de valores mais elevados, acima de 2m³/h/m;
3. **Zona 3:** composta por direção geral preferencial para nordeste, com predomínio para N50-60E, seguidas pelas orientações N40-50E e N30-40E. Essa zona é caracterizada por apresentar valores de média e

mediana de capacidade específica iguais a 0,411 e 0,175 m³/h/m, respectivamente. Embora a maior parte dos valores de capacidade específica seja inferior a 1m³/h/m, há ocorrência de poços que apresentam valores entre 1 e 3 m³/h/m;

4. **Zona 4:** caracteriza-se por estruturas gerais na direção nordeste, principalmente para N70-80E, seguidas de orientações para N20-30E. As capacidades específicas encontradas indicam valores de média igual a 0,424 m³/h/m e de mediana igual a 0,157m³/h/m. Essa zona possui a maior distribuição de valores de capacidade específica inferiores a 1m³/h/m, mas apresenta poços com valores entre 2 e 3m³/h/m;
5. **Zona 5:** apresenta comportamento estrutural para nordeste, com orientações para N70-80E, seguido de outras orientações para N20-30E e N00-10W. Essa zona apresenta os maiores valores de média (0,556m³/h/m) e mediana (0,255m³/h/m) da capacidade específica. No entanto, há maior ocorrência para valores inferiores a 1m³/h/m e ausência para intervalos maiores.

5.10 Levantamento Geofísico Terrestre – Método Eletromagnético Indutivo

O levantamento geofísico terrestre teve como objetivo validar os dados informações aeromagnéticos, após todas as etapas de processamento realizadas.

Foram realizados 8 perfis de caminhamento eletromagnético indutivo em locais com estruturas interpretadas pela aeromagnetometria, relacionadas aos poços mais produtivos e de forma a abranger toda a área de estudo, quando possível.

Os 8 perfis eletromagnéticos perfizeram um total de 7640m lineares de investigação de subsuperfície e foram gerados 8 gráficos de dispersão da condutividade aparente (m/s) versus a distância (m) (Figura 67 a Figura 74).

Nas seções foi possível identificar as estruturas (linha tracejada) que estão relacionadas aos dados aeromagnéticos (Figura 66) que marcam as fraturas produtivas do Sistema Aquífero Cristalino.

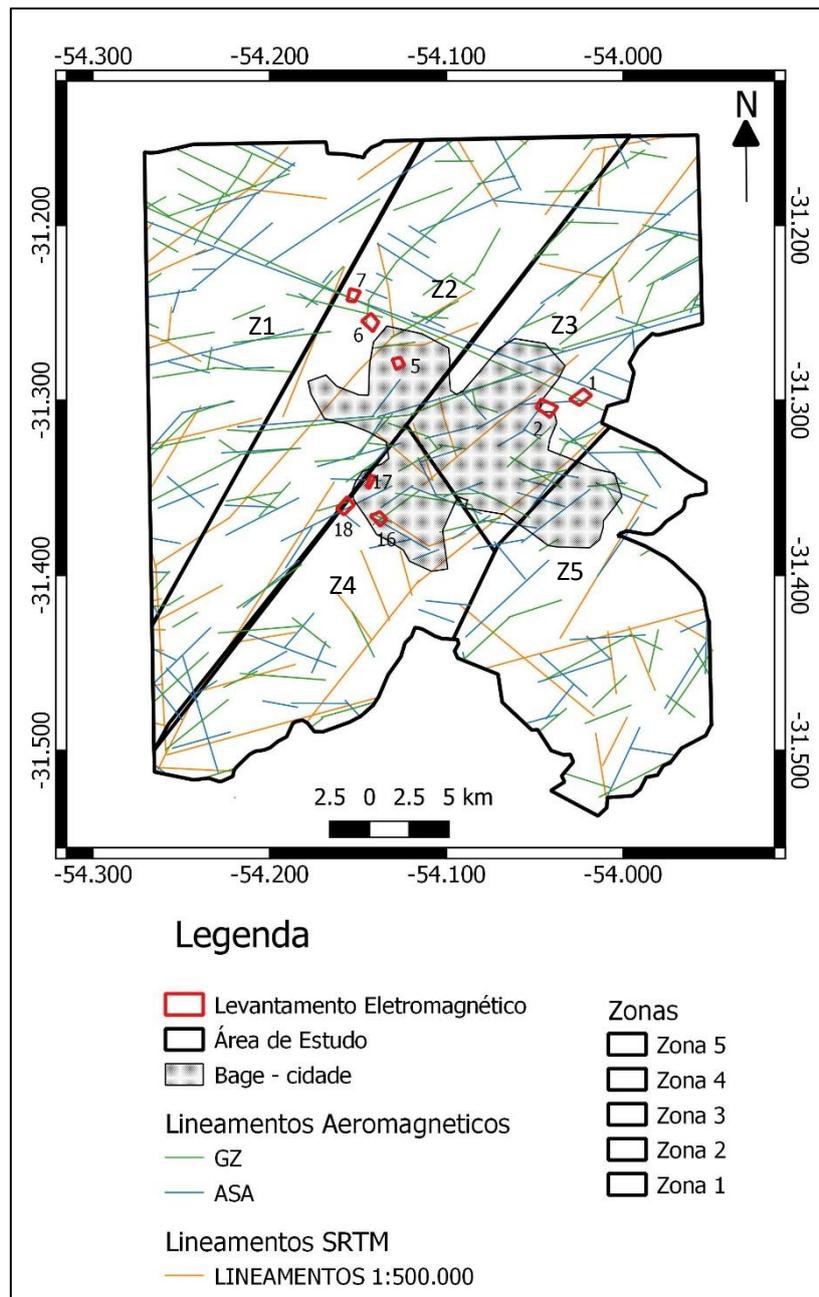


Figura 66: Localização dos caminhamentos eletromagnéticos com as estruturas interpretadas.

As estruturas identificadas nas seções apresentam os altos valores de condutividade e estão relacionadas com uma (Figura 67 e Figura 74) ou mais fraturas (Figura 69 e Figura 73) ou uma zona fraturada (Figura 68 e Figura 69).

Os dados do Ponto 7 (Figura 71) se apresentam muito homogêneos, o que não oferece informações seguras para a interpretação de estruturas neste local amostrado.

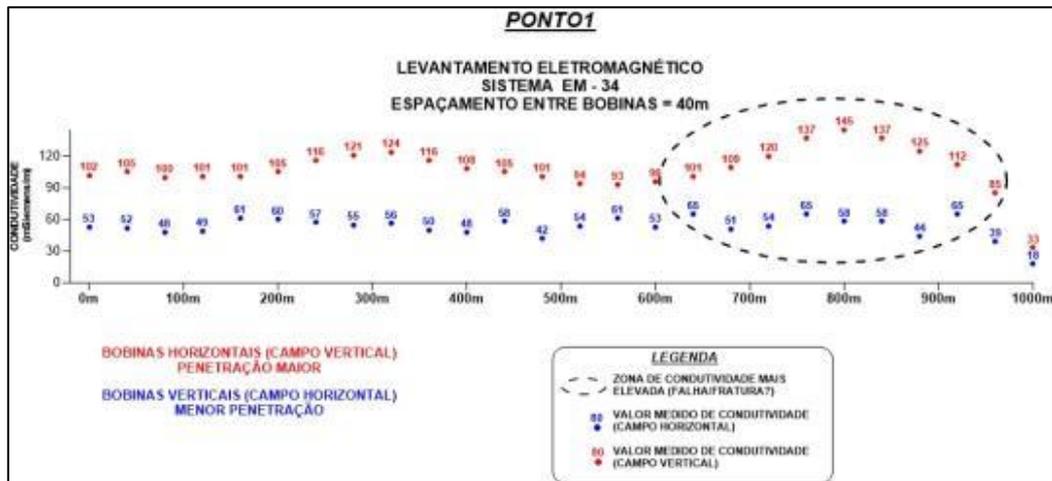


Figura 67: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 1.

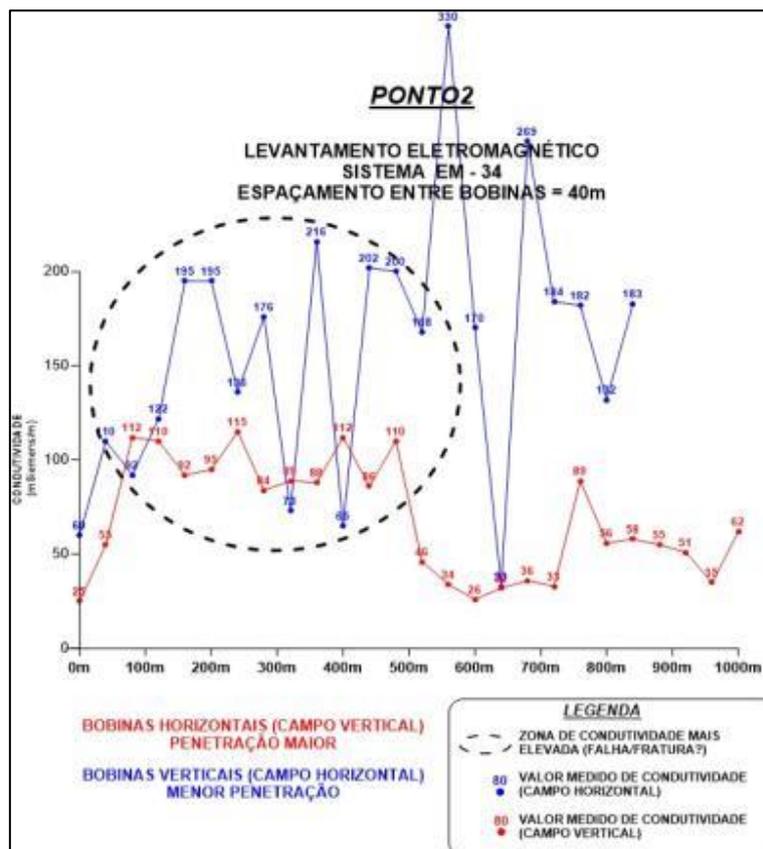


Figura 68: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 2.

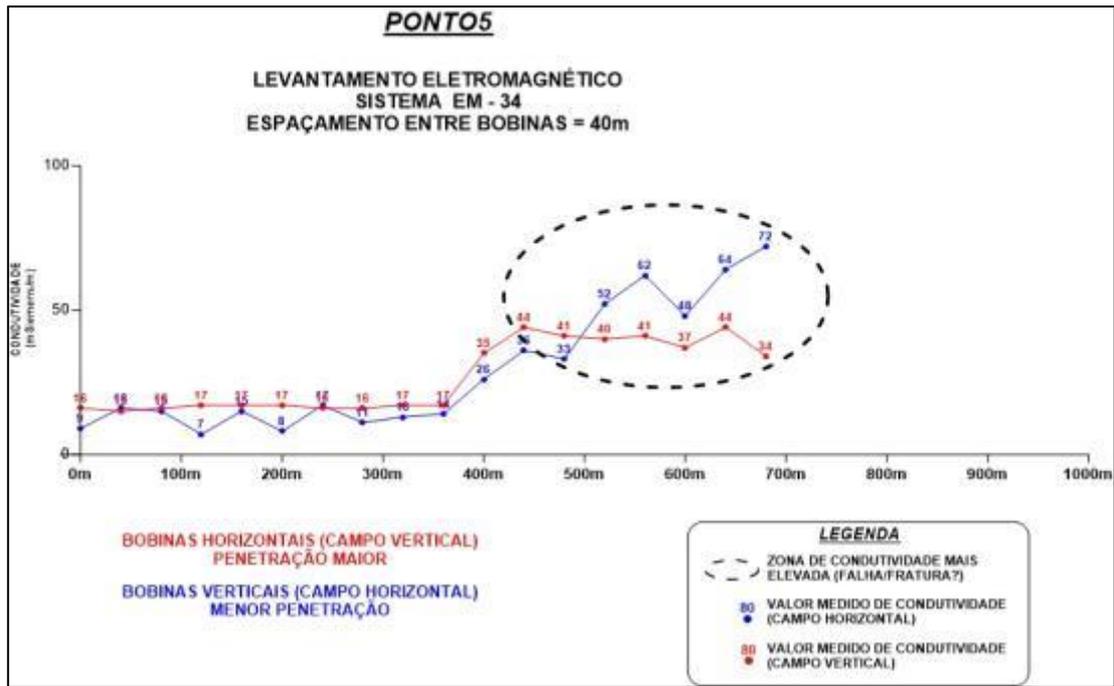


Figura 69: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 5.

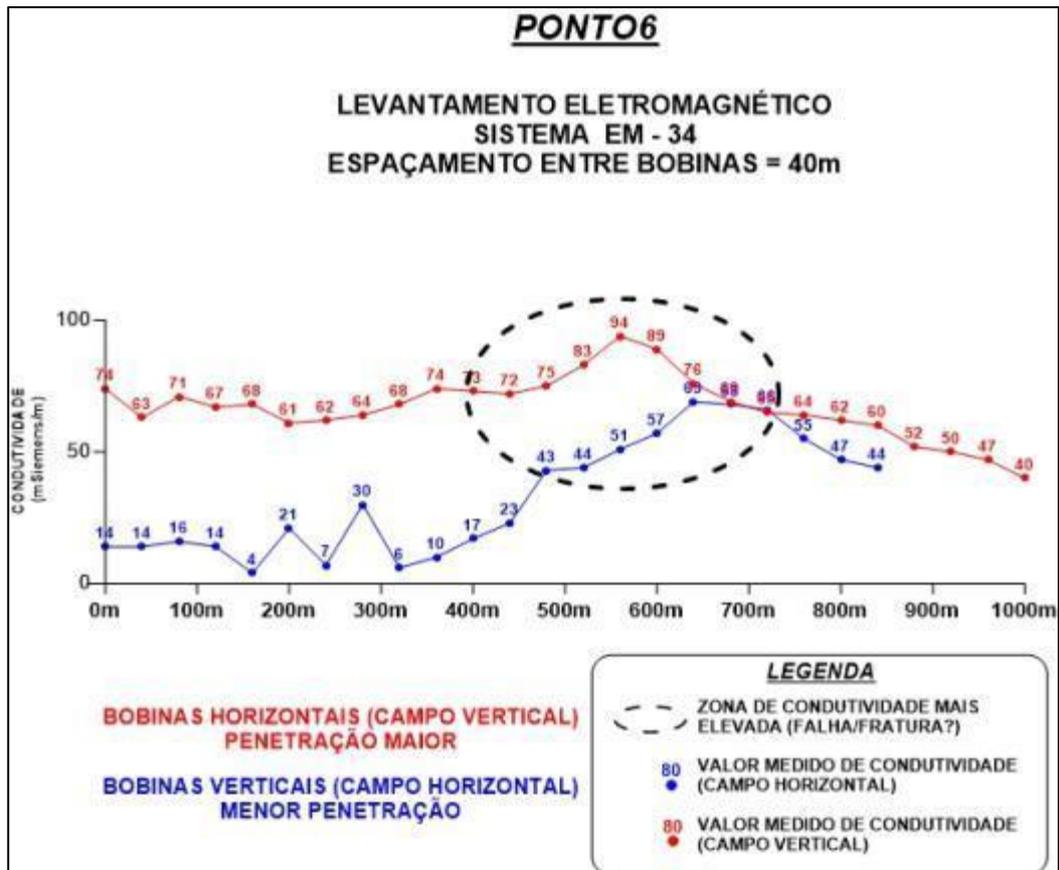


Figura 70: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 6.

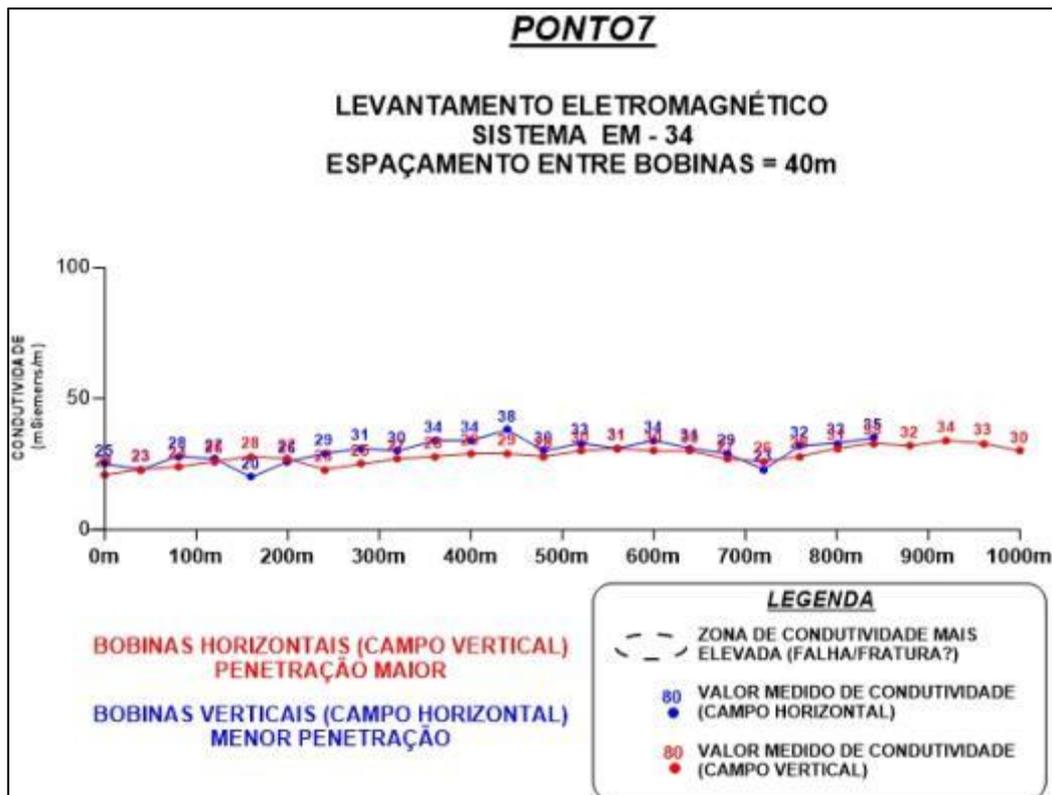


Figura 71: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 7.

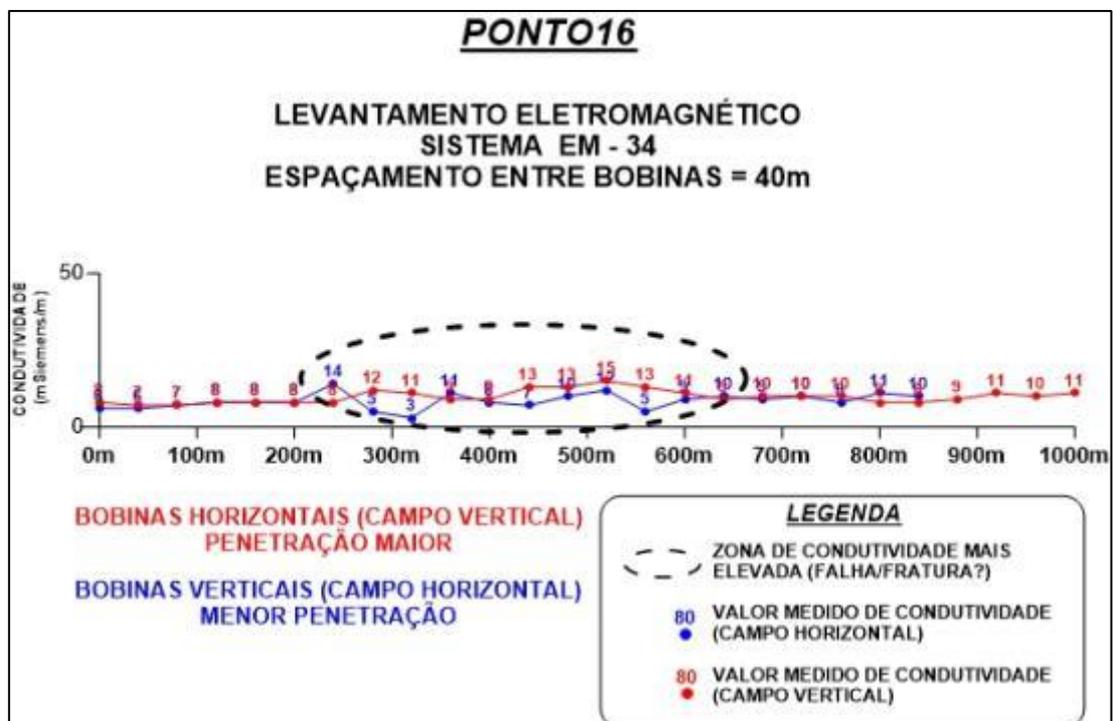


Figura 72: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 16.

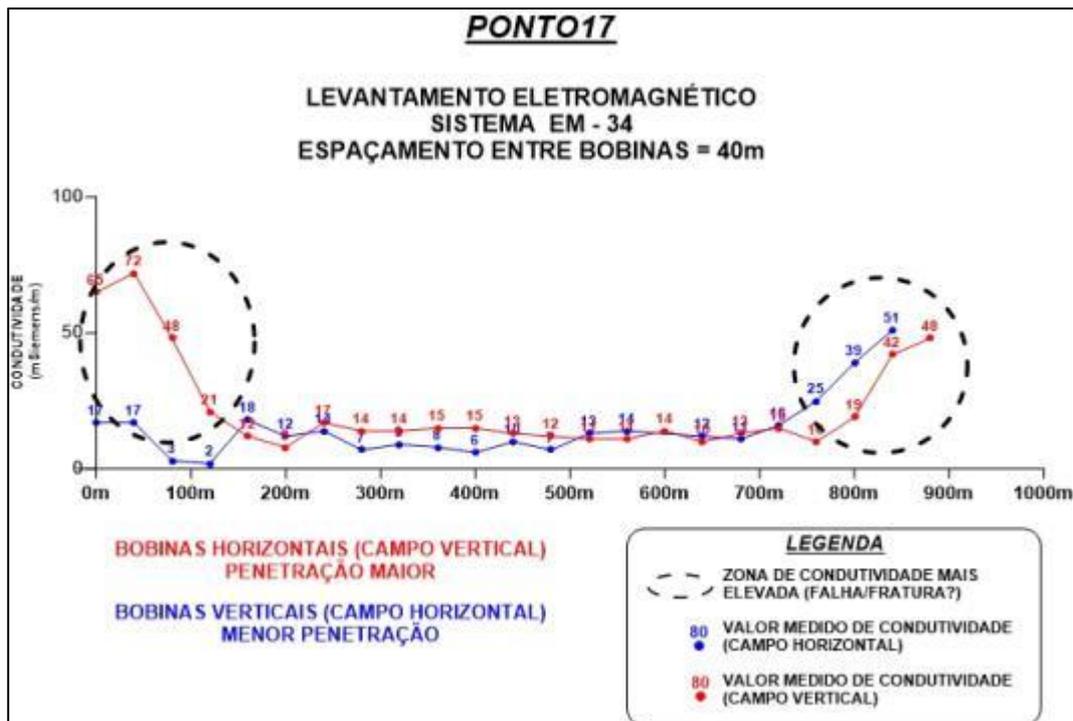


Figura 73: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 17.

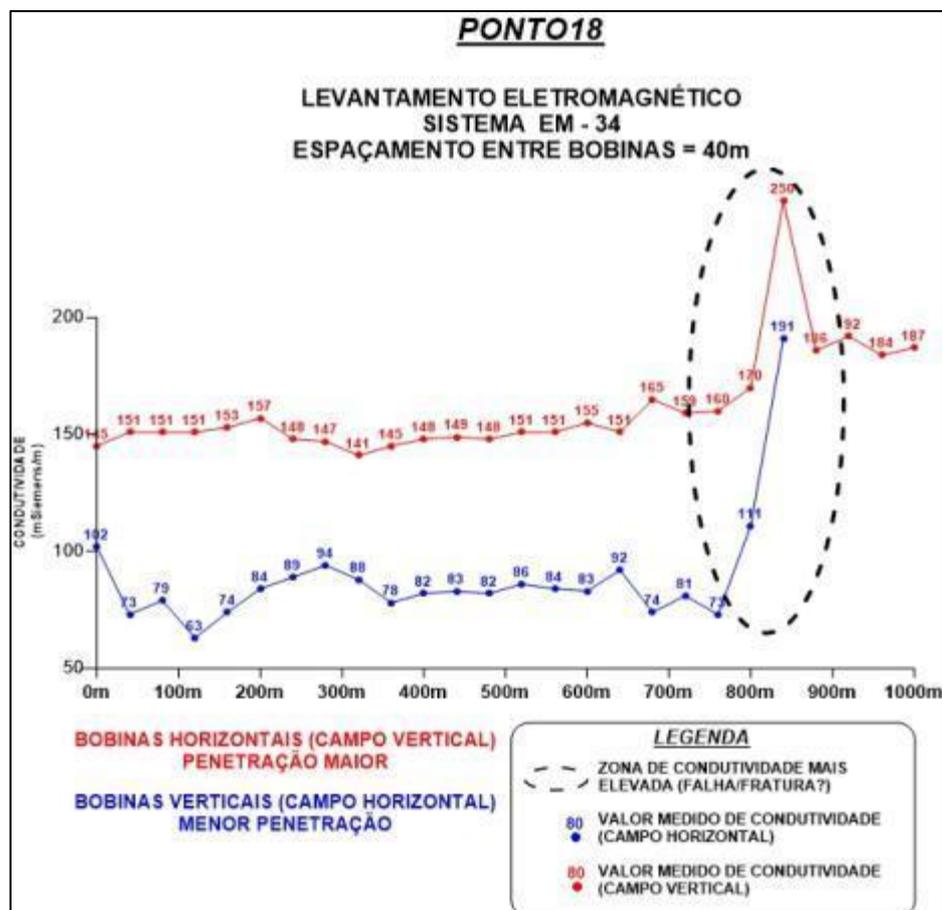


Figura 74: Perfil de condutividade eletromagnética do Ponto 18.

A direções das estruturas reconhecidas nos dados eletromagnéticos terrestre, relacionadas com aquelas interpretadas nos dados de SRTM e aeromagnéticos, que foram utilizadas como base para a campanha de campo, estão listadas na Tabela 23, complementada com uma relação simplificada da capacidade específica dos dados existentes:

Tabela 23: Atitude das estruturas interpretadas nos perfis eletromagnéticos.

Perfil	Direção	Mergulho	Capacidade Específica
1	N60 - 70W	SW	Baixa
2	N40 - 50E	NW	Baixa
5	N70 - 80E	SE	Alta
6	N50 - 60E	SE	Baixa
7	NW	----	Média
16	N60 - 70W	SW	Alta
17	N80 - 90W	NE e SW	Alta
18	N50 - 60W	SW	Média

O índice de capacidade específica simplificado atribuído a cada perfil, foram retirados da Figura 75.

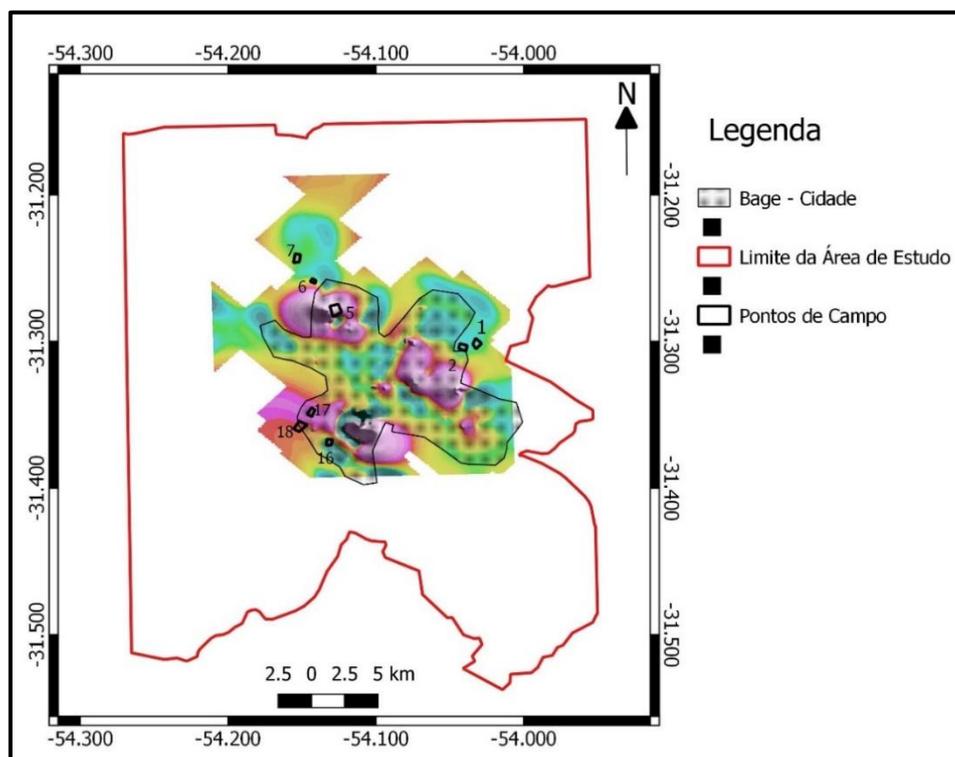


Figura 75: Capacidade Específica com os pontos de campo do levantamento eletromagnético.

5.11 Modelo Hidrogeológico Conceitual do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino da Região de Bagé

A partir da integração dos dados geológicos, dos dados coletados e processados, em softwares específicos, foi possível elaborar o modelo hidrogeológico para a cidade de Bagé (Figura 76).

Este modelo para a água subterrânea assume a segmentação do sistema aquífero em manto de alteração e embasamento cristalino fraturado, visto que a baixa capacidade específica para a área passa por interferência direta da direção das estruturas armazenadoras e pela interceptação com estruturas de direção diferente das preferenciais (Figura 77).

A recarga do aquífero cristalino ocorre pela infiltração de águas, através do manto de alteração e por vezes depósitos sedimentares recentes, que apresentam características de meio poroso e permite a passagem da água e armazenamento nas estruturas do sistema cristalino.

Na área de estudo, o manto de alteração e os depósitos sedimentares recentes podem representar uma zona aquífera com características de meio poroso. Nos locais onde ocorrem as descontinuidades geológicas, o processo de intemperismo é acentuado, como nas rochas granodiotíticas e monzograníticas variando de 1m a até 26m de espessura, e a moda em 2 a 3m. Nas rochas metassedimentares carbonáticas a espessura varia de 1m a 10m, e a moda em 9m, conforme os dados disponíveis do SIAGAS.

O principal sistema aquífero na região é o fraturado, este podendo ocorrer de forma heterogênea na sua morfologia e no preenchimento por minerais, não ocorrendo igualmente por toda a estrutura. As zonas mais fraturadas e as zonas de cisalhamento apresentam mais densidade de estruturas, com isso acentuando o intemperismo, que por sua vez promove a abertura das estruturas, representando os alvos importantes na prospecção da água subterrânea. Também nas regiões onde ocorrem o cruzamento de estruturas a capacidade de armazenamento e circulação hídrica fica mais favorável.

A morfologia do terreno é suave, sem alterações abruptas, não relacionada a produtividade dos poços. Mas nas regiões associadas a lineamentos pode

ocorrer o aprofundamento das estruturas e geração de espaço para a deposição de sedimentos, como aumento da camada de rocha intemperizada.

Os poços com maior produtividade estão associados às estruturas de direção N70 - 90W, acentuados em locais onde ocorram cruzamento de estruturas. Esta direção está relacionada com a zona cisalhamento Passo do Marinheiro, que promoveu a abertura destas estruturas e provável descontinuidades, bem como fechamento das descontinuidades na direção geral NE. Para esta direção somente foi evidenciado um *trend* com boa capacidade específica, na direção N70 – 80E. Isto fica mais evidente quando observados os dados poços disponíveis e plotados na Figura 76.

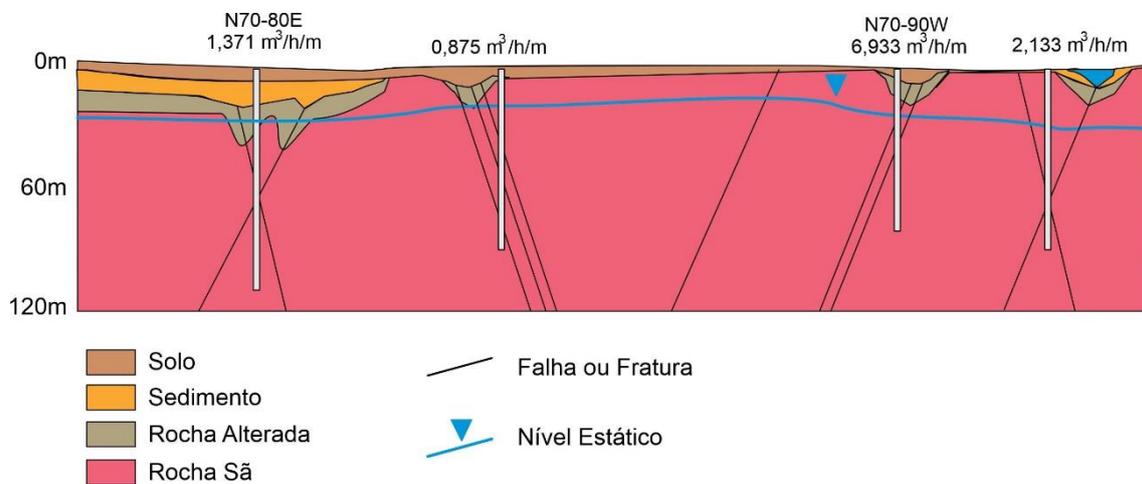


Figura 76: Modelo conceitual para a área de estudo.

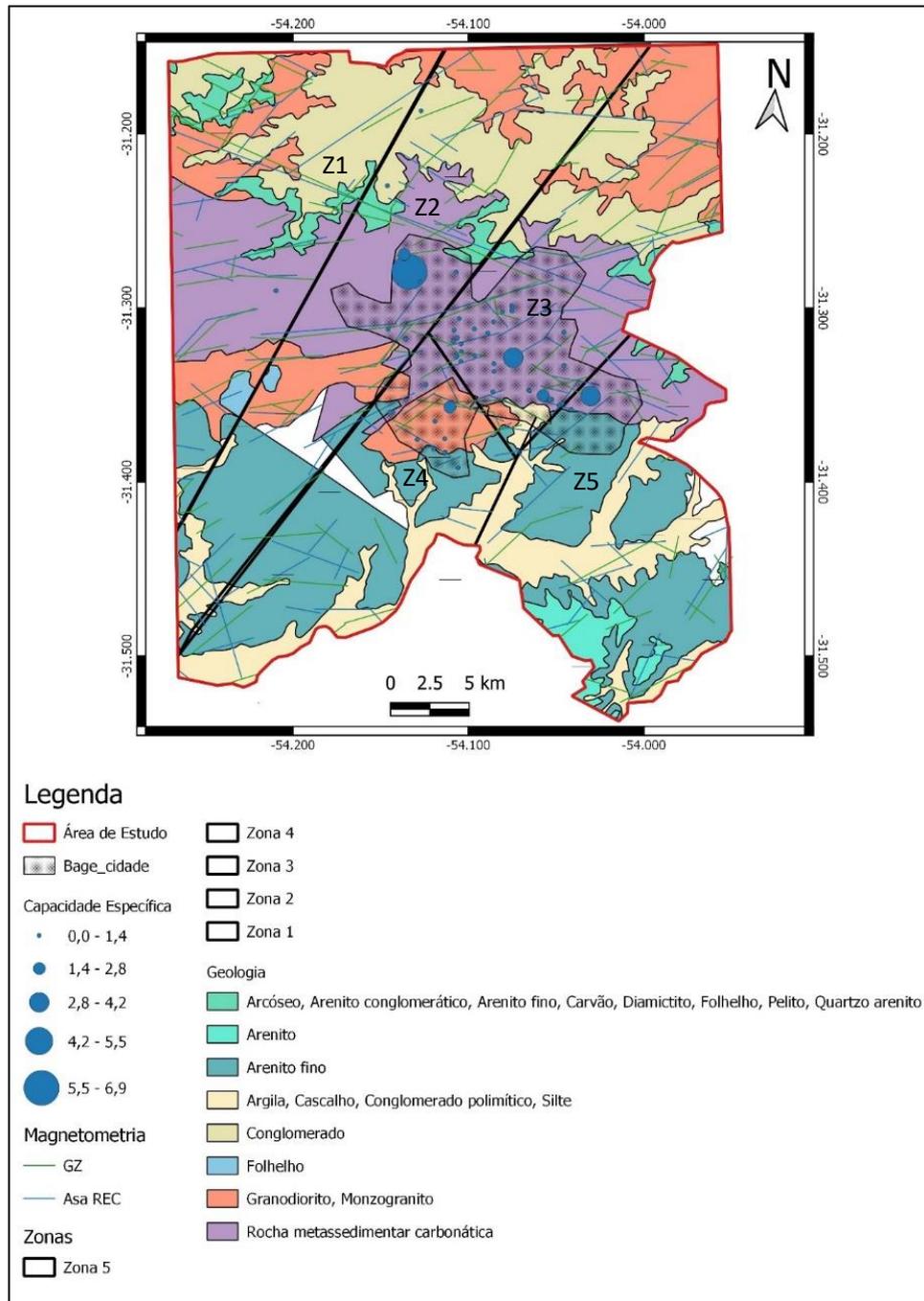


Figura 77: Mapa litológico com as variações de capacidade específica dos poços ocorrentes na área de estudo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta a integração dos dados hidrogeológicos, sensoriamento remoto, aeromagnéticos e eletromagnético terrestre que permitiu compreender o padrão e controle estrutural e a compartimentação hidrogeológica da área de estudo.

A partir da integração destes dados foi possível identificar e hierarquizar as zonas mais favoráveis para a captação de água subterrânea, que permitiu formular algumas afirmações a respeito do comportamento local do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II.

A utilização dos dados aeromagnéticos, associado ao método tradicional de sensoriamento remoto, se mostraram muito eficientes, trabalhando em conjunto ou individualmente, para as correlações e interpretações das informações da água subterrânea em sistemas aquíferos fraturados. Os dados SRTM são complementares aos dados aeromagnético, visto que os lineamentos na direção NS ficam ausentes em decorrência das linhas de voo nesta direção.

A área de estudo foi dividida em cinco compartimentos estruturais e hidrogeológicos, a partir da integração dos dados superficiais (SRTM) e subsuperficiais (aeromagnético), através do reconhecimento dos grandes lineamentos. Estes dois métodos apresentaram boa correlação dos lineamentos magnéticos estruturais e lineamentos geomorfológicos mapeados nas escalas utilizadas neste trabalho. Também os dados eletromagnéticos de campo validaram os lineamentos aeromagnéticos interpretados nos diversos métodos de processamento empregados. Desta forma, estes dados forneceram um *trend* preferencial para as estruturas aquíferas na direção geral noroeste, apresentando como mais favorável as direções N70-90W, para a direção nordeste, e N70 – 80E, para a direção nordeste.

Com base na análise hidrogeológica foi possível hierarquizar as zonas mais favoráveis à perfuração de poços tubulares profundos. A partir da análise dos valores de capacidade específica, observa-se que as zonas que apresentam maior produtividade dos poços, são em ordem decrescente de importância as zonas 2, 3, 4, 5 e 1. Em relação a estruturas que estão associadas a poços mais

produtivos, as zonas apresentam orientação mais favorável NW, N70-90W, mas salientando que quando houver cruzamento de estruturas a capacidade específica fica acentuada, mesmo na direção NE que apresenta menor produtividade em relação a NW. Devem ser considerados os contatos litológicos, pois estes representam estruturas de grande porte e favoráveis ao acúmulo de água.

Ainda assim, compreende-se a necessidade de um levantamento geológico e estrutural de detalhe em campo, para avaliar mais detalhadamente estas estruturas e a possibilidade de ocorrência de água subterrânea.

Com a conclusão do sistema informatizado do Departamento de Recursos Hídricos da FEPAM, possibilitará complementar o banco de dados hidrogeológicos, o que provavelmente, fornecerá características importantes para o refino da hidrogeologia da área.

O levantamento de campo, geológico e estrutural, fornecerá um conhecimento das características das zonas hidrogeológicas, assim melhorando a compreensão da área. Com isso, se poderá relacionar estes novos dados com os dados já produzidos, apresentando um panorama mais completo das características do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino.

Este conjunto de dados e características, associados aos aqui produzidos, deverão servir como subsídio para a confecção de um modelo hidrogeológico local mais refinado que represente o comportamento da água subterrânea.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, W. F. Métodos Geofísicos Eletromagnéticos Aplicado ao Diagnóstico da Contaminação do Solo e das Águas Subterrâneas em Área de Infiltração de Resíduos Industriais. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo - SP, 2000.

ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of AIME*, 146(01), 54–62. 1942.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR.; HARTMANN, L. A.; VAN SCHUMUS, W. R.; DA SILVA, L. C. Juvenile accretion at 750-700 Ma in Southern Brazil. *Geology*, 24: 439-442, 1996.

BAMMESBERGER, A. Variabilidade da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria – RS, 2020.

BANKS, E. W., HATCH, M., SMITH, S., UNDERSCHULTZ, J., LAMONTAGNE, S., SUCKOW, A., MALLANTS, D. Multi-tracer and hydrogeophysical investigation of the hydraulic connectivity between coal seam gas formations, shallow groundwater and stream network in a faulted sedimentary basin. *Journal of Hydrology*, volume 578, 2019.

BARANOV V. & NAUDY H. Numerical calculation of the formula for reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 22:359–383, 1957.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. *In: Bergamaschi, H.; Berlato, M. A.; Fontana, D. C.; Cunha, G. R.; Santos, M. L. V. dos; Farias, J. R. B.; Barni, N. A. Agrometeorologia aplicada à irrigação*, Porto Alegre: UFRGS, p.11-23, 1992.

BETTÚ, D. F., FERREIRA, F. J. F., SALAMUNI, E., & FERNANDES, L. A. Compartimentação estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Caiuá e Serra Geral no Noroeste do Paraná - Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(3), 393-409, 2006.

BLAKELY, R. J., LANGENHEIM, V. I., PONCE, D. A., DIXON, G. L. Aeromagnetic survey of the Amargosa desert, Nevada and California: A tool for understanding near-surface geology and hydrology. USGS. Nevada, 27 p., 2000.

BONGIOLO, A. B. S. Contribuição ao Estudo da Bacia do Amazonas e seu Embasamento Através da Magnetometria e Gravimetria. Curitiba. 1v, 190p. Tese de Doutorado em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba – PR, 2011

BONGIOLO, A. B. S., FERREIRA, F. J. F., BITTENCOURT, A. V. L., SALAMUNI, E. Connectivity and magnetic-structural compartmentalization of the Serra Geral and Guarani aquifer systems in central state os Paraná (Paraná Basin, Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*. 32(1): 141-160, 2014.

BORBA, C., AGUIAR, L. A. M., MACIEL, W. B., ALMEIDA, M. S., FILHO, D. C. D., SOUZA, R. S. Aspectos Controladores do potencial Selante de Falhas: exemplo do Campo de Pilar, Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. 12 (1) 102-123, 2004

CASTILLO LOPES, L. A.: Interpretação Sismoestratigráfica e Geomorfológica Sísmica do Cone de Rio Grande, Bacia de Pelotas. PhD, Programa de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, 2009.

CASTRO, F. R. Arcabouço Geofísico Estrutural da Porção Meridional do Cinturão Ribeirae Regiões Adjacentes. Curitiba. 1v, 204p. Tese de Doutorado em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba – PR, 2014

CASTRO, F. R., OLIVEIRA, P. O., SOUZA DE J. e FERREIRA, F. J. F. Combining Tilt Derivative Filters: New Approach to Enhance Magnetic Anomalies. *Revista Brasileira de Geofísica* (2018) 36(3):1-9, 2018.

CAVALCANTE, F., DA SILVA CHIBANE, P., MENDONÇA, C. e SOUZA FILHO, O. Aplicação do método eletromagnético na prospecção de aquíferos fissurais: Modelagem numérica e teste de campo em Paulistana-PI. VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

CHEMALE JR. F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ, M. & DE ROS, L.F. (Ed.): *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 13-52, 2000.

CHEMALE, Jr. F., MALLMANN, G., BITENCOURT, M. F., and KAWASHITA K.: Time constraints on magmatism along the Major Gercino Shear zone, Southern Brazil: implications for West Gondwana reconstruction, *Gondwana Res*, 22, 184-199, 2012.

CORDELL, L., GRAUCH, V. J. S.. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, In W. J. Hinze, (Ed.), *The utility of regional gravity and magnetic anomalies maps*. (v.1, 181–197) Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1985.

COOPER G.R.J. & COWAN D.R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, **32**:1585-1591, 2006

COSTA A. F. U. Teste e modelagem geofísica das associações litotectônicas pré-cambrianas no Escudo Sul-rio-grandense. Porto Alegre. 2v., 257p. Tese de Doutorado em Ciências, Instituto de Geociências, UFRGS. Porto Alegre - RS, 1997.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS - CPRM. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000, 2008

CPRM – SIAGAS,
<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>, informação coletada dia 24/08/2016.

DAEB – Departamento de Água, Arroio e Esgoto de Bagé,
<http://www.daeb.com.br/7/Agua.html>, informação coletada dia 22/08/2018

DALL'AGNESE, B. S. Caracterização Geológica-Geofísica em uma Área da Falha Açotéia-Piquiri Aplicada a Hidrogeologia, Santana da Boa Vista, RS. Trabalho de Conclusão de Curso, UNIPAMPA. Caçapava do Sul - RS, 80 p., 2015.

DANI, A. P. de O. Caracterização Faciológica e Petrográfica da Formação Santa Tecla, RS. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS. Porto Alegre, 2013.

DINIZ J.A.O., Monteiro A.B., SILVA R. de C. da, PAULA T.L.F. de. Manual de Cartografia Hidrogeológica. CPRM 124p, 2014.

EMBRAPA – Ageitec (Agencia EMBRAPA de Informações Tecnológicas),
<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>, informação coletada dia 27/08/2019

ENDO, I. Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais. Tese de Doutorado. USP. São Paulo – SP, 383p, 1997.

ERNESTO, M. & USSAMI, N. Introdução a Geofísica. Departamento de Geofísica IAG/USP. 65 pag. 2002.

EVJEN H.M. The place of vertical gradient in gravitational interpretations. *Geophysics*, **1(1)**:127-136, 1936.

FERNANDES, A. J. Aquíferos Fraturados: uma Revisão dos Condicionantes Geológicos e dos Métodos de Investigação. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 29 (1/2), 49-72, 2008.

FERREIRA F.J.F., PORTELA FILHO C.V., ROSA FILHO E.F., ROSTIROLLA S.P. Connection of the Serra Geral and Guarani aquifers systems across Ponta Grossa Arch (Paraná Basin, Brazil). In: Internacional Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH), 33 and International Congress of the Latin-American Association of Underground Hydrology for Development (ALHSUD). 2004.

FERREIRA F.J.F., PORTELA FILHO C.V., ROSA FILHO E.F., Rostirolla S.P. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). Revista Latino-Americana de Hidrogeologia, 5:61-74, 2005.

FERREIRA, F. J. F., SOUZA, J, BONGIOLO, A. B. S, CASTRO, L. G., ROMEIRO, M. A. T. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação dosinal analítico. Parte I: Aplicação a dados sintéticos. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, v.1, 1-6. Brasília: SBGf, 2010.

FILHO, L. L. V. D., DA SILVA, J. L. S., DAMBRÓS, C. Domínios Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria – RS. Águas Subterrâneas, 2010.

FONSECA, R. N. M. e BISCHOFF, J. H. Um Sistema Eletromagnético para Prospecção de água Subterrânea. Anais do 2º Congresso Brasileiro de Água Subterrânea, 1982.

FREITAS, M. A. Recursos Hídricos Subterrâneos. Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul. CPRM, Porto Alegre, 71-87, 2010.

GALLAS, J. D. F. Eletrorresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea em áreas de rochas cristalinas. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA, II, Rio Claro. Anais...No Claro, CD-ROM, Arquivo WgaO9.RTF. 1998.

GALLAS, J. D. F. Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese de Doutorado. Unesp. Rio Claro, 279p., 2000.

GALLAS J. D. F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. Revista do Instituto Geológico, 24(1/2): 43-51, 2003.

GALLAS J. D. F. e GIARDIN, A. Eletrorresistividade na Prospecção de Aquíferos Fraturados. Águas Subterrâneas. 30(1):119-138, 2016.

GEOSOFT. 2010c. Montaj Grav/Mag Interpretation. Sistema de processamento, análise e visualização para inversão 3D de dados de campos potenciais para o Oasis Montaj v7.1 EULER. Tutorial e guia do usuário. p. 79

GIAMPÁ, C. E. Q. e GONÇALES, V. G. Águas Subterrâneas e poços tubulares profundos. Editora Oficina de Textos, 496 p., 2013.

GIBSON, R. G. Fault zones seals in siliciclastic strata of the Columbus Basin, offshore Trinidad. American Association of Petroleum Geologists. Bulletin, Oklahoma, v.78, p. 1372-1385, 1994.

GOFFERMAN, M., VIERO, A. P. & SILVA, E. B. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Pesquisas em Geociências, 42 (3): 239-261, 2015.

GONÇALVES, D. S. Geologia e Hidrogeologia das Cabeceiras do Arroio dos Ladrões, Estação Experimental Fepagro, Encruzilhada do Sul/RS. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRGS. Porto Alegre – RS, 90 p, 2011.

GRAUCH, V. J. S., BANKEY, V. Aeromagnetic Interpretations for Understanding the Hydrogeologic Framework of the Southern Española Basin, New Mexico. USGS, Denver. 44 p., 2003.

GRUBER, L., PORCHER, C. C., KOESTER, E., BERTOTTI, A. L., LENZ, C., FERNANDES, L. A. D'A., and REMUS, M. V. D.: Isotope geochemistry and geochronology of syndepositional volcanism in Porongos Metamorphic Complex, Santana da Boa Vista antiform, Dom Feliciano Belt, Brazil: Onset of an 800 Ma continental arc, *J Sediment Env*, 1, 2:202-221, 2016.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR., F.; PHILIPP, R. P. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi, R. & Frantz, J.C. (Ed.): 50 ANOS de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições, p. 97-123, 2007.

HARTMANN, L. A.; NARDI, L. V. S.; FORMOSO, L. L.; REMUS, M. V. D.; Lima, E. F. & Mexias, A. S. Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul shield, Brazil. *Pesquisas*, 26:45-63, 1999.

HARTMANN, L. A.; PORCHER, C. C.; REMUS, M. V. D. Evolução das rochas metamórficas do Rio Grande do Sul. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (ed.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/UFRGS, p. 13-52, 2000.

HEWAIDY, A. G. A., EL-MOTAAL, E. A., SULTAN, S. A., RAMDAN, T. M., EL KHAFIF, A. A., & SOLIMAN, S. A. Groundwater exploration using resistivity and magnetic data at the northwestern part of the Gulf of Suez, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(3), 255–263, 1015.

IBGE - Banco de Informações Ambientais (BDIA) <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>, documento obtido em 02 de Agosto de 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Relatório IPT- 32.388. Levantamentos Geofísicos de Eletroresistividade em apoio a Captação de Águas Subterrâneas em Rochas Cristalinas, nas Proximidades da Usina Termelétrica de Piratininga e da Represa Billings. IPT, 13p, 1994a.

ISLES D.J. & RANKIN L.R. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. Australian Society of Exploration Geophysicists, 365 pp, 2013.

JEY, B. I.; KAARS-SIJPESTEINJN, C. H.; PETERS, M. P. A.; WATTS, N. L.; WILKIE, J. T., 1993. Akaso Field, Nigeria: use of Integrated 3-D seismic, fault slicing, clay smearing, and RFT pressure data on fault trapping and dynamic leakage. American Association of Petroleum Geologists. Bulletin, Oklahoma, v. 77, p.1389-1404. Acessado dia 04/10/2018 em https://www.researchgate.net/publication/308493314_Akaso_Field_Nigeria_Use_of_Integrated_3D_Seismic_Fault_Slicing_Clay_Smearing_and_RFT_Pressure_Data_on_Fault_Trapping_and_Dynamic_Leakage.

JOSÉ, C., & CAVALCANTE, I. N. Metodologia Geofísica Eletromagnética Aplicada em Estudos de Água Subterrânea e de Contaminação do Ambiente Hidrogeológico. Revista Águas Subterrâneas, 2000.

JUCÁ, C. C. A., ALVITE, E. N. C., SILVA, C. D. A., GONÇALVES, L. R. L. Estudo Hidrogeológico e Geofísico na Borda da Bacia Pontiguar, Fazenda Macacos, Limeiro do Norte/CE. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2018.

KÄMPF, N. e STRECK, E. V. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul: Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade. Porto Alegre: CPRM. 250 p., 2010.

KNIPE, R. J. Justaposition and seal diagrams to help analyse fault seals in hydrocarbon reservoirs. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Oklahoma, v. 81, p. 187-195, 1997.

LANDIM, P. M. B. "Análise Estatística de Dados Geológicos", 2a. Edição. Editora da UNESP. São Paulo. 2003. 253 p.

LEINZ, V. and AMARAL, S. E. Geologia Geral. São Paulo: Nacional. 512 p., 1966.

LEIVAS, J. F., BERLATO, M. A., DENISE C. F. Risco de deficiência hídrica decendial na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. Campina Grande/PB. V. 10, n 2, p. 397-407, 2006.

LISBOA, N. A., DANI, N., REMUS, M. V., & CASTRO, J. 2004. Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul. In XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

LUIZ, J. G., SILVA, L. M. DA C. Geofísica de Prospecção. Belém, Universidade Federal do Pará. Cejup, 335p., 1995.

MACHADO. J. P. S. L. Estruturação do Graben Arroio Moirão, Santana da Boa Vista, RS. Tectônica e geocronologia. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRGS. Porto Alegre– RS, 75 p., 2014.

MACHADO, J. L. F., FREITAS, M. A. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. CPRM – Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul. Escala 1: 750.000, 2005.

MADRUCCI, V., TAIOLI, F. E ARAÚJO C. C. Análise Integrada de Dados de Sensoriamento Remoto, Geologia e Geofísica no Estudo de Aquíferos fraturados, Lindóia – SP. Revista Brasileira de Geofísica. 23(4): 437-451, 2005.

MACLEOD I.N., KEITH J., DAI T. 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. Exploration Geophysics, 24:679-688, 1993.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Ed.). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, p. 13-33, 1997.

MARQUEZAN, R. G. Análise de recursos digitais como ferramentas de avaliação em ações de proteção de aquíferos no trajeto de oleodutos. 2008.

184p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G., SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. e FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. In: Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MILANI, E.J., RAMOS, V.A. Orogenias Paleozoicas no domínio Sul-ocidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, 28(4): p. 473-484, 1998.

MILANI, E.J., THOMAZ FILHO, A. Sedimentary Basins of South America. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (eds.). Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, 31st. IGC, p. 389-449, 2000.

MILLER H.G. & SINGH V. Potential field tilt — a new concept for location of potentialfield sources. Journal of Applied Geophysics, 32:213–217, 1994.

MOCELLIN, R.C.; FERREIRA, F.J.F. Conectividade e Compartimentação dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani no Sudoeste do Estado do Paraná, Brasil. Revista Brasileira de Geociências. 39(3):567- 579, setembro de 2009.

MUCHINGAMI, I., MKALI, A., VINQI, L., PIETERSEN, K., Xu, Y., WHITEHEAD, R., ... KANYERERE, T. Integration of hydrogeophysical and geological investigations in enhancing groundwater potential assessment in Houtriver gneiss crystalline basement formation of South Africa. Revista Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 123, 2021.

NABIGHIAN, M.N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomalyinterpretation. Geophysics, 37:507–517, 1972.

NABIGHIAN, M.N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39:507-517, 1974.

NABIGHIAN M.N.; GRAUCH, V. J. S.; HANSEN, R. O.; LaFehr, T. R.; LI, Y.; PEIRCE, J. W.; PHILLIPS, J. D. e RUDER, M. E. 75th Anniversary: The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70:33-61, 2005.

NAIME, M.R.; LAHM, R.A. Prospecção hidrogeológica pelos métodos de geofísica elétrica por corrente contínua no município de Água Boa – MT. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 10, São Paulo. Anais...São Paulo: ABAS, 1998.

NETO, D. T. Caracterização Hidrogeológica do Município de Dom Feliciano – RS, Visando a Identificação de Áreas Favoráveis para Captação de Água Subterrânea. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRGS. Porto Alegre – RS, 53 p., 2016.

OLAYINKA, A., & BARKER, BOREHOLER. Siting in Crystalline Basement Areas of Nigeria with a Microprocessor-Controlled Resistivity Traversing System. *Ground Water*, 28(2), 178–183, 1990.

OLIVEIRA, C. H. E. de, JELINEK, A. R., CHEMALE, Jr. F., and BERNET, M.: Evidence of post-Gondwana breakup in Southern Brazilian Shield: Insights from apatite and zircon fission track thermochronology, *Tectonophysics*, 666, 173-187, 2016.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JR., F.; WILDNER, W. Estágios Evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). *Ciência e Natura*, p. 183-193, 2014.

PAIM, P. S. G., LOPES, R. C. Geologia da Região das Minas do Camaquã. In: RONCHI, L. H., LOBATO, A. O. C. (ed.). *Minas do Camaquã, Um Estudo Multidisciplinar*. São Leopoldo: Ed. UNISINOS, p. 111-132, 2000.

PEREIRA, B. M. E FERREIRA, F. J. F. Recognition of Gold Mineralization Favorability Zones Through Airborne Gamma-ray Spectrometry and Magnetometry in Brusque and Botuverá Region, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 36(3):1-14, 2018.

PIRES, C. A. Condicionantes Litoestruturais na Exploração do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, Paraná, Brasil. Doutorado, UFPR, Curitiba – PR, 95 p., 2020

POISSON, J., Chouteau, M., AUBERTIN, M. e CAMPOS, D. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *Journal of Applied Geophysics*, p. 179-192, 2008.

Prefeitura de Bagé, <https://indicadores.cidadessustentaveis.org.br/br/RS/bage>, informação coletada dia 22/08/2018

PHILIPP, R. P. A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PHILIPP, R. P., PIMENTEL, M. M. & CHEMALE JR, F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, 46(Suppl. 1), p. 83-104, 2016.

PHILIPP, R. P., GONZATTI, C., AGOSTINI, I. M., REMUS, M. V. D., FIORENTINI, J. A. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: IANNUZZI, R. & FRANTZ, J.C. (Ed.): 50 ANOS de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições, p. 97-123, 2007.

RAMGRAB, G. E. e WILDNER, W. Carta Geológica Folha Pedro Osório SH.22-Y-C Escala 1:250.000 – CPRM, 2000.

RANGANAI, R.T. AND EBINGER, C.J. Aeromagnetic and LANDSAT TM Structural Interpretation for Identifying Regional Groundwater Exploration Targets, South-Central Zimbabwe Craton. *Journal of Applied Geophysics*, 65, 73-83, 2008.

RANGANAI, R. T., MOIDAKI, M. D., KING, J. G., BAGAI, Z. B. Geophysical and Hydrogeological Groundwater Prospectivity Mapping in the Kraaipan Granite-Greenstone Terrain, Southeast Botswana. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 1270-1298, 2017.

ROISENBERG, C., VIERO, A. P., ROISENBERG, A., SCHWARZBACH, M. S. R., MORANTE, I. C. Caracterização Geoquímica e Gênese dos Principais Íons das Águas Subterrâneas de Porto Alegre, RS. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 8 n.4, 137-147, 2003.

ROEST W.R.J., VERHOEF J., PILKINGTON M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57:116-125, 1992.

SANTOS, H. S., CUNHA, G. N. e CASTRO, J. R. Avaliação Qualitativa das Técnicas de Interpolação de Mínima Curvatura, Krigagem e Bidirecional na Formação de Imagens. *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana* n. 4 pp. 2-16, 2016.

SILVA, M. R. M. Identificação da Ocorrência de Estiagem em Bagé (RS) entre 1961-2009. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS, Instituto de Geociências – Porto Alegre – RS. 83 pag. 2010.

SOUZA J.de & FERREIRA F.J.F. On the use of derivatives for interpreting magnetic anomalies due to dyke-like bodies: qualitative and quantitative analysis. In: *Istanbul 2012 International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, Istanbul, Turkey, Expanded Abstracts*, 1:1-4, 2012.

SOUZA J.de & FERREIRA F.J.F. On the use of derivatives for interpreting magnetic anomalies due to dyke-like bodies II: application to synthetic and field

data. In: Society of Exploration Geophysicists (SEG) Technical Program, Expanded Abstracts, 1:1121-1125, 2013.

SOUZA J.de & FERREIRA F.J.F. The application of the Signum transform to the interpretation of magnetic anomalies due to prismatic bodies. In: ASEG-PESA2015 24th International Geophysical Conference and Exhibition, Australian Society of Exploration Geophysicists, Perth, Western Australia. Proceedings of the ASEG-PESA-2015 24th International Geophysical Conference and Exhibition, 1:1-5, 2015.

THOMPSON, D.T. 1982. EULDPH: A New Technique for Making Computer-assisted Depth Estimates from Magnetic Data. *Geophysics*. 47: 31-37.

TRAININI et.al. Mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1: 750.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Porto Alegre, RS. 2005.

STEFANO, P. H. P., ROISENBERG, A., GALLAS, J. F., ROCHA, Z. Análise de Radônio no Solo para Prospecção de Água em Aquífero Fraturado. *Revista Água Subterrânea*, 31 (3), p.168-180, 2017.

VARONE, F. FERREIRA, S., ALVES, R. Análise de anos com estiagem na região de Bagé/RS, 2010.

VERDUZCO B., FAIRHEAD J.D., GREEN C.M. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, **23(2)**:116–119, M 2004.

VIERO, A. P., ROISENBERG, C., ROISENBERG, A., & VIGO, A. The origin of fluoride in the granitic aquifer of Porto Alegre, Southern Brazil. *Environmental Geology*, 56(8), 2008.

VIERO, A. P., SILVA, D. R. A. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul: Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade. Porto

Alegre: CPRM. 250 p., 2010.

WIJNS C., PEREZ C., KOWALCZYK P. Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics*, **70**:39-43, 2005.

XAVIER, F. F. Aplicação da Sondagem Geofísica – Método Eletroresistividade - na Localização de Poços Tubulares Profundos. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.

ZEIL, P., VOLK, P., SARADETH, S. Geophysical methods for lineament studies in groundwater exploration. A casa history from SE Botswana. *Geoexploration*, 27: 165-177, 1995.