

Artigos

Uso de dados aeromagnéticos e eletromagnéticos na avaliação de estruturas condicionadoras de aquíferos fraturados e produtividade dos poços, no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, na região de Bagé (RS)

Use of inductive electromagnetic and electromagnetic data in the evaluation of conditioning structures of fractured aquifers and well productivity, in the Crystalline Basement Aquifer System, in the Bagé region (RS)

Rafael Lima Dessart¹; Pedro Antonio Roehe Reginato²; José Domingos Faraco Gallas³

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), Porto Alegre, RS.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS.

³ Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP.

✉ rdessart@gmail.com, pedro.reginato@ufrgs.br, jgallas@usp.br

Palavras-chave:

Sistema Aquífero Cristalino;
Aeromagnetometria;
Compartimentação Estrutural e
Hidrogeologia.

Resumo

Esse artigo apresenta o estudo de avaliação do comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, no município de Bagé (RS) que é uma região que passa por períodos recorrentes de estiagem, afetando o abastecimento e a agricultura. Uma das soluções encontradas para sanar este problema é a perfuração de poços tubulares. No município de Bagé ocorre um sistema aquífero fraturado, onde a locação de poços produtivos se torna mais complexa e a compreensão dos fatores que condicionam o sistema e o fluxo da água subterrânea se torna muito importante. Para atingir este objetivo foi realizada uma análise dos dados hidrogeológicos de 174 poços tubulares, processamento dos dados aeromagnéticos e caminhamentos eletromagnéticos. Para realizar a avaliação estrutural da área, foram identificados lineamentos magnéticos por meio da utilização dos diversos filtros, métodos de realce nos dados aeromagnéticos, disponíveis para o software Oasis Montaj da Geosoft. Também foi realizado coleta de campo de dados eletromagnéticos, com o equipamento o EM34 modelo XL da Geonics com o objetivo de confirmar e validar os dados dos lineamentos aeromagnéticos interpretados, sendo realizados 8 perfis de caminhada eletromagnético. Os resultados obtidos mostram que os aquíferos fraturados na região do município de Bagé se apresentam compartimentados, com diferentes produtividades e trends estruturais. 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 que estão associados a aquíferos fraturados.

Keywords

Crystalline Aquifer System;
Aeromagnetometry;
Structural Compartmentation and
Hydrogeology.

Revisão por pares.
Recebido em: 08/06/2022.
Aprovado em: 25/01/2023.

Abstract

This paper presents the evaluation study of the hydrogeological behavior of the Crystalline Base Aquifer System, in the municipality of Bagé (RS), which is a region that experiences recurrent periods of drought, affecting supply and agriculture. One of the solutions found to remedy this problem is the drilling of tubular wells. In the municipality of Bagé, there is a fractured aquifer system, where the location of productive wells becomes more complex and the understanding of the factors that condition the system and the groundwater flow becomes very important. To achieve this objective, an analysis of the hydrogeological data of 174 tube wells, processing of aeromagnetic data and electromagnetic paths was carried out. In order to carry out the structural evaluation of the area, magnetic lineaments were identified through the use of different filters, enhancement methods in aeromagnetic data, available for Geosoft's Oasis Montaj software. Field collection of electromagnetic data was also carried out, with the equipment the EM34 model XL from Geonics, with the objective of confirming and validating the data of the interpreted aeromagnetic lineaments, being carried out 8 profiles of electromagnetic path. The results obtained show that the fractured aquifers in the region of the municipality of Bagé are compartmentalized, with different productivity and structural trends. The main aquifer structures occur in the NW direction, secondarily to the NE, and with an accentuation of their productivity when associated with crossings of structures, both to the NW and NE. The integrated interpretation of aerial and terrestrial data allowed recognizing the hydrogeological and structural behavior of the Crystalline Basement Aquifer System, where the results, presented in georeferenced maps, show the main zones and trends that are associated with fractured aquifers.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30147>

1. INTRODUÇÃO

A porção meridional do Estado do Rio Grande do Sul passa por recorrentes períodos de estiagem, com isso prejudicando o abastecimento público e o desenvolvimento de atividades agrícolas, industriais e comerciais. Para solucionar esse problema, nas áreas municipais que em geral tem o abastecimento urbano realizado por empresa pública, a busca por água ocorre por meio da perfuração de poços tubulares. Nas áreas rurais, a solução encontrada é feita de forma individual ou coletiva, por meio da perfuração de poços tubulares ou através da captação da água da chuva e de nascentes. Desta forma, a realização da locação de poços com maior conhecimento da comportimentação das estruturas, que ocorrem em aquíferos fraturados, permite que sejam obtidos poços com maior produtividade que poderão atender a demanda existente na região.

O abastecimento por poços tubulares, no município de Bagé, esta relacionado com o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, que é caracterizado por aquíferos fraturados que estão associados às litologias do Complexo Granítico-Gnáissico Bagé (TAMBARA, 2013). Conforme Machado e Freitas (2005), os aquíferos desse sistema estão associados às estruturas tectônicas que cortam as rochas graníticas e metamórficas (gnaisse e filitos), sendo que a circulação e o armazenamento da água estão condicionados à ocorrência dessas estruturas. Em geral, esses aquíferos apresentam capacidade específica inferior a 0,5 m³/h/m, sendo que nas áreas de ocorrência de rochas graníticas, as águas podem estar enriquecidas em flúor.

Os poços perfurados no Complexo Grano-Gnáissico em Bagé, apresentam baixa produção, sendo que muitos desses poços são locados e perfurados sem estudos prévios, bem como em regiões onde há pouco conhecimento sobre os condicionantes geológicos e estruturais dos aquíferos existentes na área (DAEB, 2018).

O estudo sobre os condicionantes geológicos e estruturais de aquíferos fraturados pode ser realizado com base na avaliação de dados geológicos, estruturais e hidrogeológicos. De acordo com Fernandes et al. (2008) a identificação e avaliação de estruturas geológicas consiste num dos principais fatores.

Nesse contexto, a análise e interpretação de dados aeromagnéticos em estudos hidrogeológicos, tem se mostrado eficiente, principalmente, na identificação de estruturas geológicas. Diversos autores realizaram estudos semelhantes utilizando dados de aeromagnetometria, como por exemplo, Hewaidy et al. (2015), Ranganai et al. (2017) e Bongjolo et al. (2014). Neste último, os autores utilizaram mapas aeromagnéticos no estudo da conectividade e compartimentação magnético-estrutural dos Sistemas Aquífe-

ros Serra Geral e Guarani no centro do estado do Paraná. Os autores, com base na interpretação de estruturas de subsuperfície (lineamentos magnéticos) e de superfície (lineamentos SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*), realizaram a identificação de novas estruturas com direções NW e EW.

O presente estudo teve por objetivo realizar uma análise e interpretação de lineamentos magnéticos visando a identificação de estruturas condicionadoras dos aquíferos fraturados, bem como de regiões mais favoráveis a locação dos poços. Essa avaliação foi realizada com a integração dos dados aeromagnéticos, eletromagnéticos e hidrogeológicos (capacidade específica e vazão). Com base nos resultados obtidos foi possível avaliar os locais com maior potencial hidrogeológico que possuem relação com poços que apresentam maior produtividade.

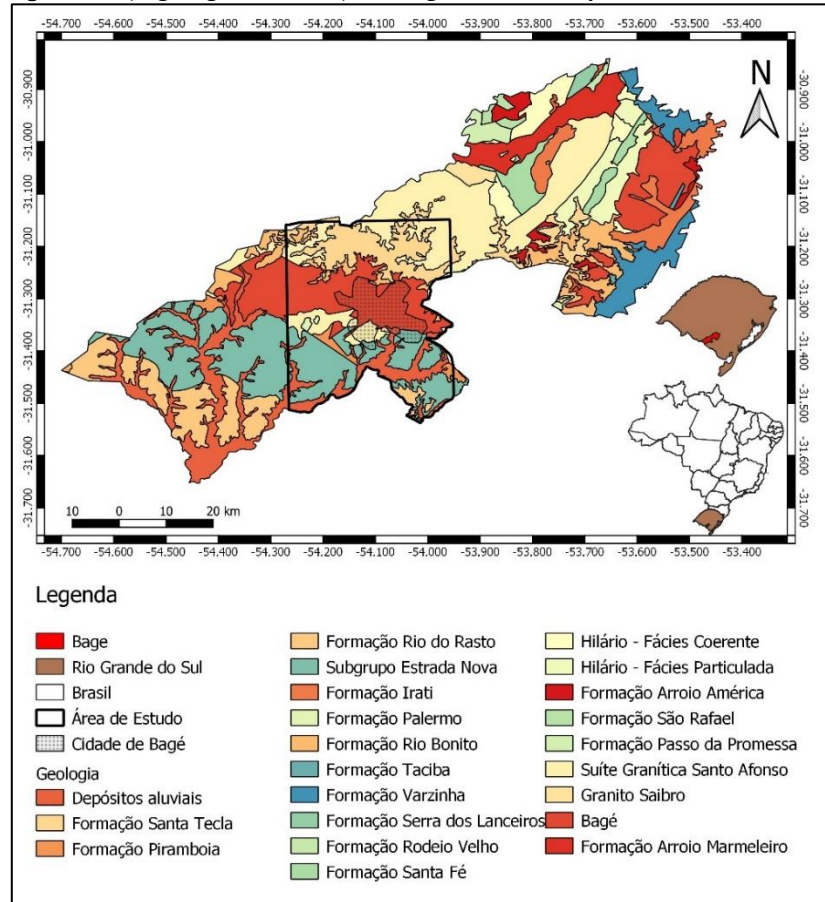
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Bagé está localizado na região sudoeste do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas 31° 19' 31" de latitude Sul e 54° 06' 25" de longitude oeste, apresenta uma área de 4.095,5 km² e uma população 116.794 habitantes. A economia da região está centrada principalmente na agricultura, na pecuária, e no desenvolvimento de atividades industriais (predominantemente do benefício de laticínios) e comerciais (PREFEITURA MUNICIPAL DE BAGÉ, 2023).

Conforme Camozzato et al. (2014) a região de estudo é composta pelo Complexo Granítico-Gnáissico Bagé (ortognaisse e granitóides monzo a granodioríticos foliados, com megaxenofilitos de rochas supracrustais) e a Formação Santo Afonso (granodioritos e monzogranitos dominantes, com sienogranitos e tonalitos subordinados) (Figura 1). Também há ocorrência de rochas sedimentares que estão associadas as formações geológicas Rio Bonito, Palermo, Irati e Santa Tecla, bem como Depósitos aluviais (FREITAS, 2010).

De acordo com Trainini et al. (2005), a hidrogeologia da região de estudo é caracterizada pela ocorrência do Aquífero Eo-Proterozóico (poços secos ou com vazões insignificantes), do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (aquíferos limitados de baixa possibilidade para ocorrência de água subterrânea), dos Aquíferos Permianos e do Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito. Esse último sistema, é considerado como aquíferos com baixa a média possibilidade para ocorrência de água subterrânea, sendo que as capacidades específicas são inferiores a 0,5 m³/h/m e as salinidades variam entre 800 e 1500mg/l (em grandes profundidades as águas podem apresentar sólidos totais dissolvidos superiores a 10.000 mg/l). Em função disso, o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino passa a ser o principal sistema, que é utilizado na região.

Figura 1 - Mapa geológico, do município de Bagé, com a localização da área de estudo



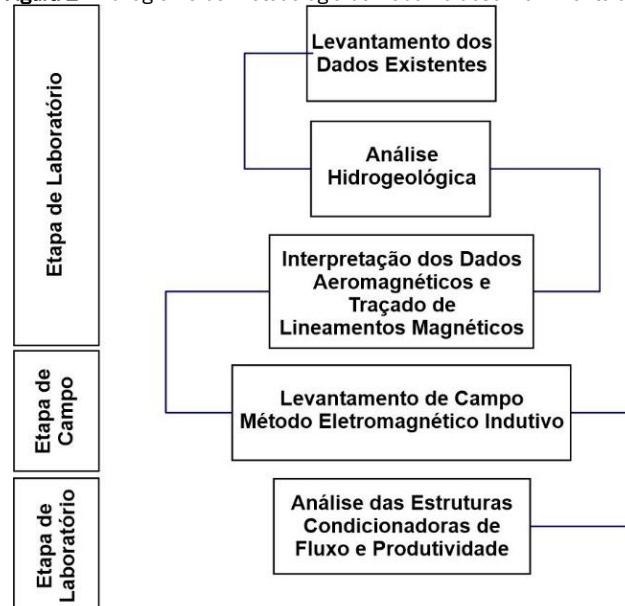
Fonte: Adaptado de CPRM (2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades e métodos, desenvolvidas e empregados nesse estudo, estiveram relacionadas com levantamentos de dados existentes, análises hidrogeológicas, interpretação dos dados aeromagnéticos, traçado de lineamentos magnéticos e

análise das estruturas condicionadoras de fluxo e produtividade dos poços, sendo que as mesmas são apresentadas no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo



A avaliação hidrogeológica foi realizada com base na obtenção, análise e interpretação de dados de poços tubulares existentes na região. A identificação e cadastro de poços foi feita com as informações do Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (DRH/SEMA), Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN), Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e empresas de perfuração (Hidrogeo e Georepp). Nesse levantamento foram identificados 257 poços tubulares, sendo que 174 destes poços possuíam dados do perfil geológico e construtivo, bem como teste de bombeamento. A análise hidrogeológica foi realizada tendo como base os dados de hidrogeologia (vazão e capacidade específica) que foram cruzados com as informações da geologia (CPRM, 2013).

Os dados utilizados para a análises e processamentos aerogeofísicos foram obtidos no Projeto Estudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), composto por 633 linhas de voo (N-S) e 34 linhas de controle na direção EW, perfazendo um total de 159.789,21 km de perfis e abrangendo uma área de 75.000 km² na região sul do estado.

A extração dos lineamentos a partir dos dados aerogeofísicos, foi realizada com base nos dos dados disponíveis no formato GDB´s (*Geosoft Database*) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Estes dados reúnem as informações de posicionamentos corrigidos e os demais canais já ajustados dos dados, registrados em equipamento instalado na aeronave.

Os dados aeromagnéticos foram extraídos do campo magnético principal *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), interpolados em uma grade regular de 100m de tamanho de célula (1/4 do espaçamento original das linhas de voo) e utilizando o interpolador pelo método Bi-Direcional (GEOSOFT, 2013).

Para a geração dos *GRIDS*, da análise estrutural, os dados passam pelo processo de “continuação para cima”, simulando aquisição dos dados a uma altitude mais elevada dos dados

originalmente adquiridos, neste caso 500m. Este procedimento é realizado para remover ou minimizar os sinais de fontes rasas e ruídos, tornando assim os produtos mais passíveis de uma interpretação que corresponda a realidade da área estudada (GEOSOFT, 2013; CASTRO *et al*, 2018).

Para a interpretação das anomalias magnéticas associáveis a lineamentos foram utilizados os diversos métodos de realce. Os métodos de realce gerados foram Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Derivada Vertical (GZ), a partir do mapa de anomalias magnéticas de Redução ao Polo Continuado para Cima 500 metros. Os lineamentos foram interpretados seguindo a metodologia tradicional (FERREIRA *et al.*, 2010; CASTRO, 2014; PEREIRA; FERREIRA, 2018), onde são marcados os lineamentos correspondentes aos maiores valores magnéticos.

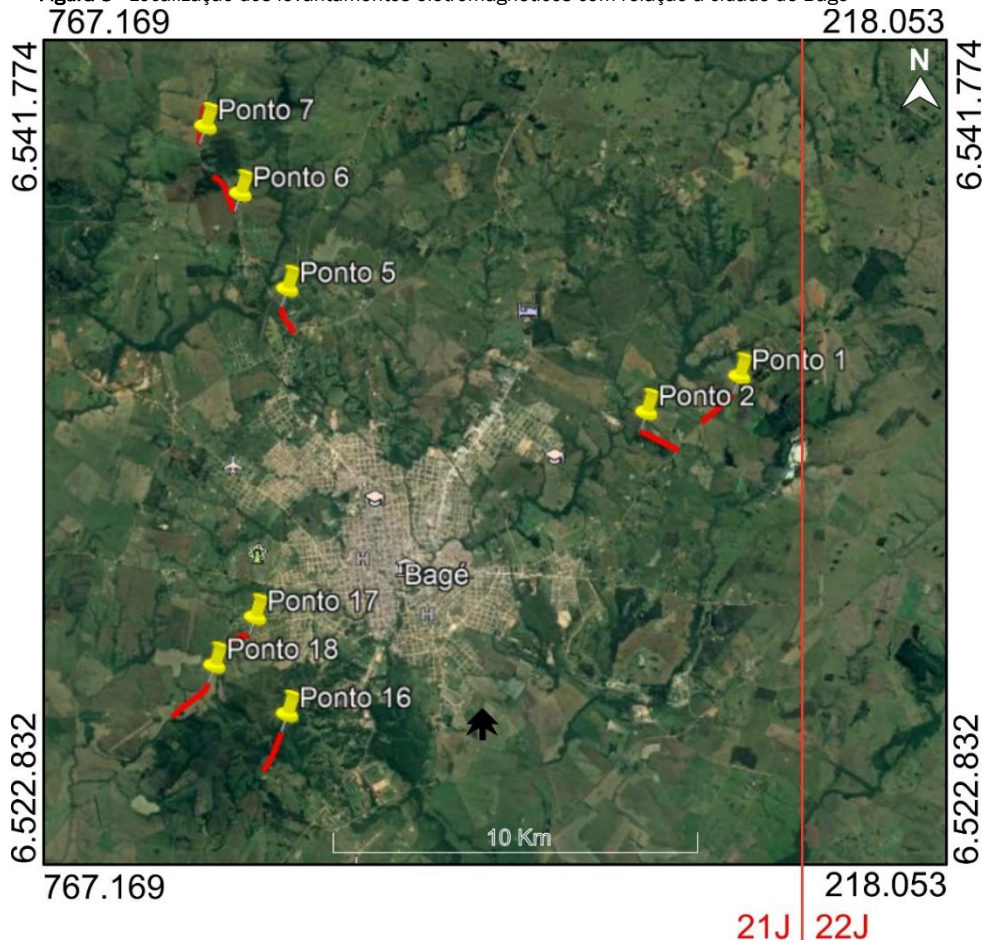
O método eletromagnético (ou de indução) empregado utiliza campo eletromagnético gerado por corrente alternada de origem artificial, em que uma bobina transmissora Tx energizada com corrente alternada colocada sobre um terreno (assumido como uniforme) e uma bobina receptora Rx posicionada a uma curta distância, 40 metros entre bobinas. Esta corrente gera um campo magnético secundário Hs que é captado, juntamente com o campo primário Hp na bobina receptora. A relação entre os campos magnéticos secundário e primário fica linearmente proporcional à condutividade do terreno, rochas em subsuperfície, tornando possível a leitura direta das condutividades medindo-se esta relação.

Para o levantamento eletromagnético (método Slingram), foi realizado um levantamento de campo, em que o equipamento utilizado na coleta de dados foi o EM34 modelo XL da Geonics, composto de duas bobinas, uma transmissora e outra receptora, com distância entre bobinas de 40m e uma frequência de 400Hz, sendo realizados 8 levantamentos (Figura 3). As coletas foram realizadas com as bobinas na posição vertical e horizontal, com profundidade de exploração, respectivamente, de 30 e 60m (Tabela 1).

Tabela 1 - Profundidades teóricas de exploração, do equipamento EM-34, e o espaçamento entre bobinas

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

Figura 3 - Localização dos levantamentos eletromagnéticos com relação a cidade de Bagé



Fonte: Imagem retirada do Google Earth.

A análise das estruturas condicionadoras de fluxo e produtividade dos poços, 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 existência de diferentes estruturas e produtividades dos poços tubulares.

4. RESULTADOS

4.1. Análise Hidrogeológica

A análise hidrogeológica foi realizada com base no banco de dados montado a partir das informações disponíveis e sintetizados na Tabela 2, assim apresentando o comportamento geral do sistema aquífero.

Tabela 2 - Caracterização geral dos poços tubulares profundo ocorrentes na área de estudo

	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Desvio Padrão
Profundidade Final (m)	200	15	75,12	71,50	34,81
Nível Estático (m)	80	1	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 (m³/h/m)	13,64	0,01	0,724	0,16	1,94
Vazão (m³/h)	30	0,13	4,122	2,90	4,27

Fonte: Dados retirados do Siagas, Corsan, Daeb e empresas particulares.

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 de nível estático evidencia que a água que circula pelos aquíferos fraturados, na área de estudo, está localizado mais próximo da superfície, conforme pode ser observado nos valores de média (8,56m) e mediana (6,55m).

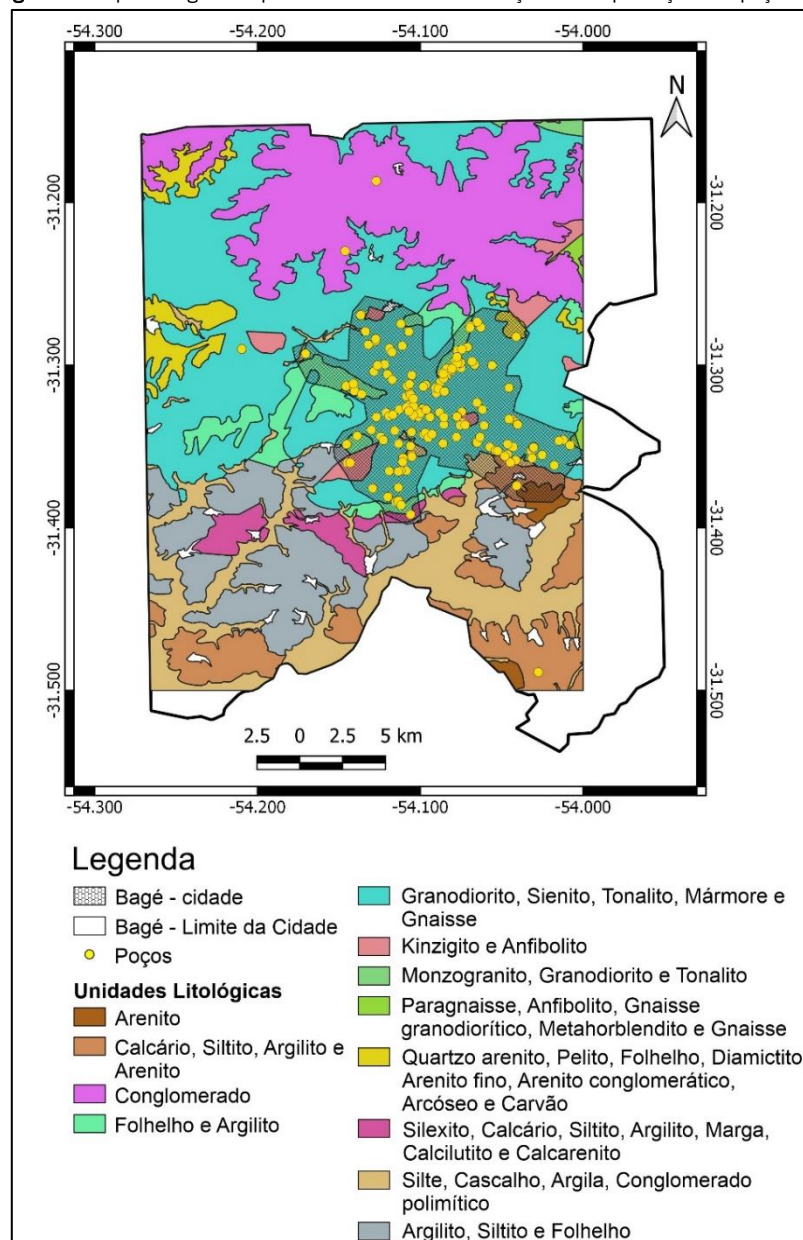
A avaliação dos dados gerais de capacidade específica, indica a ocorrência de valores muito diferentes, com variação entre 0,01 m³/h/m a 13,64 m³/h/m. Essa variação acaba tendo reflexo nos valores de média e desvio padrão, por isso a mediana acaba refletindo melhor a produtividade do aquífero. Além disso, 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 Machado e Freitas (2005), Fernandes (2008) e Gofferman et al. (2015).

4.2. Análise das Unidades Hidrolitológicas

Para essa análise foi gerado o mapa de unidades hidrolitológicas (Figura 4) que foi cruzado com os dados de poços apresentados na Tabela 3.

Figura 4 - Mapa litológico simplificado utilizado na correlação com a produção dos poços



Fonte: Adaptado de CPRM (2013).

Tabela 3 - Dados de produtividade dos poços por unidades hidrogeológicas

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

Fonte - Dados retirados do Siagas, Corsan, Daeb, empresas particulares e CPRM (2013).

As rochas Granodiorito, Sienito, Tonalito, Mármore e Gnaiss comportam 148 poços (Tabela 3) que apresentam uma produtividade mediana de 0,162 m³/h/m, mas com um valor acima da mediana geral do banco de dados, de 0,16 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 3) 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 3) e com uma produtividade mediana de 0,1360 m³/h/m, mas com um valor abaixo da mediana geral do banco de dados e com mediana do número de entradas d'água igual a 1.

As rochas Calcário, Siltito, Argilito e Arenito comportam 4 poços (Tabela 3) e com uma produtividade mediana de 0,1390 m³/h/m, mas com um valor abaixo 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 3) e com uma produtividade mediana de 0,1515 m³/h/m, mas com um valor abaixo 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 hidrogeológica da área de estudo.

As rochas Silexito, Calcário, Siltito, Argilito, Marga, Calcilutito e Calcarenito, comportam 1 poço (Tabela 3) e com mediana do número de entradas d'água é de 1. Também as rochas Quartzo arenito, Pelito, Folhelho, Diamictito, Arenito fino, Arenito conglomerático, Arcóseo e Carvão comportam apenas 1 poço (Tabela 3), mas sem as informações de produtividade e entradas d'água.

A unidade de rochas Granodiorito, Sienito, Tonalito, Mármore e Gnaiss, que engloba um número maior 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.

4.3. Análise de Lineamentos Aeromagnéticos

Nos mapas de realce dos dados aeromagnéticos foram identificados um total de 6.463 lineamentos, para a área de estudo. Os resultantes destacaram as estruturas regionais magnéticas-estruturais na escala 1:430.000. Os resultados dos mapas estão apresentados na Tabela 4 e nas Figuras 5 a 8.

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 (Linha tracejada, Figura 5), interceptada por estrutura regional e produzindo deslocamento lateral do lineamento interpretado.

Tabela 4 - Quantidade de lineamentos interpretados, a partir mapas aeromagnéticos, e as principais orientações observadas

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 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

Figura 5 - Mapas aeromagnéticos com os traçados dos lineamentos magnéticos. Em A - MAGIGRF, B - POLO com continuação para cima de 500m, C - Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e D - Inclinação do Sinal Analítico (ISA)

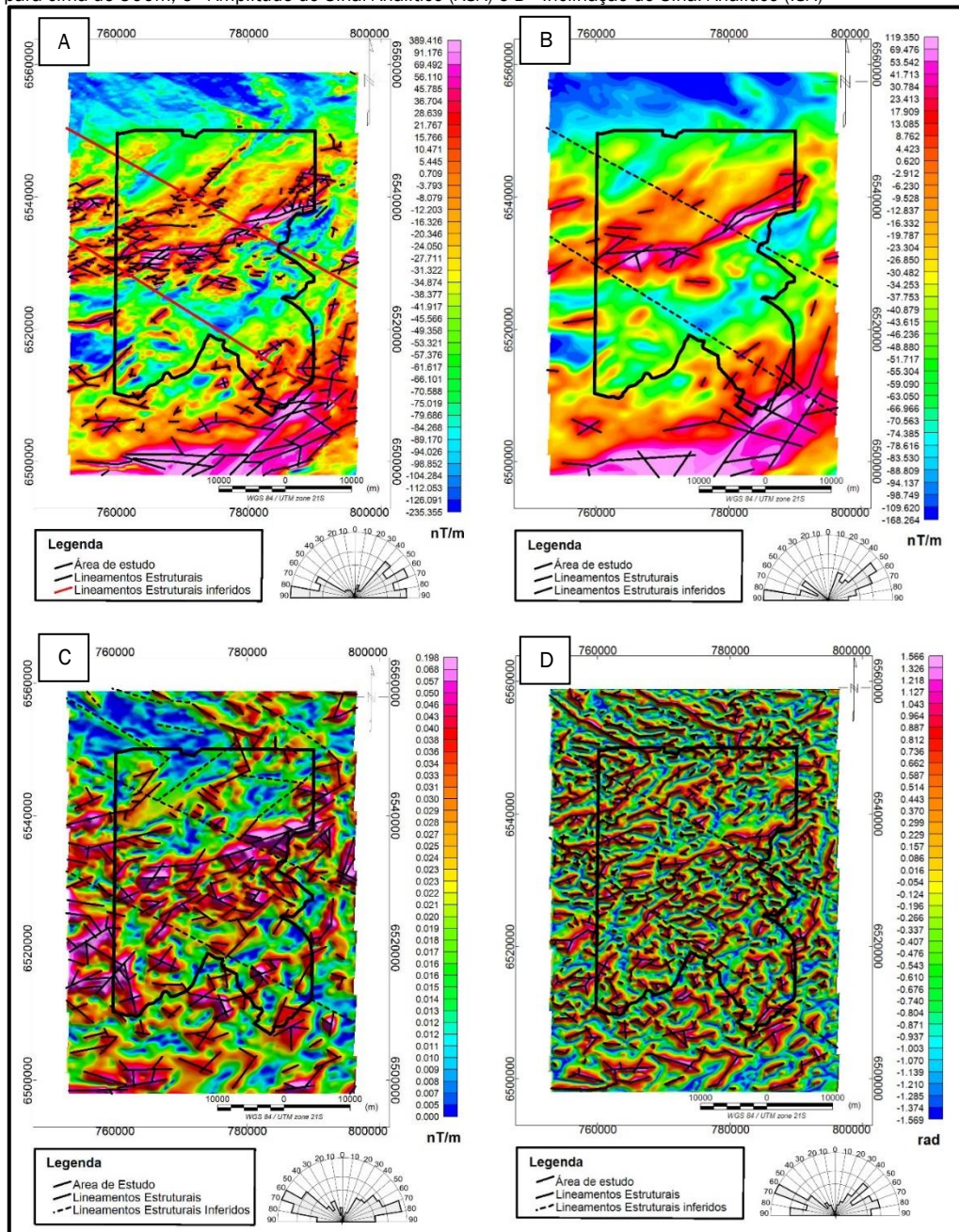


Figura 6 - Mapas aeromagnéticos com os traçados dos lineamentos magnéticos. Em A - Mapa do Gradiente Horizontal em X (GX), B - Mapa do Gradiente Horizontal em Y (GY), C - Mapa do Gradiente Vertical em Z (GZ) e D - Mapa do Gradiente Horizontal Total (GHT)

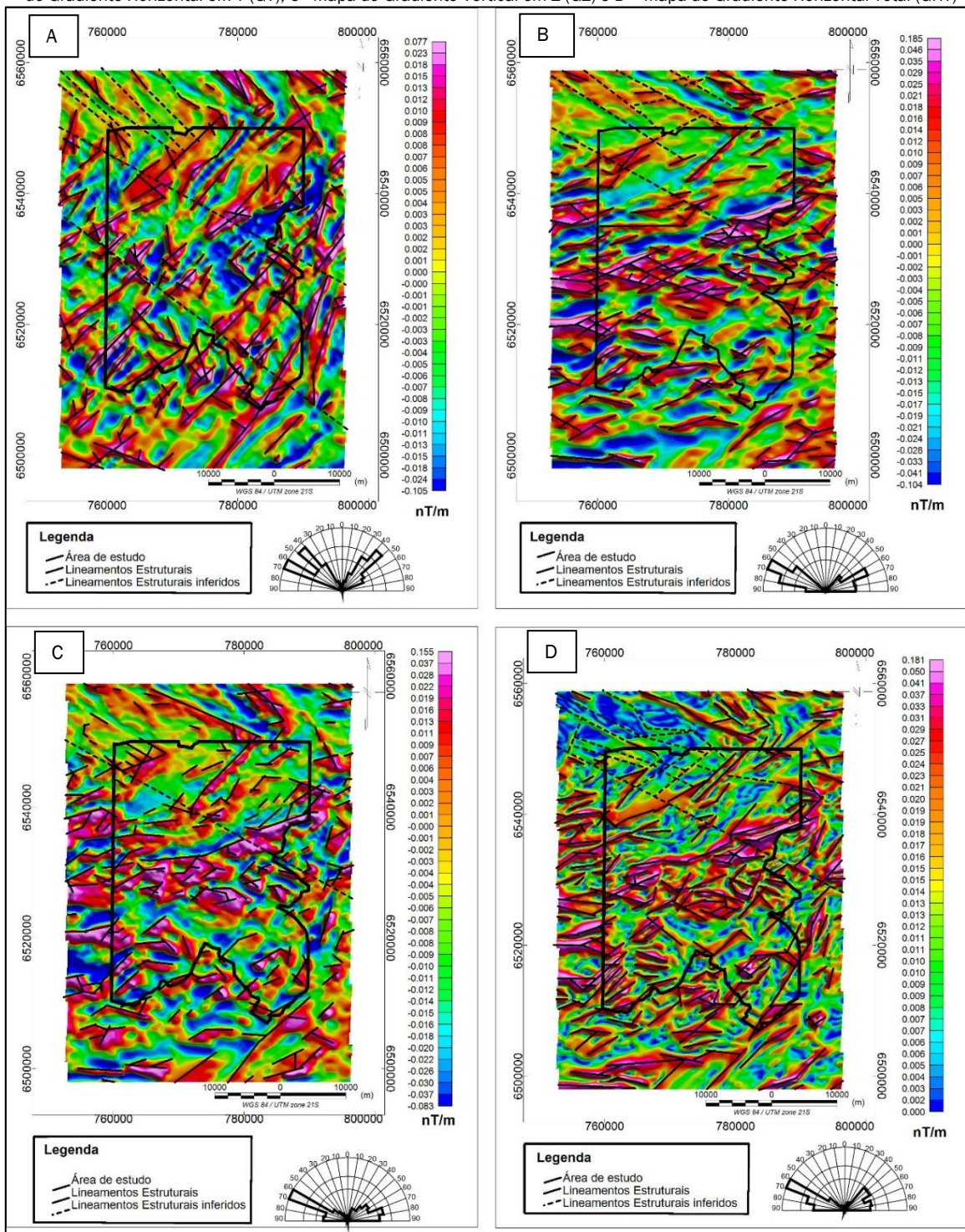
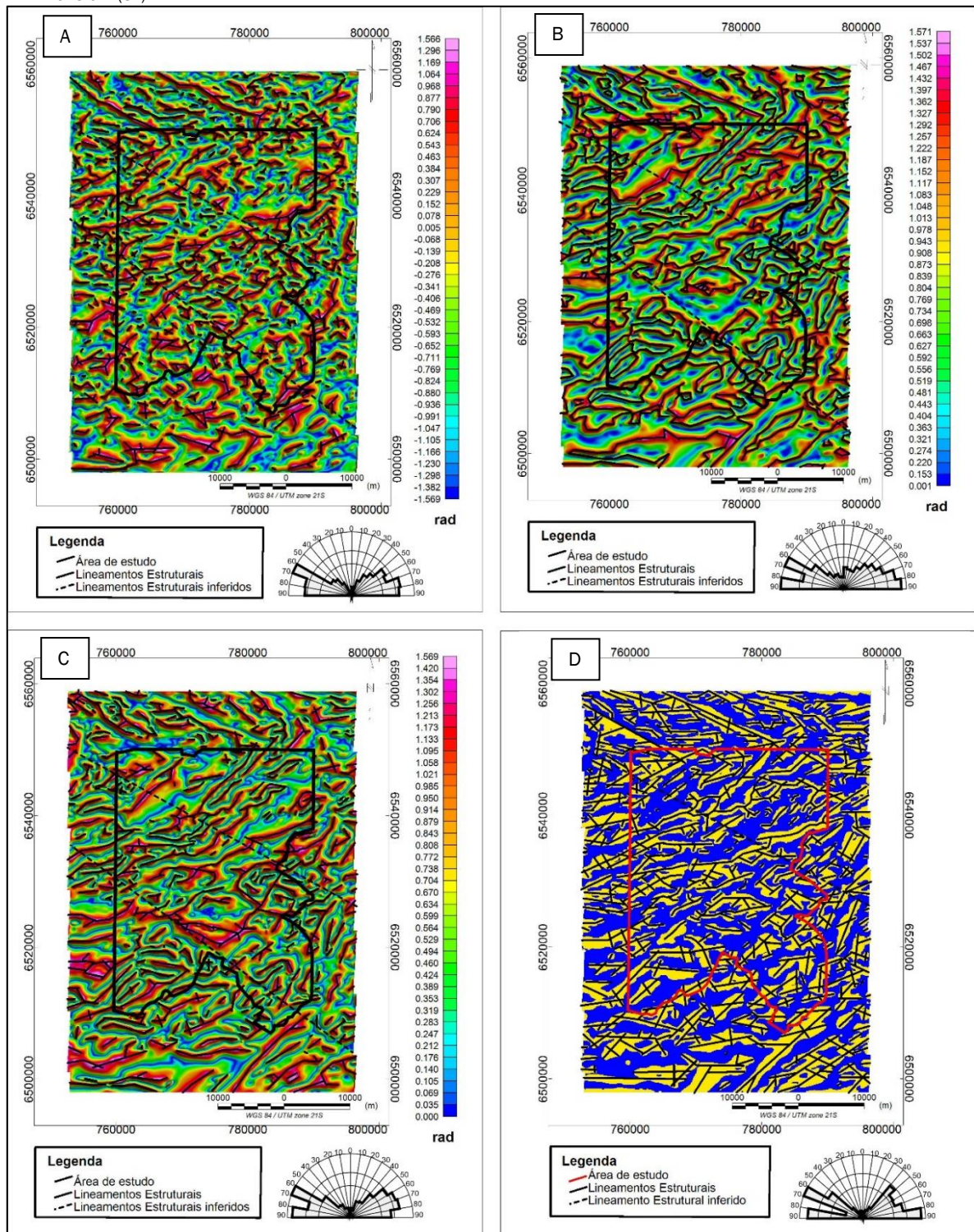


Figura 7 - Mapas aeromagnéticos com os traçados dos lineamentos magnéticos. Em A - Mapa da Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA_GHT), B - Mapa da Inclinação do Gradiente Horizontal Total (IGHT), C - Mapa THETA MAP e D - Mapa do Signal Transform (ST)



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 9. Fica evidente a distribuição homogênea nas estruturas na direção NE e NW.

Figura 8 - Mapas aeromagnéticos com os traçados dos lineamentos magnéticos. Em A - Mapa da Inclinação do Sinal Analítico Somado a Inclinação do Gradiente Total (ISA+IGHT) e B - Mapa da Inclinação do Sinal Analítico Subtraído da Inclinação do Gradiente Total (ISA-IGHT)

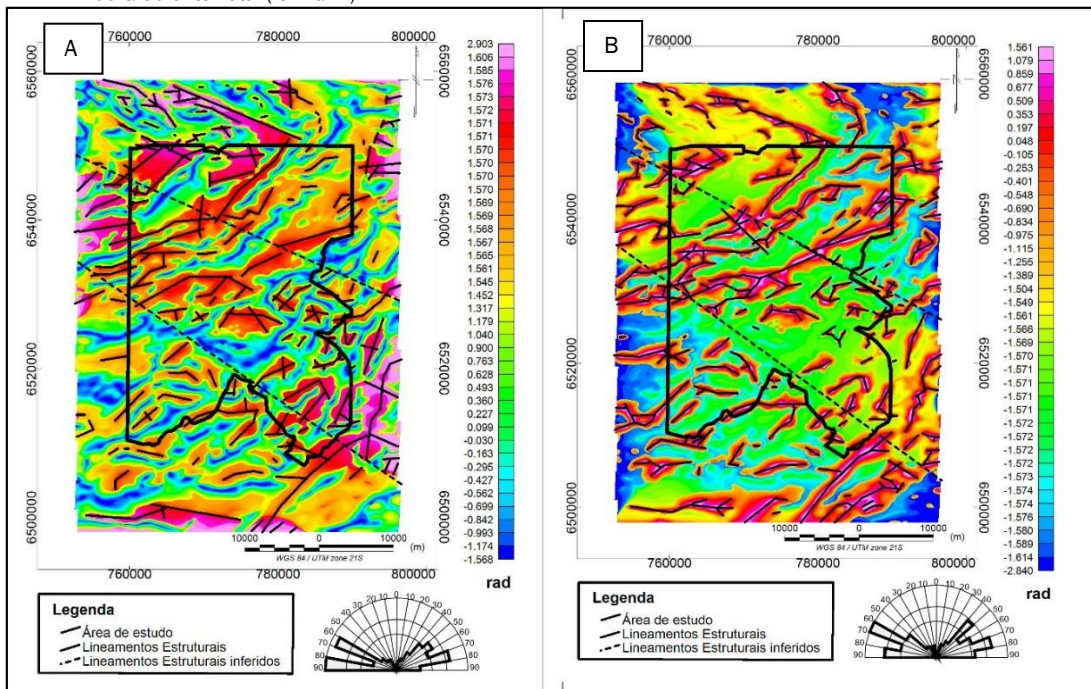
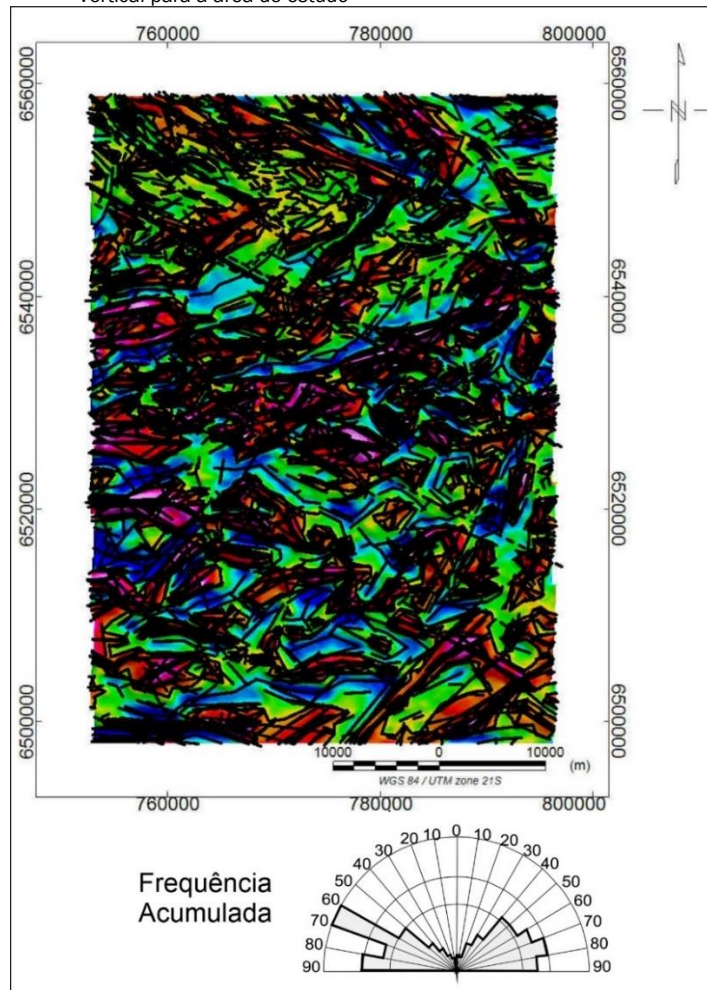


Figura 9 - Mapa do Arcabouço magnético/estrutural geral sobre o mapa da Derivada Vertical para a área de estudo



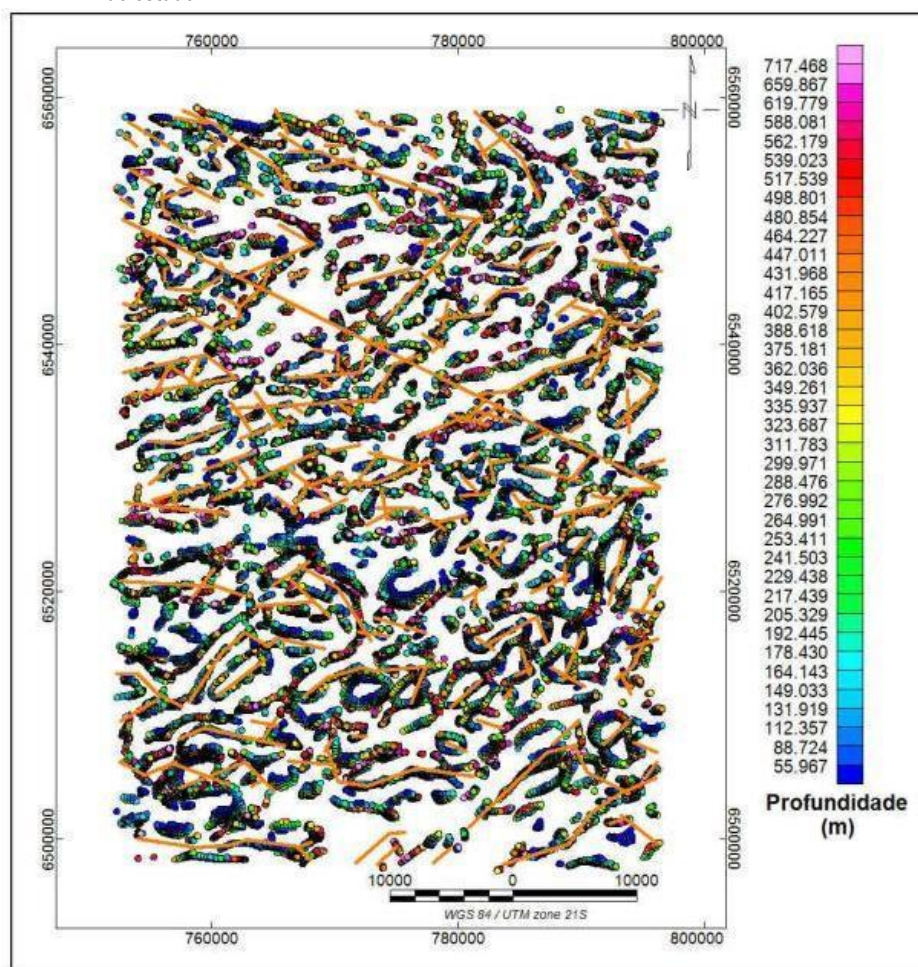
O método da deconvolução de Euler, também (Figura 10), permitiu estimar a profundidade do topo das principais fontes magnéticas. Assim, a comparação com os mapas gerados permitiu uma interpretação regional dos lineamentos magnéticos, estes associados às estruturas em subsuperfície e mapas aeromagnéticos, 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 10), pois este mostra uma visualização mais clara, 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.

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 profundidades das morfoestruturas (Figura 10). O mapa apresenta uma correlação positiva em relação aos lineamentos interpretados e aeromagnéticos, confirmando a sua existência e posição.

Figura 10 - Deconvolução de Euler relacionado com os lineamentos magnéticos do *grid ASA* para a área de estudo



4.4. Análise dos Dados do Levantamento Eletromagnético

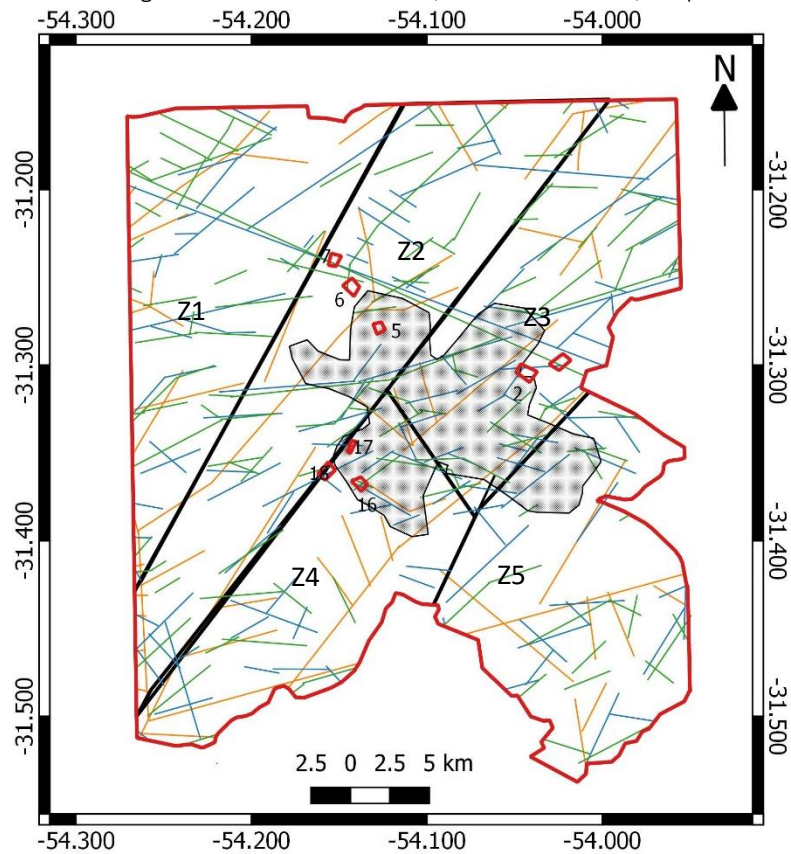
Foram realizados 8 perfis de caminhada eletromagnético em locais com estruturas interpretadas pela aeromagnetometria, relacionadas aos poços mais produtivos e de forma a abranger toda a área de estudo, quando possível.

Os 8 perfis de caminhada eletromagnético foram levantados (Figura 11) com o método *Slingram* de baixo núme-

ro de indução (LIN - *Low Induction Number*) e perfizeram um total de 7640m lineares de investigação. Com base nos resultados obtidos foram gerados 8 gráficos de dispersão da condutividade elétrica aparente (m/s) versus a distância (m) (Figura 12 a Figura 15).

Nas seções foi possível identificar as estruturas (linha tracejada) e correlacionar os valores de condutividade elétrica com os dados aeromagnéticos (Figura 11), relacionada com o sistema aquífero cristalino.

Figura 11 - Localização dos caminhamentos eletromagnéticos (quadrados vermelhos) com as estruturas aeromagnéticas e os lineamentos SRTM, na escala 1:500.000, interpretados



Legenda

- | | |
|--|---|
| Campo | Zonas |
| Área de Estudo | Zona 5 |
| Bage - cidade | Zona 4 |
| Lineamentos Eletromagnéticos | Zona 3 |
| — GZ | Zona 2 |
| — ASA | Zona 1 |
| Lineamentos SRTM | |
| — LINEAMENTOS 1:500.000 | |

As estruturas identificadas nas seções apresentam os altos valores de condutividade elétrica e estão relacionadas com uma (Figura 12 e Figura 15) ou mais fraturas (Figura 13 e Figura 15) ou uma zona fraturada (Figura 12 e Figura 13). Os

dados do Ponto 7 (Figura 14) se apresentam muito homogêneos, o que não oferece informações seguras para a interpretação de estruturas neste local amostrado.

Figura 12 - Perfil de condutividade elétrica dos Pontos 1 (A) e 2 (B)

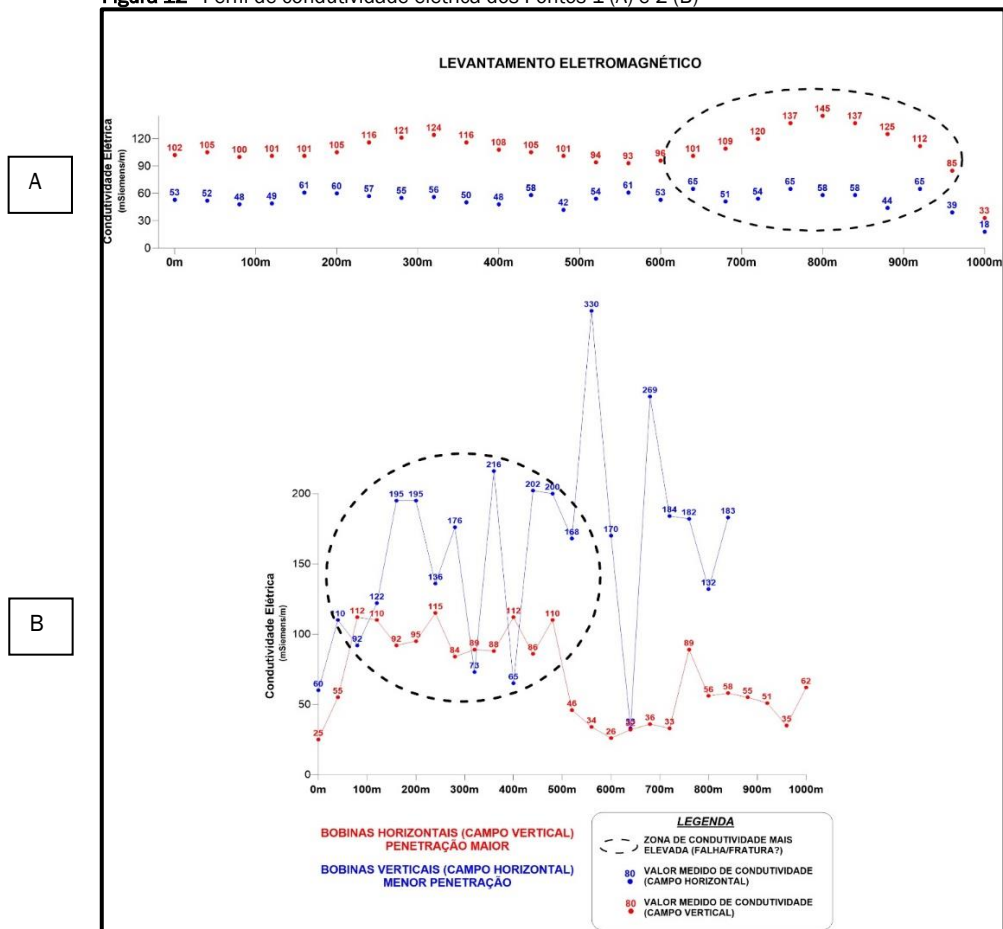


Figura 13 - Perfil de condutividade elétrica dos Pontos 5 (A) e 6 (B)

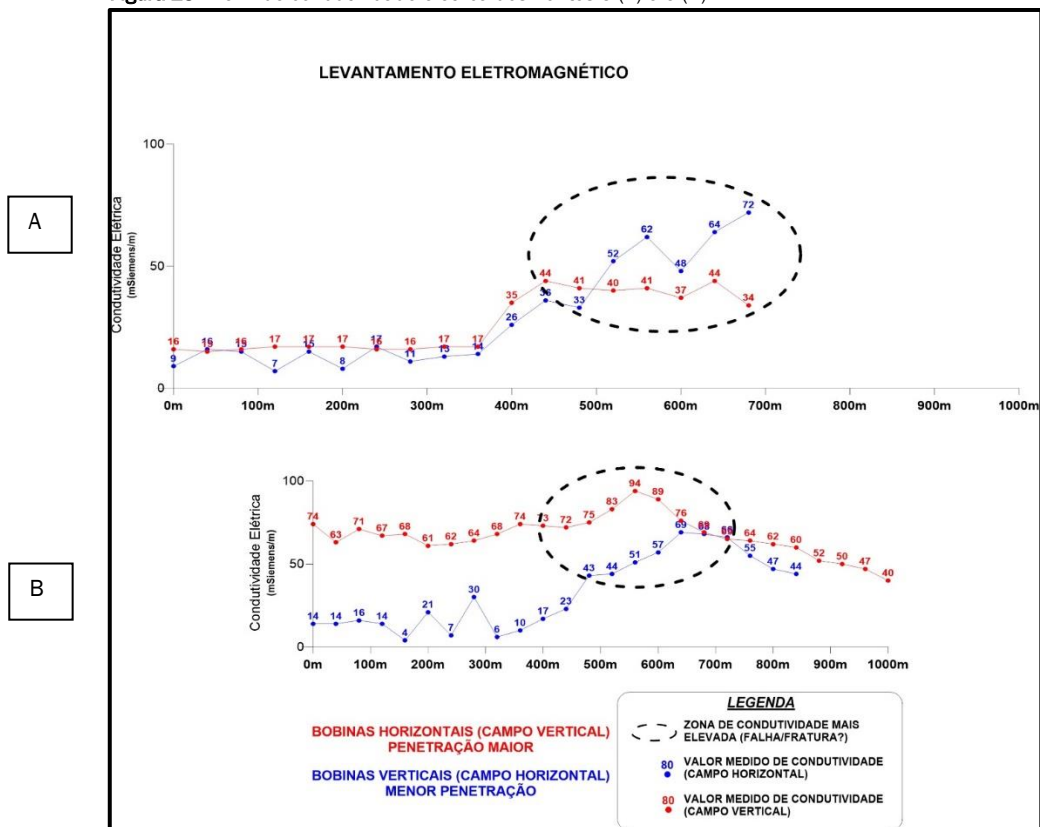


Figura 14 - Perfil de condutividade elétrica dos Pontos 7 (A) e 16 (B)

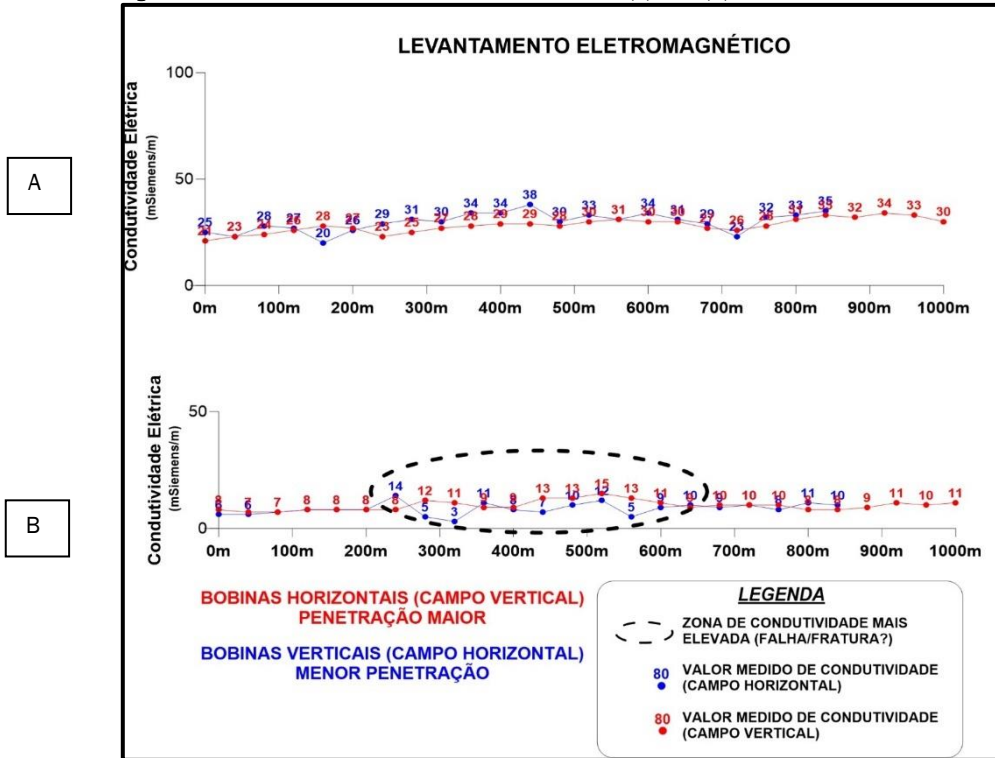
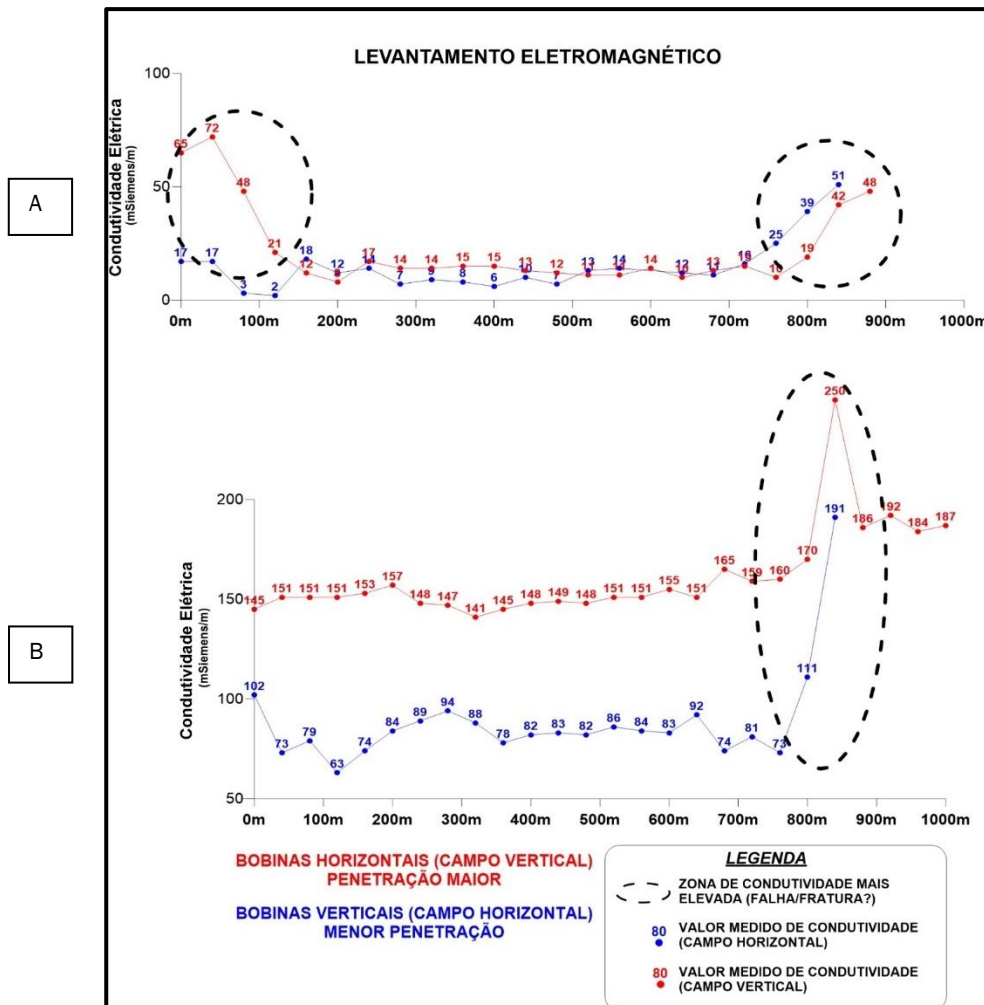


Figura 15 - Perfil de condutividade elétrica dos Pontos 17 (A) e 18 (B)



A direções das estruturas reconhecidas nos dados eletromagnéticos terrestre, relacionadas com aquelas interpretadas nos dados aeromagnéticos, que foram utilizadas como base para a campanha de campo, estão listadas na Tabela 5 complementada com uma relação sim-

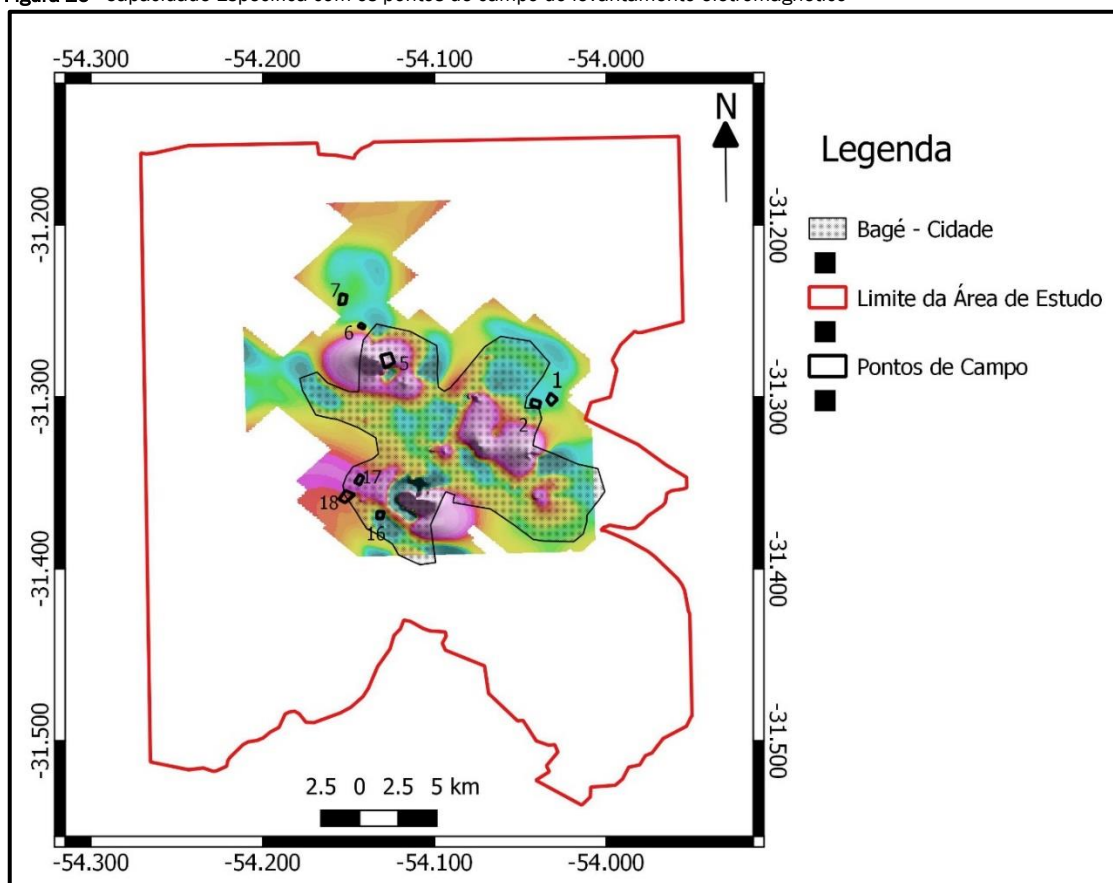
plificada da capacidade específica dos dados existentes.

O índice de capacidade específica simplificado atribuído a cada perfil, foram retirados da Figura 16.

Tabela 5 - Direção e mergulho das estruturas interpretadas nos perfis eletromagnéticos, com a capacidade específica simplificada para o local dos perfis

Perfil	Direção	Mergulho	Capacidade Específica (m ³ /h/m)
1	N60 - 70W	SW	Baixa (0,005 - 0,085)
2	N40 - 50E	NW	Baixa (0,005 - 0,085)
5	N70 - 80E	SE	Alta (0,283 - 6,933)
6	N50 - 60E	SE	Baixa (0,005 - 0,085)
7	NW	—	Média (0,087 - 0,265)
16	N60 - 70W	SW	Alta (0,283 - 6,933)
17	N80 - 90W	NE e SW	Alta (0,283 - 6,933)
18	N50 - 60W	SW	Média (0,087 - 0,265)

Figura 16 - Capacidade Específica com os pontos de campo do levantamento eletromagnético



4.5. Análise das Estruturas Condicionadoras de Fluxo e Produtividade

A partir da integração dos dados geológicos com dos dados coletados e processados, em softwares específicos, foi possível analisar as estruturas condicionadoras de fluxo e sua produtividade hidrogeológica para a cidade de Bagé.

Esta análise para a água subterrânea assume a segmentação do sistema aquífero em manto de alteração e embasamento cristalino fraturado, visto que a baixa capacidade específica

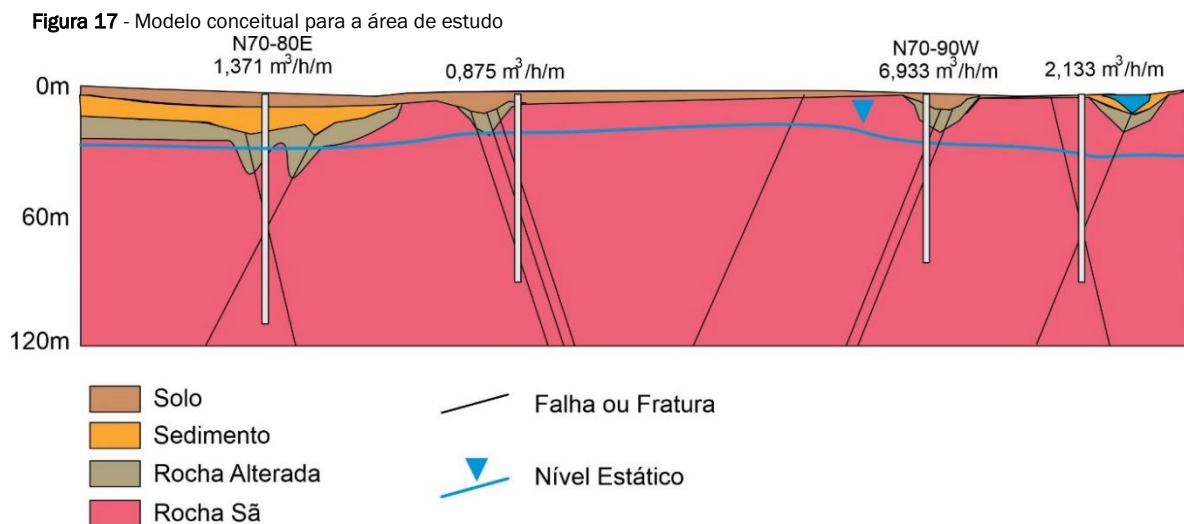
para a área passa por interferência direta da direção das estruturas armazenadoras e pela interceptação com estruturas de direção diferente das preferenciais.

As zonas mais fraturadas e as zonas de cisalhamento apresentam mais densidade de 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 estrutura provavelmente promoveu a abertura destas estruturas e 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 17.



5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta a integração dos dados hidrogeológicos, aeromagnéticos e levantamento eletromagnético de campo que permitiu compreender o controle estrutural hidrogeológico da área de estudo. A utilização desses dados, associado ao levantamento eletromagnético de campo, se mostraram muito eficientes para as correlações e interpretações das informações da água subterrânea em sistemas aquíferos fraturados.

Os dados aeromagnéticos processados nos diversos métodos de realce, interpretados como lineamentos magnéticos foram validados com os dados campo, apresentando uma boa correlação dos lineamentos magnéticos estruturais mapeados na escala utilizadas neste trabalho. Desta forma, estes dados forneceram um *trend* preferencial para as estruturas aquíferas na direção geral noroeste (N70-90W) e na direção nordeste (N70 - 80E).

Com relação a estruturas que estão associadas a poços mais produtivos, a área de estudo 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.

Os dados aeromagnéticos e os dados eletromagnéticos de campo, forneceram um conhecimento das características das

zonas hidrogeológicas, assim melhorando a compreensão da área e a realização de locações de poços com maior produtividade.

7. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) por todo o apoio no desenvolvimento da Tese de Doutorado, ao qual este artigo faz parte. Agradeço ao técnico Lenon Melo Ilha, da Unipampa Caçapava do Sul, e ao geofísico Henrique Garcia Pereira, da Universidade Federal do Paraná, por todo o auxílio de campo e no processamento dos dados geofísicos.

REFERÊNCIAS

- 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 of Paraná (Paraná Basin, Brazil). *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 32, n. 1, p. 141-160, 2014. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v32i1.402>
- CASTRO, F. R. *Arcabouço geofísico estrutural da Porção Meridional do Cinturão Ribeira e Regiões Adjacentes*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2014. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201520150007>
- CASTRO, F. R., OLIVEIRA, P. O., SOUZA DE J.; FERREIRA, F. J. F. Combining tilt derivative filters: new approach to enhance

magnetic anomalies. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 36, n. 3, p. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v36i3.1956>

CPRM – SIAGAS. Disponível em:

<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>.

Acesso em: 24 ago. 2018.

DAEB – Departamento de Água, Arroio e Esgoto de Bagé, Disponível em: <http://www.daeb.com.br/7/Agua.html>. Acesso em: 22 ago. 2018

FERNANDES, A. J. Aquíferos Fraturados: uma Revisão dos Condicionantes Geológicos e dos Métodos de Investigação. *Revista do Instituto Geológico*, v. 29, n. 1/2, p. 49-72, 2008. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20080005>

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 do sinal analítico. Parte I: Aplicação a dados sintéticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 4., 2010. [Anais...]. Brasília, SBGf, v.1, p. 1-6, 2010.

FREITAS, M. A. Recursos hídricos subterrâneos. In: Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, p. 71-87, 2010.

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*, v. 24, n. 3, p. 255–263, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.07.010>

GOFFERMAN, M., VIERO, A. P. ; SILVA, E. B. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS. *Pesquisas em Geociências*, v. 42, n. 3, p. 239-261, 2015.

<https://doi.org/10.22456/1807-9806.78123>

MACHADO, J. L. F., FREITAS, M. A. *Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul*: CPRM – projeto mpa hidrogeológico do Rio Grande do Sul, 2005. Escala 1: 750.000.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BAGÉ. Disponível em:

<https://www.bage.rs.gov.br/index.php/o-municipio/economia-e-estatisticas/> .

Acesso em: 12 jan. 2023.

PEREIRA, B. M.; 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*, v. 36, n. 3, p. 1-14, 2018.

<https://doi.org/10.22564/rbgf.v36i3.1953>

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

<https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.911082>

TRAININI, D.R., MACHADO, J.L.F., FREITAS, M.A. *Mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul*: Escala 1: 750.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Porto Alegre, RS, 2005.