

Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

**Programa de Pós-Graduação em
Geociências Aplicadas e Geodinâmica –
PPGGAG/IG**

Dissertação de Mestrado N° 225

**Caracterização Geofísica Aerotransportada do Sistema
de Aquíferos Cristalinos Fraturados no Semiárido
Nordestino Brasileiro: Uma Contribuição ao
Conhecimento Hidrogeofísico em Região de Seca.**

Autor:

Gustavo Lopes Costa

Orientador:

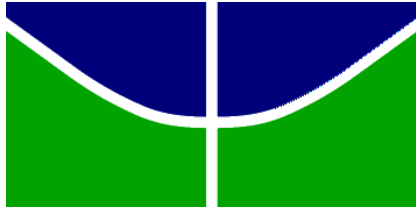
Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Co-orientador:

Profª. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Brasília-DF

Março de 2024.



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

**Programa de Pós-Graduação em
Geociências Aplicadas e Geodinâmica –
PPGGAG/IG**

Dissertação de Mestrado N° 225

Caracterização Geofísica Aerotransportada do Sistema de Aquíferos Cristalinos Fraturados no Semiárido Nordestino Brasileiro: Uma Contribuição ao Conhecimento Hidrogeofísico em Região de Seca.

Área de concentração: Geofísica Aplicada

Autor:

Gustavo Lopes Costa

Orientador:

Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Co-orientador:

Profa. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Banca Examinadora: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis
Prof. Dr. Elder Yokoyama
Prof. Dr. Cristobal Condori
Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

Brasília-DF

Março de 2024.

Ficha catalográfica elaborada
automaticamente, com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)

LG982c LOPES COSTA, GUSTAVO
Caracterização Geofísica Aerotransportada do Sistema de
Aquíferos Cristalinos Fraturados no Semiárido Nordestino
Brasileiro: Uma Contribuição ao Conhecimento Hidrogeofísico
em Região de Seca / GUSTAVO LOPES COSTA; orientador GIULIANO
SANT ANNA MAROTTA; co-orientador MONICA GIANNOCCARO VON
HUELSEN,. -- Brasília, 2024.
115 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Levantamento Eletromagnético Aerotransportado.
2. Hidrogeologia / Hidrogeofísica.
3. Modelagem 3D / Inversão.
4. Águas Subterrâneas.
5. Semiárido Nordeste Brasileiro.

I. SANT ANNA MAROTTA, GIULIANO , orient. II. GIANNOCCARO VON
HUELSEN, MONICA, co-orient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido força, sabedoria e resiliência ao enfrentar todos os desafios em minha jornada pessoal e acadêmica.

À Universidade de Brasília (UnB) e o Instituto de Geociências (IG) que foram locais de intensos aprendizados e momentos memoráveis.

À minha família: Pamella, Gabriella e Douglas, por estarem ao meu lado nos momentos de dificuldade e por me incentivar em meus sonhos e no amor pela ciência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Giuliano Sant Anna Marotta e minha co-orientadora, Profa. Dra. Mônica, pelo suporte e profissionalismo, pelos ensinamentos e conselhos valiosos.

Ao estimado colega, Marcos Queiroz, por sua contribuição a esta pesquisa desde a minha iniciação científica.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica pela oportunidade de desenvolvimento intelectual e profissional.

Ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (Obsis), pela disponibilização do espaço e ferramentas necessárias para a execução da pesquisa.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), por ceder os dados do PROASNE.

Ao projeto "Caracterização da sismicidade natural e desencadeada na região sudeste com base no monitoramento sísmico nas áreas de reservatórios de Furnas Centrais Elétricas e nos dados das estações da Rede Sismográfica Brasileira", pelo apoio financeiro na modalidade de Bolsa de Apoio Técnico à Pesquisa.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Agradeço a todos que contribuíram e me apoiaram, direta ou indiretamente.

SUMÁRIO

Agradecimentos	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	ix
Resumo	x
Abstract	xi
CAPÍTULO I	12
1 Introdução	12
1.1 Apresentação.....	12
1.2 Base de Dados.....	12
1.3 Objetivos da pesquisa	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
CAPÍTULO II	14
2 Geologia Regional	14
2.1 Província Borborema	14
2.2 Geologia Local – Maciço São José do campestre.....	15
CAPÍTULO III	17
3 Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos	17
3.1 Aquíferos Fissurais	17
CAPÍTULO IV	20
4 Fundamentação Teórica	20
4.1 Magnetometria	20
4.1.1 Introdução.....	20
4.1.2 Força Magnética	21
4.1.3 Correções e Reduções magnéticas.....	22
4.1.4 Correção da variação diurna (VD).....	22
4.1.5 Correção do IGRF (International Geomagnetic Reference Field).....	23
4.1.6 O Campo Magnético Anômalo e seus produtos de realce.....	23
4.1.7 Derivadas direcionais	24
4.1.8 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	25
4.1.9 Deconvolução de Euler.....	25
4.2 Eletromagnetometria	26
4.2.1 Introdução	26

4.2.2	Equações de Maxwell.....	26
4.2.3	Atenuação dos Campos Eletromagnéticos	28
CAPÍTULO V		29
Artigo 1 – Avanços na pesquisa em geofísica aplicada para levantamentos AEM com foco na prospecção de água subterrânea: Uma Revisão.....		29
<i>Article 1 - Advancements in Applied Geophysics Research for AEM Surveys with a focus on Groundwater prospecting: A Review</i>		<i>29</i>
CAPÍTULO VI.....		56
Artigo 2 – Caracterização Geofísica Aerotransportada de Sistemas de Aquíferos Cristalinos Fraturados na Região Semiárida do Nordeste Brasileiro: Avanços no Conhecimento Hidrogeofísico para Áreas sujeitas a Seca.....		56
<i>Article 2 - Aerogeophysical Characterization of Fractured Crystalline aquifers System in the Brazilian Northeastern Semiarid Region: Advancements in Hydrogeophysical Knowledge for Drought-Prone Areas.</i>		<i>56</i>
CAPÍTULO VII.....		97
Discussão & Conclusão da Dissertação		97
Referencias Bibliográficas		99
Anexo A – Publicações no Ambito da Pesquisa		108
Anexo B – Processos Computacionais de Inversão		110
Anexo C – Carta Geológica Maciço São José do Campestre.....		115

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Fluxograma de fases de trabalho realizadas no âmbito da pesquisa.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.1: Mapa simplificado da Orogênese Brasileira- Pan Africana; Província Borborema. Extraído e adaptado de Lira Santos & Caxito (2021).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.2: Folha geológica São José do Campestre (SB.25-Y-A-I)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.1: Estruturas que controlam a ocorrência de água subterrânea em rochas cristalinas: (a) juntas; (b) falhas e zonas de falha; (c) contatos geológicos; (d) superfícies de foliação (incluindo zonas de cisalhamento), quando intemperizadas. Os efeitos do intemperismo nas fraturas são indicados por traços mais grossos, próximos à superfície (Extraído de Feitosa et al., 2008).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.2: Poços inclinados e verticais interceptando planos de fraturas de alto ângulo e baixo ângulo. A vazão dos poços está diretamente relacionada ao número de planos de fraturas produtoras interceptados. (Extraído de Feitosa et al., 2008).</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.3 Condicionantes para o fluxo de fluidos ao longo de fraturas em rochas cristalinas (Extraído de Feitosa et al., 2008).</i>	<i>19</i>

Figura 3. 4: Sistema de bombeamento tectônico. As setas azuis indicam o fluxo de água (ou de outro fluido) e as setas em preto ou cinza representam tensões ou cinemática. Sítios de contração (C, onde ocorre expulsão da água) e de dilatação (D, acumuladores de água) em terminações e cotovelos (jogs) de falhas ativas. (Extraído de Feitosa et al., 2008) 19

Figura 4.1: (a) Aproximação do campo geomagnético por um dipolo inclinado em relação ao eixo de rotação da Terra. Os polos magnéticos reais não coincidem com o polo geomagnético do dipolo ou com os polos geográficos. GNP - polo norte geomagnético, GSP - polo sul geomagnético, ME - equador magnético, NP – polo norte geográfico e SP – polo sul geográfico. (b) Elementos que definem o campo geomagnético (F). VMI - intensidade magnética vertical; A direção do campo é definida pelos ângulos de inclinação (Inc) e declinação (Dec). Adaptado de Dentith & Mudge (2014). 20

Figura 5.1: Classificação dos países que publicaram artigos com o tema "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea". 33

Figura 5.2: Classificação dos periódicos que mais publicam artigos com o tema "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea". 34

Figura 5.3: Evolução do número de publicações X citações de artigos anualmente..... 35

Figura 5.4: Relação entre o número de publicações X número de citações para os 20 principais autores. 35

Figura 5.5: Frequência de palavras-chaves. 40

Figura 5.6: Mapa de rede de coautoria entre os autores dos artigos selecionados para o período de 2002 a 2023 (Fonte: Web of Science). A rede mais estruturada está centrada no pesquisador com mais publicações sobre o tema desta revisão sistemática da literatura (RSL). Linhas mais espessas indicam relações de citação direta e mais intensa entre os pesquisadores, enquanto linhas mais finas representam citação indireta e coautoria..... 41

Figura 5.7: A intensidade da rede de co-citação entre os autores que pesquisam o assunto em questão (Fonte: Web of Science). Nesta figura, destaca-se a intensidade da rede em torno do autor central Siemon, B. em relação aos outros pesquisadores. 41

Figura 5.8: Mapa de acoplamento bibliográfico: Principais pesquisas. 43

Figura 5.9: Mapa de densidade de citação: Principais pesquisas. Note a cores mais quentes para os artigos mais citados. 44

Figura 5.10: Mapa de acoplamento bibliográfico: Instituições Responsáveis. 46

Figura 5.11: Diagrama de rede com as principais palavras-chave extraídas dos resumos dos artigos. 48

Figura 6.1: Localização geográfica: A) Área de estudo (Serrinha – retângulo vermelho); B) Polígono das Secas (Semiárido Brasileiro - polígono rosa). 59

Figura 6.2: Mapa geológico e geomorfológico de Serrinha (adaptado de Dantas & Roig, 2013)..... 60

<i>Figura 6.3: Perfil geológico A-B. A foliação é representada pelas linhas tracejadas (vermelhas) e os poços de água subterrâneos perfurados representado pelos círculos (azuis; Adaptado de Dantas & Roig, 2013).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.4: O diagramal conceitual ilustra a formação de zonas de alteração, ocorrendo infiltração superficial pelas coberturas e o fluxo por meio de fraturas (adaptado de Feitosa et al., 2008).</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.5: Modelo Riacho-Fenda: Observa-se que as fraturas coincidem com o eixo da drenagem, ocorrendo conexão em ambos pela superfície e subsuperfície. (Extraído de Feitosa et al., 2008).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 6.6: Mapa Hidrogeológico de Serrinha (adaptado de Galvão Neto et al., 2022) 64</i>	
<i>Figura 6.7: A) Esquema simplificado do levantamento aeromagnético e HEM (Helicóptero Eletromagnético) com fonte artificial no domínio da frequência, conduzido por helicóptero sobre embasamento cristalino fraturado e regolito para investigar água subterrânea entre grãos e fendas. B) Sistema EM no domínio da frequência induz campos senoidais em diferentes frequências, distinguindo campos primários e secundários, computando a diferença entre campos medidos e calculados. O dado FDEM é representado como componentes “In-phase” (IP) e “ Out-of-phase” (ou Quadratura). (adaptado de Legault 2015).</i>	<i>66</i>
<i>Figura 6.8: Modelo digital de terreno em perspectiva 3D de Serrinha com exagero vertical 20X e sobreposto a hidrografia da área e Linha de alta tensão</i>	<i>71</i>
<i>Figura 6.9: Mapa Magnético e Geológico Integrado. A) Intensidade magnética Total - TMI B) Derivada de primeira ordem vertical - DZ C) Amplitude do Sinal Analítico - ASA do TMI D) Deconvolução de Euler - índice estrutural 1 do TMI.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 6.10: Domínios magnéticos de Serrinha com lineamentos magnéticos e diagrama de rosetas magnéticas para cada domínio magnético interpretado (MD-1; MD-2; MD-3; MD-4 e MD-5). Note a direção preferencial ajustada é representado pela roseta (verde).</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.11: A) Imagem em 3D, resultado da inversão magnética em valores de susceptibilidade (SI); B) Visão superior da isosuperfície com de valor 0,03 (SI) da susceptibilidade sobre a imagem ASA; C) Imagem em 3D, resultando da inversão magnética em valores de gradiente magnético (nT/s); D) Visão superior da isosuperfície de valor 0,03 nT/s sobre a imagem ASA.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.12: A) Imagem ASA B) Corte a 20 m, de profundidade do modelo inverso magnético obtendo a imagem 2D da susceptibilidade; C) Corte a -80 m do mesmo modelo inverso D) Corte a -180 m. Todos com sobreposição da geologia.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.13: Mapa do gradiente magnético integrado. A) Amplitude do Sinal Analítico e MVI para cortes em profundidade: B) 20 m C) -80 m D) -180 m.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 6.14: Seção da susceptibilidade magnética (L30060) extraído do modelo. Foi adicionado o ASA ao mapa de visão plana e soluções de euler na seção seguindo o sinal ASA. Note os limites dos aquíferos fraturado e poroso; contatos litológicos entre a secção e o perfil ASA.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.15: Seção MVI (L30060) extraído do modelo. Foi adicionado o ASA ao mapa de visão plana e soluções de euler na seção seguindo o sinal ASA. Note os limites dos aquíferos fraturado e poroso; contatos litológicos entre a secção e o perfil ASA.....</i>	<i>80</i>

<i>Figura 6.16: Mapa FDEM e geológico integrado. A) Anomalias condutivas (33 kHz); B) Anomalias condutivas (4.5 kHz); C) Anomalias condutivas (900 Hz); D) Imagem Ternária Multifrequência (CMY).</i>	<i>82</i>
<i>Figura 6.17: Domínios Condutivos de Serrinha e lineamentos condutivos com diagrama de rosetas condutivas para cada domínio condutivo (CD-1; CD-2 e CD-3). Note a direção preferencial ajustada é representada pela roseta (magenta) e intervalo de condutividade em ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nos poços perfurados.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 6.18: A) Imagem 3D da condutividade obtida pela interpolação das CDI's.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.19: Informação apriori: modelo condutivo 3 camadas.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.20: Modelo VOXI 3D da condutividade.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.21: Cortes em profundidade do modelo VOXI 3D da condutividade em 4 profundidades: 75 m; 65 m; 55 m e 45 m.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.22: Conductivity depth image (CDI) - L30060 sobreposto soluções de euler acompanhando o sinal ASA; Poços e perfís da condutividade para as 3 frequências nas geometrias coaxial e coplanar.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.23: Modelo de favorabilidade hidrogeológica 3D: A) Visão geral ao sul de Serrinha; B) Visão de topo sobreposto os contatos litológicos (Linha preta), hidrografia (Linha ciano) e poços (alvos verdes) ; C) Visão geral a suldeste de Serrinha com 45° de inclinação.....</i>	<i>90</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 5.1: 10 Artigos mais citados.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 6.1: Tabela de susceptibilidade magnética para diferentes tipos de rocha. (adaptado de Isles e Ranking, 2013).</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 6.2: Tabela de condutividade para diferentes tipos de condutores. Ênfase no intervalo de condutividade para água nos intertícios da rocha. (adaptado de Dentith et al. 2014).....</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 6. 3: Síntese dos resultados obtidos MAG & EM.</i>	<i>91</i>

RESUMO

A intensa seca que ocorre no Nordeste do Brasil, agrava diversos problemas existentes na região. Nesse cenário a escassez de água afeta desde a subsistência da população até o desenvolvimento socioeconômico com o plantio realizado em larga escala. As dificuldades na exploração de recursos hídricos, trouxe a necessidade da busca por uma forma de captação de água, através de poços d'água subterrâneos, sendo uma das formas mais utilizadas na região do semiárido brasileiro. O presente trabalho visa observar a relação e a eficácia da aplicabilidade de dados geofísicos aerotransportados na identificação de estruturas e delimitação de regiões com alta favorabilidade à retenção de água subterrânea. Assim, serão utilizados os dados do Projeto PROASNE-Brasil, liberado pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB-CPRM), tendo como objetivo melhorar as condições de vida na região nordeste do Brasil, provendo-a de soluções sustentáveis para os problemas causados pela seca sazonal. O PROASNE consistiu na aquisição de dados geofísicos aerotransportados obtidos por helicóptero (HEM) na região de Serrinha-RN. A magnetometria foi sensível ao delimitar contatos magnéticos e detectar estruturas de alto ângulo por meio da solução de Euler e Amplitude do Sinal Analítico. O levantamento utilizou a tecnologia de métodos eletromagnéticos, especificamente no domínio da frequência (FDEM), que se constitui em uma ferramenta potencial no mapeamento e distribuição dos recursos hídricos subterrâneos nos ambientes de embasamento cristalino. Foram obtidas imagens da condutividade aparente para três faixas de frequência nominal e discriminados os condutores rasos a profundos, além da elaboração das seções de condutividade pela profundidade (CDI) para as linhas de voo, para enfim gerar uma malha 3D Voxel da condutividade aparente de toda a área da pesquisa na região de Serrinha e posteriormente a inversão Voxel 3D dos dados de eletromagnetometria. As CDI's mostraram valores condutivos elevados próximos a poços tubulares perfurados e cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e estruturas geológicas mapeadas pelo SGB; foram detectadas zonas condutivas nos terrenos cristalinos mostrando relação direta da condutividade com a presença de água salinizada. Esta pesquisa mostra dois fatores primordiais: Os resultados obtidos tiveram êxito na identificação de estruturas e regiões em subsuperfície com alto potencial ao fluxo e armazenamento de água; a empregabilidade de técnicas de processamento aos dados eletromagnéticos aerotransportados mostrou um potencial na contribuição ao avanço da pesquisa hidrogeológica e hidrogeofísica da região semiárida brasileira, podendo se estender a outras áreas.

Palavras-Chaves: modelagem 3D; Inversão; Levantamentos Eletromagnéticos Aerotransportados; métodos FDEM; Semiárido Nordeste Brasileiro; Água-Subterrânea; Hidrogeologia, Hidrogeofísica.

ABSTRACT

The intense drought occurring in Northeast Brazil exacerbates various existing problems in the region. In this scenario, water scarcity affects everything from the subsistence of the population to socio-economic development, particularly large-scale agriculture. Difficulties in exploiting water resources have led to the need to search for a water capture method, and drilling of groundwater wells has become one of the most commonly used methods in the Brazilian semi-arid region. This study aims to observe the relationship and effectiveness of the application of airborne geophysical data in identifying structures and delimiting regions with high favorability for groundwater retention. The data from the PROASNE-Brazil Project, released by the Brazilian Geological Survey (SGB-CPRM), will be utilized for this purpose. The objective of PROASNE is to improve living conditions in the northeastern region of Brazil by providing sustainable solutions to problems caused by seasonal drought. PROASNE involved the acquisition of airborne geophysical data obtained by helicopter (HEM) in the Serrinha-RN region. Magnetometry was sensitive to delineating magnetic contacts and detecting high-angle structures through Euler's solution and Analytic Signal Amplitude. The survey used electromagnetic methods, specifically in the frequency domain (FDEM), which is a potential tool for mapping and distributing underground water resources in crystalline basement environments. Apparent conductivity images were obtained for three nominal frequency bands, distinguishing shallow to deep conductors. Depth-sliced conductivity sections (CDI) were generated for all flight lines to create a 3D Voxel mesh of the apparent conductivity for the entire research area in the Serrinha region. Subsequently, the 3D inversion of the electromagnetic data was performed using Voxi 3D. The CDIs showed elevated conductive values near drilled boreholes registered in the Groundwater Information System (SIAGAS) and geological structures mapped by the SGB. Conductive zones in crystalline terrains were detected, showing a direct relationship between conductivity and the presence of saline water. This research highlights two essential factors: the successful identification of structures and subsurface regions with high potential for water infiltration and storage; the application of processing techniques to airborne electromagnetic data has demonstrated potential in contributing to the advancement of hydrogeological and hydrogeophysical research in the Brazilian semi-arid region, with potential applicability to other areas.

Keywords: 3D modelling; Inversion; airborne electromagnetics; FDEM methods; Brazilian Semiarid Region; Groundwater; Hydrogeology, Hydrogeophysics.

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A presente dissertação é apresentada na forma de artigos e composta por 7 capítulos. Os capítulos iniciais tratam da introdução e contextualização da pesquisa, geologia regional e local; hidrogeologia dos aquíferos cristalinos; e teoria geofísica abordando os métodos magnético e eletromagnético. Os capítulos 5 e 6 são artigos, onde:

1º artigo - *Avanços na Pesquisa de Geofísica Aplicada para Levantamentos AEM com Foco na Prospecção de Água Subterrânea: Uma Revisão*. Mostra um estudo utilizando a revisão sistemática da literatura (RSL) em periódicos científicos publicados nos últimos 20 anos para a temática de levantamentos eletromagnéticos aerotransportados (AEM) voltados para gestão e prospecção de águas subterrâneas.

E o 2º artigo intitulado: *Caracterização Geofísica Aerotransportada de Sistemas de Aquíferos Cristalinos Fraturados na Região Semiárida do Nordeste Brasileiro: Avanços no Conhecimento Hidrogeofísico para Áreas Sujeitas a Seca*. Mostra os resultados das técnicas de modelagem e inversão 3D aplicados aos dados AEM na região de Serrinha-RN.

O capítulo 7 traz as conclusões finais da pesquisa. O Anexo A está relacionado a publicação feita no âmbito dessa dissertação.

1.2 BASE DE DADOS

Os dados geofísicos utilizados nesta pesquisa foram extraídos do projeto PROASNE-Brasil em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), que se constitui em levantamento eletromagnetométrico (Domínio da frequência) e magnetométrico aerotransportado – conduzido para água subterrânea em condições geológicas (sistema de aquíferos situados em rochas cristalinas pré-Cambrianas fraturadas) e climáticas que caracterizam o nordeste do Brasil, e conseqüentemente, pode ser considerado pioneiro no uso desta tecnologia. Foram coletados dados em 3 áreas – piloto, em 3 estados nordestinos diferentes, escolhidas para testar a metodologia e avaliar sua eficiência. Elas são referenciadas pelo nome da cidade mais próxima da área do levantamento: Juá (Ceará-CE); Samambaia (Pernambuco-PE) & Serrinha (Rio Grande do Norte-RN), sendo Serrinha a região de destaque nesta pesquisa. Esta tecnologia possui um grande potencial para ser aplicada em outras regiões áridas e semiáridas do mundo para interpretação, detalhamento e seleção de alvos para locação de poços de água subterrânea e deve ser considerada como um instrumento de assistência social e desenvolvimento.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa é identificar estruturas e delimitar regiões com alta favorabilidade à exploração de água subterrânea nas rochas cristalinas fraturadas utilizando dados de levantamentos magnéticos e eletromagnéticos aerotransportados, e caracterizando-os de maneira qualitativa e quantitativa.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são obter a modelagem e inversão geofísica (magnetometria e eletromagnetometria) 2D e 3D da região de Serrinha, a fim de possibilitar a interpretação conjunta dos dois métodos e correlacioná-los com a geologia e a hidrogeologia de forma 2D/3D. Para tais objetivos serão obtidas as etapas:

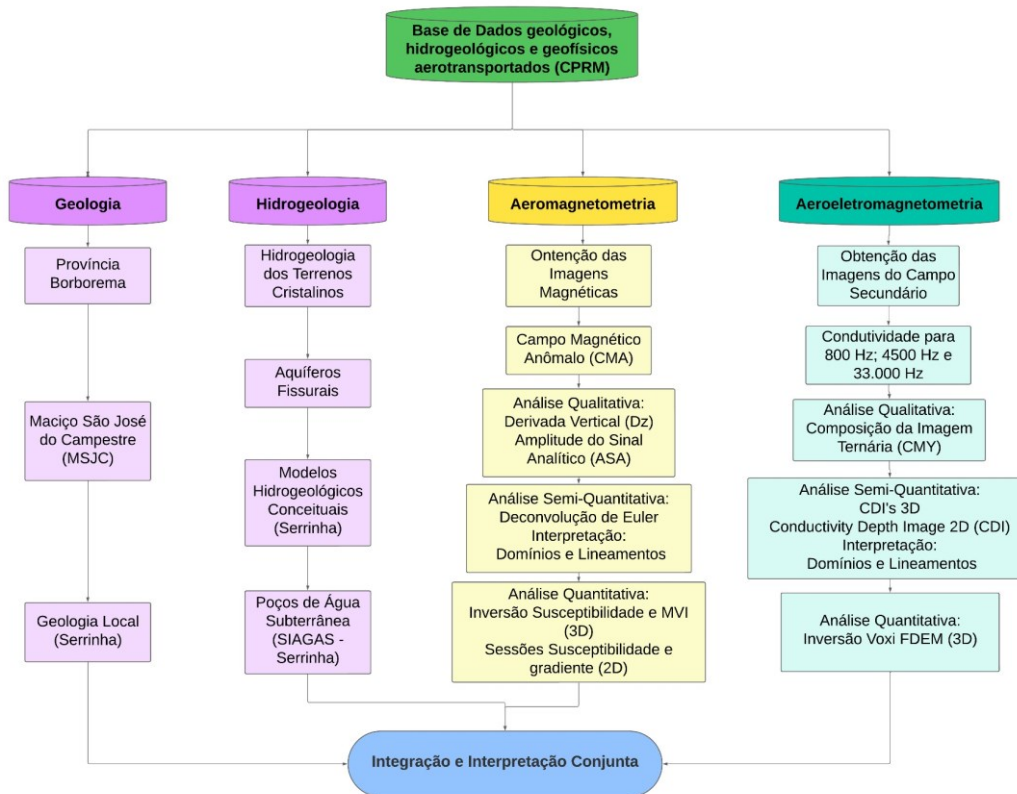


Figura 1.1: Fluxograma de fases de trabalho realizadas no âmbito da pesquisa.

2 GEOLOGIA REGIONAL

Apresenta-se nesse capítulo uma síntese sobre o contexto geológicos da região de estudo, com a finalidade de expor brevemente um resumo das principais características geológicas e geotectônicas relevantes para a investigação geofísica aerotransportada no sobre o embasamento cristalino do Maciço São José do Campestre, que está inserido no contexto geotectônico da Província Borborema.

2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA

A Província Estrutural Borborema (BP, NE do Brasil; Figura 2.1), como outras áreas orogênicas neoproterozóicas do Brasil, faz parte do grande sistema proposto por (Almeida et al., 1981) sendo definida como uma das entidades geotectônicas que compõem o conjunto de dez províncias estruturais oriundas da compartimentação do território brasileiro. Para a definição dessas unidades, os autores consideraram a evolução das principais unidades geológicas que apresentam características estratigráficas, magmáticas, metamórficas e tectônicas distintas daquelas adjacentes. Segundo estes autores, a Província Estrutural Borborema caracteriza-se pela granitogênese e por zonas de cisalhamento de grandes proporções vinculadas ao Ciclo Brasileiro/Panafricano, o último evento de orogênese, com idade neoproterozóica, variando entre 700 e 540 milhões de anos. Esta província foi construída através da convergência dos paleocontinentes São Francisco-Congo e Cráton Amazônico-Oeste Africano durante a orogênese Brasileira (Brito Neves et al., 2014; Caxito, 2021) incluindo ainda outros blocos antigos e arcos consolidados em períodos pré-brasilianos (Dantas et al., 2004; Hasui, 2010; Van Schmus et al., 2008).

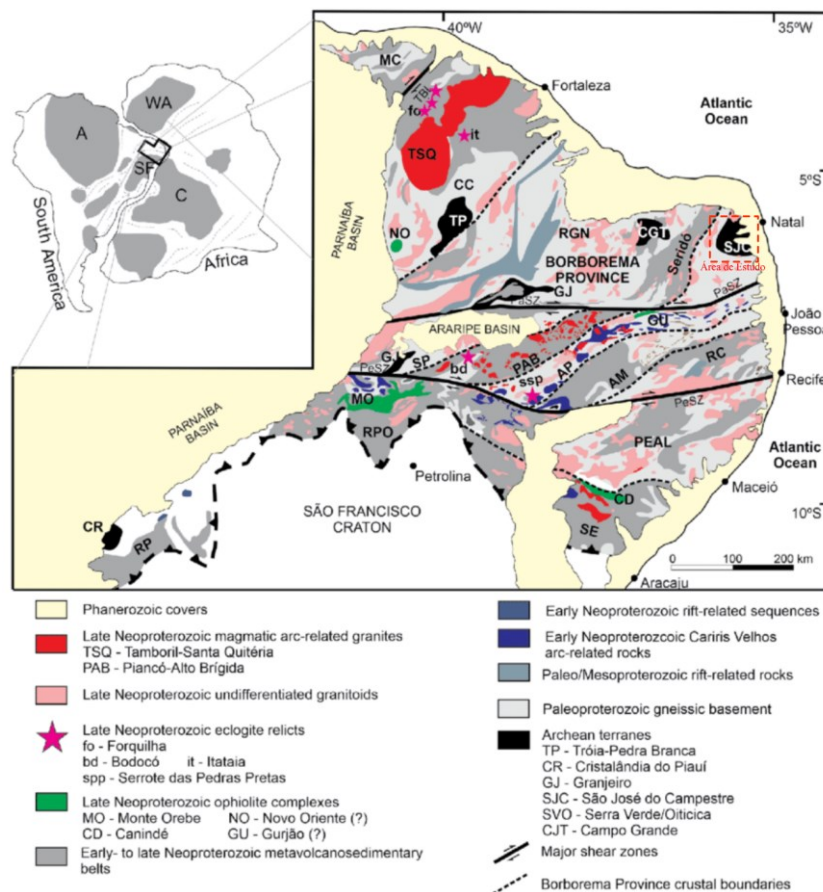


Figura 2.1: Mapa simplificado da Orogênese Brasileira- Pan Africana; Província Borborema. Extraído e adaptado de Caxito (2021).

Brito Neves et al., 2019 propõem a segmentação do pré-cambriano da porção nordeste do território brasileiro, com destaque à divisão em faixas de dobramentos que foram geradas durante o Ciclo de orogênese brasileira a partir da convergência entre os crátons envolvidos neste processo geotectônico. Dessa forma, a Província Estrutural Borborema limita-se a oeste pelo conjunto de rochas sedimentares de idade fanerozoica da Bacia do Parnaíba, a sul pelo Cráton São Francisco, e os demais pelas bacias sedimentares Mesozoico-Cenozoicas costeiras Potiguar, Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas.

2.2 GEOLOGIA LOCAL – MACIÇO SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE

A área estudada constitui uma pequena porção da Província Estrutural da Borborema no Nordeste brasileiro, mais precisamente na parte central do Maciço São José do Campestre (MSJC), situado a leste do Sistema de Dobramentos Seridó (Brito Neves, 1983) e tem em comum formações geológicas constituídas por rocha cristalinas do pré-cambriano recobertas por depósitos aluviais.

O MSJC representa um complexo mosaico de blocos gnáissicos formados durante diferentes pulsos de acreção crustal entre o Arqueano e o Paleoproterozóico, delimitado por zonas de cisalhamento e intrudido por corpos granitóides de idade brasileira (Dantas et al., 1998) onde é possível identificar deformações dúcteis e rúpteis na porção sudeste,

referente a Zona de Cisalhamento Rio Açú Mirim, e fraturas NNE e NW provenientes de um episódio tectônico mais antigo. Esta configuração geotectônica, com eventos registrados desde o Arqueano até o Cenozoico, proporciona alto grau de complexidade para o estudo geodinâmico da região em questão.

Para compreender a geologia de Serrinha, utilizou-se a folha geológica São José do Campestre (SB.25-Y-A-I) (Roig e Dantas, 2013) (Figura 2.2 e página 115). Grande parte da área é composta pelo Éon Arqueano de unidades geológicas dominantes Neoarqueano (A4), Mesoarqueano (A3) e Meso/Paleoarqueano (A3/A2). Outras regiões da folha apresentam formações do paleoproterozóico (PP), neoproterozóico (NP), e cenozóico (paleógeno-neógeno), das quais se subdividem em complexos, depósitos e suítes. O complexo Presidente Juscelino (A23j) concentra a maior parte do bloco Serrinha. Os Depósitos colúvio-eluviais (N23c), compõem o restante da área de estudo.

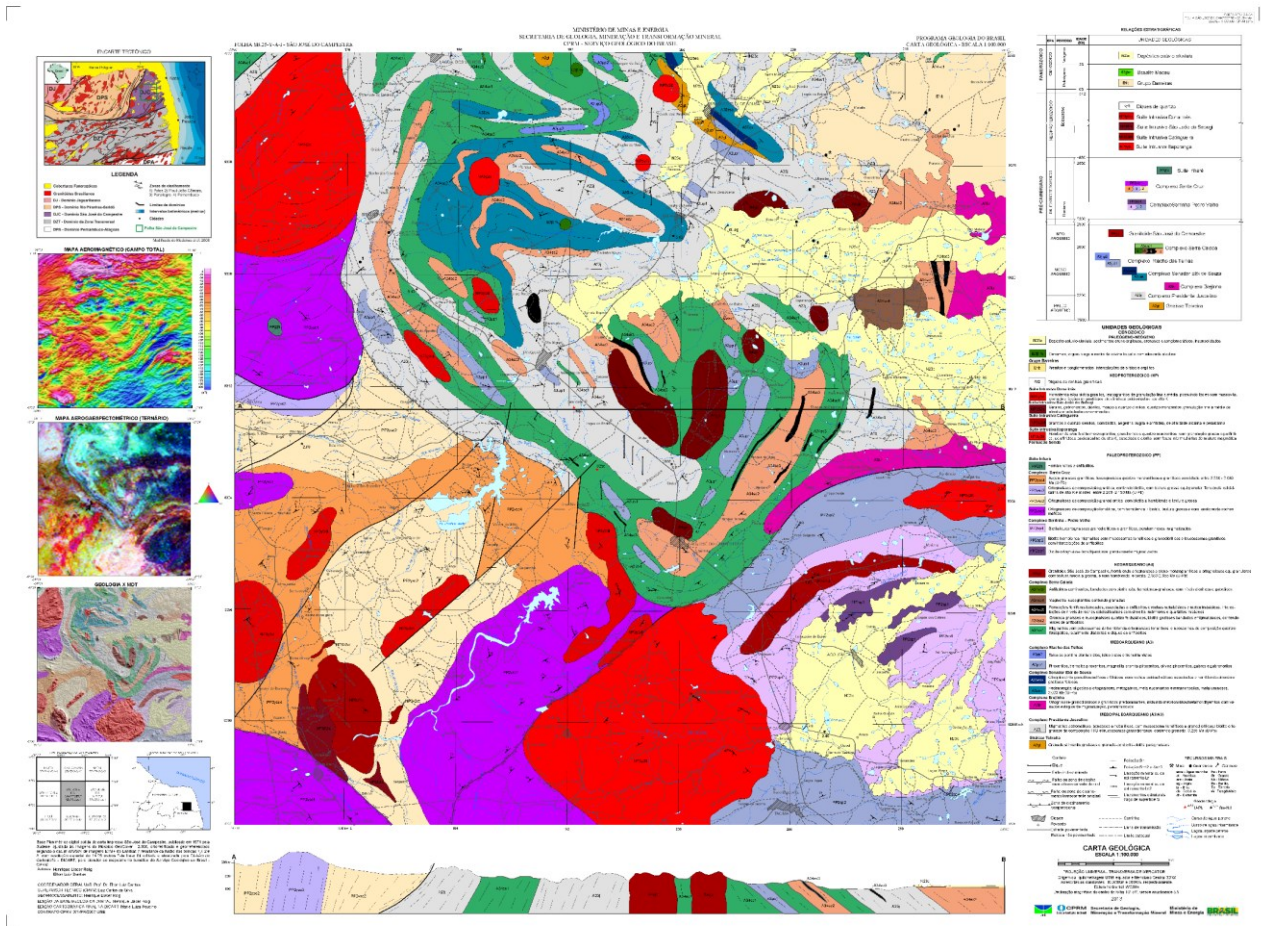


Figura 2.2:Folha geológica São José do Campestre (SB.25-Y-A-I)

3 HIDROGEOLOGIA DE TERRENOS CRISTALINOS

Apresenta-se nesse capítulo uma síntese sobre o contexto hidrogeológico da região de estudo, com a finalidade de expor brevemente um resumo das principais características hidrogeológicas e estruturais relevantes para a exploração de água subterrânea.

3.1 AQUÍFEROS FISSURAIS

A hidrogeologia dos aquíferos fissurais é principalmente aplicado aos terrenos com rochas de domínio ígneo e metamórfico, comumente conhecidos como cristalino. Neste domínio a matriz do maciço rochoso é caracterizado pela inexistência ou baixa presença de espaços intergranulares na rocha. Nesse meio, a água encontra-se em espaços resultantes de esforços neotectônicos e são representados por fissuras, fraturas, fenda, juntas, falhas, contatos geológicos e superfícies de foliação intemperizadas demonstrado pela (Figura 3.1).

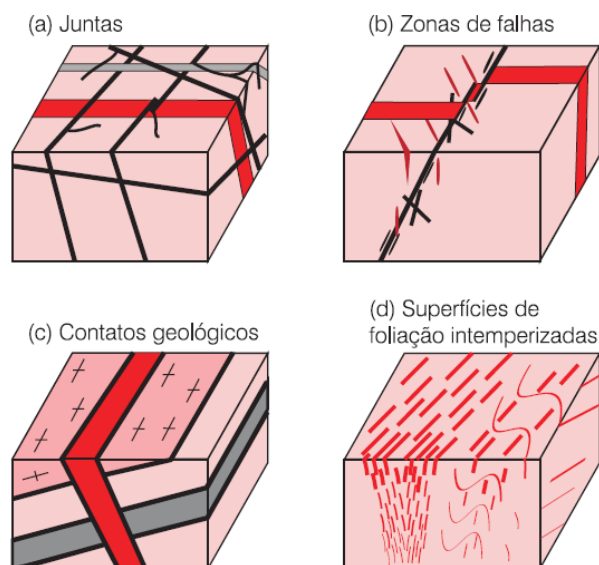


Figura 3.1: Estruturas que controlam a ocorrência de água subterrânea em rochas cristalinas: (a) juntas; (b) falhas e zonas de falha; (c) contatos geológicos; (d) superfícies de foliação (incluindo zonas de cisalhamento), quando intemperizadas. Os efeitos do intemperismo nas fraturas são indicados por traços mais grossos, próximos à superfície (Extraído de Feitosa et al., 2008).

A interconexão de fraturas é um fator de extrema relevância para aumentar as condições de porosidade (fraturas abertas) e permeabilidade (fraturas interconectadas) nas rochas cristalinas. Assumindo o caso comum de fraturas predominantemente de alto ângulo de mergulho (sub-verticais) como se encontra no Planalto da Borborema as interconexões podem ser formadas no encontro de diferentes redes de fraturas ou quando

são interceptadas por fraturas de baixo ângulo (sub-horizontais) devido à descompressão do terreno. As fraturas de baixo ângulo permitem distribuir a água superficial infiltrada ao longo de uma área mais ampla, com possibilidades de alimentar um maior número de fraturas em profundidade. O sucesso de um poço é função do número de fraturas produtoras interceptadas (Figura 3.2). Em regiões com fraturas predominantemente de alto ângulo de mergulho (Planalto do Borborema), indica-se poços inclinados, de modo a interceptar um maior número de fraturas e assim obter maiores vazões. Poços verticais são mais adequados para regiões dominadas por fraturas de baixo ângulo.

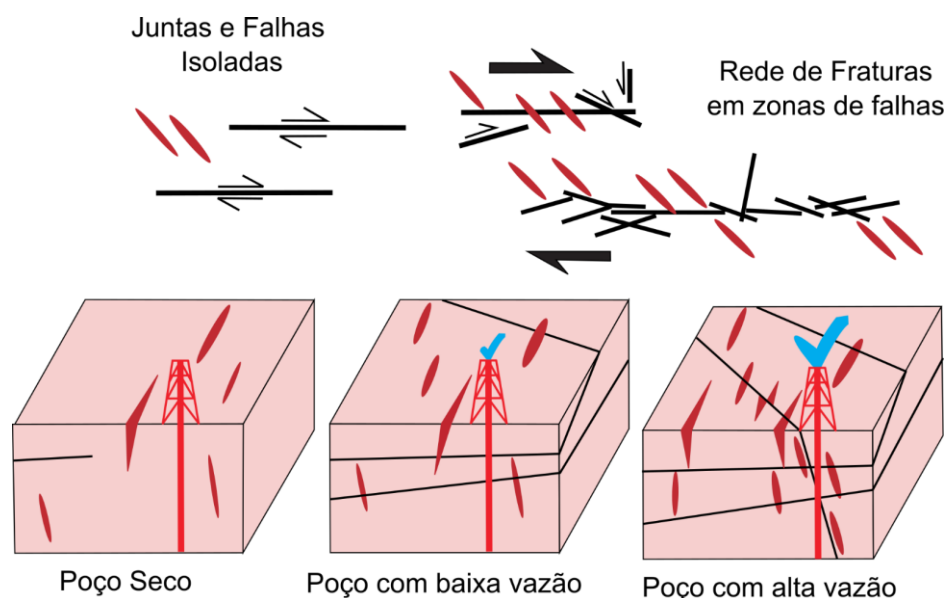


Figura 3.2: Poços inclinados e verticais interceptando planos de fraturas de alto ângulo e baixo ângulo. A vazão dos poços está diretamente relacionada ao número de planos de fraturas produtoras interceptados. (Extraído de Feitosa et al., 2008).

Ao longo da trama de fraturas a (Figura 3.3) ilustra o fluxo da água subterrânea. Logo, a combinação dessas possibilidades aliadas também com a interação de tensões capilares e rugosidade da fratura (Costa & Silva, 1997) em cada sítio podem condicionar fluxo ao longo do maciço cristalino, gerando sistemas naturais de bombeamento (Coriolano, 2002).

A presença de porosidade primária e secundária contribui para maior produtividade, a exemplo de trabalhos publicados de Manoel Filho (1996), sobre metacarbonatos dos Grupos Bambuí/Salitre, da Província São Francisco; a tectônica rúptil favorece na geração de estruturas abertas e intemperismo localizado (Souza Filho et al., 2002; Souza Filho, 2008), nessa conjuntura, a neotectônica assume maior importância (Coriolano, 2002; Neves, 2005).

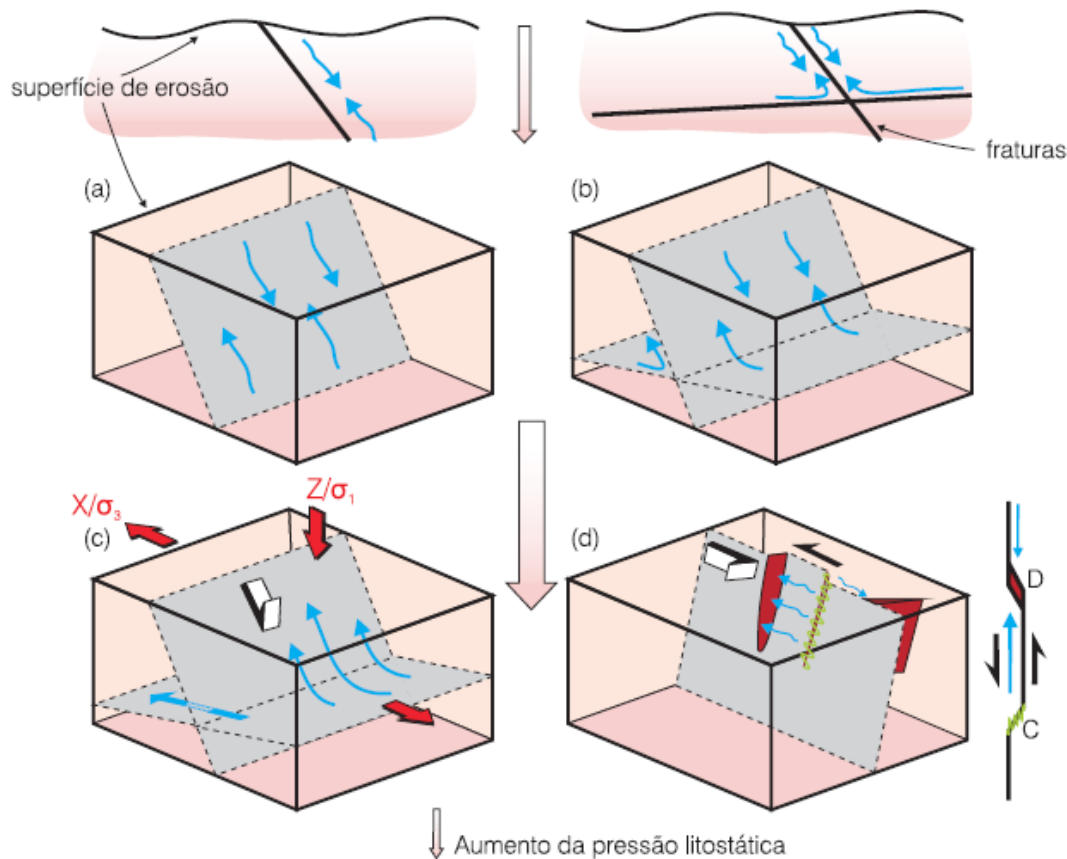


Figura 3.3 Condicionantes para o fluxo de fluidos ao longo de fraturas em rochas cristalinas (Extraído de Feitosa et al., 2008).

(A) gradientes hidráulicos ou conhecido como “gradientes hidrostáticos” em que fraturas preenchidas com água estão conectadas até a superfície, usualmente em fraturas rasas; (B) gradientes litostáticos, controlados pelo peso da coluna de rocha suprajacente, onde fraturas com água estão bloqueadas ou seladas até a superfície; (C e D) gradientes de origem neotectônica.

Nesse contexto, fraturas que tendem a abrir apresentam maior potencial hídrico, ao passo que, fraturas fechadas com componente de compressão, tem menor potencial hídrico, já as fraturas de cisalhamento (Figura 3.4) também são importantes em termos de produtividade hídrica. Onde há ausência de tensões neotectônicas (A e B) o comportamento do fluxo é distinto daqueles sem a presença dela.

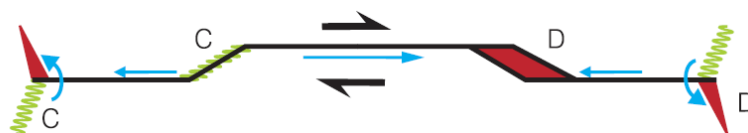


Figura 3.4: Sistema de bombeamento tectônico. As setas azuis indicam o fluxo de água (ou de outro fluido) e as setas em preto ou cinza representam tensões ou cinemática. Sítios de contração (C, onde ocorre expulsão da água) e de dilatação (D, acumuladores de água) em terminações e cotovelos (jogs) de falhas ativas (Extraído de Feitosa et al., 2008).

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 MAGNETOMETRIA

4.1.1 INTRODUÇÃO

O campo magnético terrestre é o somatório das várias componentes magnéticas, derivadas tanto do interior da Terra como de seu exterior. A componente principal do campo magnético terrestre é gerada por correntes elétricas associadas a movimentos convectivos em seu núcleo externo e é responsável por cerca de 90% ou mais do campo geomagnético. Sobreposto aos campos principal e externo, está o campo gerado pelo contraste litológico de magnetização em subsuperfície, que é o foco de interesse na exploração, utilizado para ajudar a determinar parâmetros tais como a composição, estrutura e propriedades térmicas da crosta e manto superior (Hinze et al., 2013).

A teoria do magnetismo envolve campos que exercem uma força sobre corpos magnetizados e materiais eletricamente condutivos. Ao contrário do fenômeno monopolar da gravitação o magnetismo é dipolar (Figura 4.1 - a), isto é, um campo magnético possui dois polos, polo norte e sul magnético, não havendo polos magnéticos livres, ou seja, monopolos magnéticos são inexistentes. Haverá sempre um polo magnético positivo formando par com um polo magnético negativo.

O Campo geomagnético pode ser compreendido como um vetor inserido em um espaço vetorial tridimensional (x,y e z) resultante de suas componentes ortogonais e ângulos entre eles (Figura 4.1 - b), no mundo real é considerado a latitude, longitude, profundidade, e declinação magnética do norte magnético em relação ao norte geográfico.

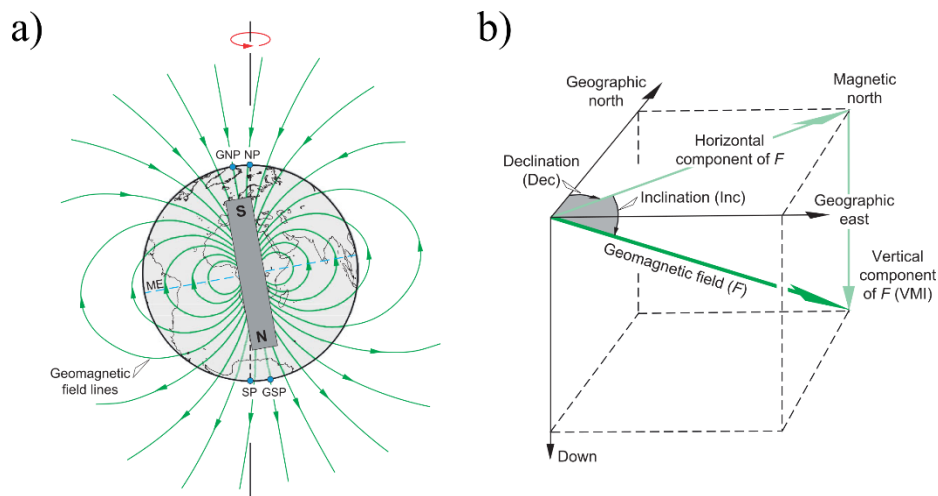


Figura 4.1: (a) Aproximação do campo geomagnético por um dipolo inclinado em relação ao eixo de rotação da Terra. Os polos magnéticos reais não coincidem com o polo geomagnético do dipolo ou com os polos geográficos. GNP - polo norte geomagnético,

GSP - polo sul geomagnético, ME - equador magnético, NP – polo norte geográfico e SP – polo sul geográfico. (b) Elementos que definem o campo geomagnético (F). VMI - intensidade magnética vertical; A direção do campo é definida pelos ângulos de inclinação (Inc) e declinação (Dec). Adaptado de Dentith e Mudge (2014).

4.1.2 FORÇA MAGNÉTICA

A relação entre as forças e os polos dos ímãs foi investigada experimentalmente por Coulomb no final do século XVIII e, pouco depois, foi colocada em termos matemáticos por Poisson. Esta lei empírica, conhecida como lei de Coulomb (Eq.(4.1)), é semelhante em estrutura à lei da força gravitacional de Newton e afirma que onde p_1 e p_2 são polos magnéticos pontuais de força \mathbf{p} e \mathbf{r} é a distância entre eles (Hinze et al., 2013):

$$F_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{p_1 p_2}{r^2} \cdot \vec{r} \quad (4.1)$$

μ = permeabilidade magnética no meio

\vec{r} = vetor unitário direcional que vai de p_2 a p_1

Seu campo magnético (\vec{H}) (Eq.(4.2)) é definido como a força que experimenta um polo magnético (p_1) devido à presença no espaço de outro polo magnético considerado, ou seja:

$$\vec{H}(x, y, z) = \frac{\vec{F}}{p_1} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{p_2}{r^2} \cdot \vec{r} \quad (4.2)$$

Onde (P_1) é um polo magnético de prova no espaço onde o sensor está localizado.

Outra relação fundamental no método magnético é que a razão da densidade de fluxo \vec{B} pela força de campo \vec{H} é uma constante conhecida como μ que indica a permeabilidade magnética absoluta. A permeabilidade magnética do vácuo (μ_0) possui o valor de $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, pode ser aproximada para a da água e do ar. Para qualquer outro meio, a razão das permeabilidades de um meio para o espaço no vácuo é igual à permeabilidade relativa (μ_r), que por ser uma razão não possui unidade (Reynolds, 1997).

É possível então identificar a relação (Eq.(4.3)) entre \vec{B} e \vec{H} por meio do parâmetro da susceptibilidade magnética k (Hinze et al., 2013) através da equação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.3)$$

$\mu = \text{Wb/m}^2 = \text{Tesla}$

Uma vez que $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

Tomando $k = \mu_r - 1$:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0(\mu_0 - 1)\vec{H} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 k \vec{H} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

Assim temos:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + k)\vec{H} \quad \text{e} \quad \vec{M} = k\vec{H} \quad (4.4)$$

Onde \vec{M} é o vetor de intensidade de magnetização (Eq.(4.4)), que é a soma vetorial entre a intensidade de magnetização induzida e a intensidade de magnetização remanente das rochas

4.1.3 CORREÇÕES E REDUÇÕES MAGNÉTICAS

A redução de dados magnéticos é fundamental para remover as causas da variação magnética que não sejam decorrentes dos efeitos magnéticos das observações de interesse, isto é, fontes não geológicas. Variações de períodos mais longos do campo magnético terrestre, ao longo dos anos, é conhecida como variação secular. Acredita-se que seja principalmente relacionado a mudanças nas correntes elétricas que produzem o campo interno. Existem também variações na inclinação e declinação, além do deslocamento do polo norte magnético para oeste. No entanto, essas mudanças muito pequenas são pouco significativas na prospecção magnética. Variações seculares na força do campo tem efeito ao combinar dados de levantamentos magnéticos conduzidos ao longo de anos ou décadas, típicos de programas nacionais de levantamento.

Estudos paleomagnéticos indicam que o campo geomagnético se inverteu anteriormente (Collinson, 1983). A direção atual do campo é conhecida como direção normal, estabelecida a partir de sua direção anteriormente reversa há cerca de 780.000 anos. A inversão dos polos magnéticos tem um impacto óbvio na magnetização remanescente das rochas da crosta terrestre, que influencia fortemente suas respostas magnéticas (Dentith e Mudge, 2014).

Após a etapa de correção, sendo removidas as fontes indesejáveis ao estudo geológico, resta apenas a parte do campo provocado pela distribuição irregular de rochas magnetizadas em subsuperfície. Este campo é conhecido como campo magnético anômalo e é utilizado em grande parte na interpretação geofísica em diversos casos.

4.1.4 CORREÇÃO DA VARIAÇÃO DIURNA (VD)

As variações diurnas são pequenas variações no campo magnético terrestre ao longo do dia devido a correntes elétricas que fluem na ionosfera, a camada ionizada da alta atmosfera, e que estão associadas à radiação do sol. Essas variações diárias ou diurnas variam até cerca de 30 nT e são mínimas à noite, quando o hemisfério noturno é protegido da radiação solar. Eles também variam com a latitude, sendo maiores nas áreas equatoriais (Dentith e Mudge, 2014).

As observações de distúrbios de campo nos oceanos, áreas costeiras e através dos continentes revelam mudanças espaciais distintas nas variações de campo. As correntes elétricas atmosféricas produzem correntes secundárias em áreas eletricamente condutoras da superfície da Terra, como os oceanos e áreas condutoras no interior. Estes, por sua vez,

geram campos magnéticos cuja força muda ao longo do dia. A intensidade dos distúrbios aumenta em direção à costa dos continentes, onde a massa de terra encontra a água do mar altamente condutora, para produzir o efeito de costa, que pode se estender por pelo menos 100 km para o interior (Lilley, 1982).

A variação diurna da força do campo tem um grande efeito nos dados de levantamentos aeromagnéticos, por isso é monitorado rotineiramente durante o levantamento. É relativamente fácil de contabilizar uma vez que a mudança é gradual tanto no espaço quanto no tempo, embora seja mais difícil para pesquisas que se estendem por grandes áreas e para pesquisas conduzidas perto da costa.

4.1.5 CORREÇÃO DO IGRF (INTERNATIONAL GEOMAGNETIC REFERENCE FIELD)

O campo geomagnético sofre mudanças em seu comportamento a longo prazo, tanto em direção como em magnitude, denominadas de variação secular. A sua taxa de modificação é da ordem de 80 nT/ano, porém são variações inconstantes em posição e tempo. Sua origem interna e variação rápida em relação ao tempo geológico defendem uma fonte principal com origem no núcleo externo líquido bem correntes fluidas secundárias. Remover o IGRF (International Geomagnetic Reference Field) significa remover o campo geomagnético de referência, ou seja, um modelo matemático em expansões de harmônicos esféricos que representa o campo magnético terrestre com origem no núcleo e inclui termos temporais para corrigir as variações seculares (Blakely, 1995; Hinze et al., 2013). A cada meia década desde 1965 um Campo Geomagnético de Referência é calculado e adotado internacionalmente, com base em observatórios magnéticos e medidas de levantamento e, nos últimos anos, as observações do campo magnético terrestre a partir de observações de satélites (Hinze e Langel, 1998) (Reynolds J.M., 2011). Matematicamente o IGRF (Eq.(4.5)) consiste em coeficientes de Gauss que definem uma expansão por harmônicos esféricos do potencial escalar magnético dado pela equação a seguir:

$$V(r, \varphi, \theta) = a \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} (g_l^m \cos(m\varphi) + h_l^m \sin(m\varphi) P_1^m \cos(\theta)) \quad (4.5)$$

4.1.6 O CAMPO MAGNÉTICO ANÔMALO E SEUS PRODUTOS DE REALCE

O produto final após as correções magnéticas é a intensidade do campo anômalo (CMA = CMT (Campo Magnético Total) – IGRF – VD (Variação Diurna) representando a contribuição devida principalmente às diferenças nas concentrações dos minerais magnéticos nas rochas da litosfera situadas acima da isoterma representativa da superfície Curie para a magnetita (580° C), principal fonte magnética dos materiais geológicos, e igualmente presente em feições a eles impostas (dobramentos / falhamentos / fraturamentos).

Calculado o CMA, vários produtos foram obtidos, ditos imagens de realce:

4.1.7 DERIVADAS DIRECIONAIS

As derivadas de primeira e segunda ordem nas direções x, y e z são ferramentas essenciais para realçar anomalias de alta frequência, e sua aplicação pode ser realizada tanto no domínio espacial quanto no domínio da frequência. Vale ressaltar que as derivadas horizontais são mais facilmente computadas no domínio espacial, conforme destacado por Nabighian, 2005.

Ao analisar as derivadas horizontais, observa-se que elas realçam características nas direções x e y, destacando o gradiente lateral da propriedade física investigada na direção escolhida. Isso se mostra particularmente útil na identificação de extremidades de fontes, conforme sugerido por (Simpson et al., 1986). Além disso, tais derivadas são fundamentais na geração de produtos adicionais que requerem o gradiente lateral, como o Gradiente Horizontal Total e a Deconvolução de Euler.

Por outro lado, a derivada vertical destaca características próximas à superfície, reduzindo a largura da anomalia e permitindo uma localização mais precisa das fontes (Cooper & Cowan, 2004). Amplamente empregada como um filtro passa-alta, a primeira derivada vertical destaca-se por sua robustez computacional, fornecendo resultados confiáveis e facilmente interpretáveis, conforme evidenciado por Isles e Rankin (2013). Além disso, serve como base para a obtenção de produtos adicionais, incluindo o Sinal Analítico.

No domínio do número de ondas, as derivações são simplesmente representadas por uma multiplicação entre o dado transformado e o fator de derivação. É possível averiguar que as derivadas direcionais de ordem n de um dado campo magnético $\vec{H}(x, y, z)$ podem ser efetuados a partir das seguintes expressões (Azevedo, 2022):

$$\frac{\partial \vec{H}(x, y, z)}{\partial x} = \mathcal{F}^{-1}\{(ik_x)^n \mathcal{F}[\vec{H}(x, y, z)]\} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \vec{H}(x, y, z)}{\partial y} = \mathcal{F}^{-1}\{(ik_y)^n \mathcal{F}[\vec{H}(x, y, z)]\} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \vec{H}(x, y, z)}{\partial z} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2}\right)^n \mathcal{F}[\vec{H}(x, y, z)]\right\} \quad (4.8)$$

em que i é o número complexo ($\sqrt{-1}$), k_x é o número de onda na direção x, k_y o número de onda na direção y, os símbolos \mathcal{F} e \mathcal{F}^{-1} indicam a transformada de Fourier direta e inversa, respectivamente. As derivadas parciais no eixo das coordenadas x (Eq.(4.6)) e y (Eq.(4.7)) são conhecidas como derivadas horizontais, enquanto a equação (4.8) é a derivada vertical. Fazendo $n = 1$, temos as derivadas de primeira ordem. Basicamente, a combinação das derivadas horizontais e vertical são a base para a técnicas de filtragem como a amplitude do sinal analítico (ASA). Note que a derivação é obtida por meio de uma simples multiplicação de um termo pela transformada de Fourier do dado campo magnético $\vec{H}(x, y, z)$. Ao final do processo multiplicativo, basta então aplicar a transformada inversa de Fourier para devolver o dado ao domínio original.

4.1.8 AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (ASA)

A amplitude do sinal analítico (Eq.(4.9)) corresponde a uma variedade de métodos semiautomáticos, baseados no uso de gradientes (derivadas) horizontais e vertical de anomalias de campos potenciais, Nabighian, (1972, 1974) aplicou o conceito de sinal analítico a dados de campos potenciais derivados de modelos bidimensionais e sua amplitude foi estendida para corpos 3D por (Roest et al., 1992), com o objetivo de estimar profundidades de fontes magnéticas. Combinando a derivadas parciais nas 3 direções do campo magnético obtemos o gradiente total conforme:

$$|ASA|(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial z}\right)^2} \quad (4.9)$$

A amplitude do sinal analítico é uma função simétrica em formato de crista ou sino (bell shaped), com seu máximo exatamente sobre o topo do corpo.

4.1.9 DECONVOLUÇÃO DE EULER

A deconvolução de Euler (Eq.(4.10)) é um método que determina a profundidade das fontes magnéticas, é semiautomático comumente usados para analisar rapidamente um grande número de respostas em um conjunto de dados (Reid et al., 1990; Zhang et al., 2000). A equação de Euler representa o campo total (H) em um ponto (x, y, z) no espaço, devido a uma fonte localizada em (x₀, y₀, z₀), em termos das derivadas de primeira ordem (∂f = ∂x etc.) do campo na seguinte forma:

$$(x - x_0) \frac{\partial \vec{H}}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \vec{H}}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \vec{H}}{\partial z} = N(\vec{B} - \vec{H}) \quad (4.10)$$

O qual inclui uma componente de fundo (regional) componente (\vec{B}). Observe que, para dados magnéticos, as informações sobre a direção do magnetismo não são necessárias, portanto, o magnetismo remanescente não apresenta um problema.

O índice estrutural (N) é responsável pela taxa de diminuição na amplitude da resposta com a distância da fonte. Isso afeta os gradientes medidos e depende da geometria de origem. Para o caso de uma fonte esférica, N é igual a 3 para magnéticas. Os índices foram derivados para uma variedade de tipos de fontes, e eles caem no intervalo de 0 a 3.

A posição da fonte (x₀, y₀, z₀) e o campo de fundo são obtidos resolvendo a equação de Euler. Se N for muito baixo, a estimativa de profundidade (z₀) será muito rasa, e se N for muito alto, a profundidade será superestimada. As coordenadas horizontais são muito menos afetadas. Uma estratégia eficaz é trabalhar com todos os valores de N entre 0 e 3, em incrementos, digamos, 0,5. Isso explicará que a geologia não está sendo adequadamente representada por qualquer uma das formas de modelo idealizadas, e foi mostrado que, para modelos mais realistas, N varia com a profundidade e localização.

4.2 ELETROMAGNETOMETRIA

4.2.1 INTRODUÇÃO

O método eletromagnético aerotransportado (AEM) compreende a geração de campos magnéticos primários por uma fonte aerotransportada. Essa geração induz campos magnéticos e elétricos secundários na subsuperfície, e a medição desses campos secundários proporciona informações sobre as variações da condutividade elétrica em profundidade. Para facilitar a compreensão dessa técnica eletromagnética é necessário o entendimento da teoria eletromagnética que será descrita no âmbito dessa sessão.

O fenômeno eletromagnético encontra sua descrição nas equações de Maxwell, fundamentadas em experimentos como os conduzidos por Faraday e Ampère. Estas equações, sendo empíricas, representam o ponto de partida essencial para a compreensão de como os campos eletromagnéticos podem ser aplicados no estudo da estrutura terrestre, permitindo a determinação de suas propriedades elétricas e magnéticas.

A propagação de campos eletromagnéticos é explicada por um modelo difuso, onde o sinal EM é atenuado e depende do período (ou frequência) e da condutividade do meio de propagação. Esse fenômeno é conhecido como *Skin-depth* ou profundidade pelicular, que rege a indução eletromagnética na subsuperfície terrestre. A formulação abaixo é baseada nos textos de (Ward e Hohmann, 1988; Keller, 1988; Von Huelsen, 2007; Dragone, 2018; Couto, 2021).

4.2.2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

As equações de Maxwell são descritas por (Dragone, 2018):

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (4.12)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.13)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.14)$$

Em que \vec{B} é a indução magnética (Tesla), \vec{D} é o deslocamento elétrico (C/m²), ρ_f é a densidade de carga livre (C/m³), \vec{E} é a intensidade do campo elétrico (V/m), \vec{H} é a intensidade do campo magnético (A/m) e \vec{J} é a intensidade de corrente (A/m²). As unidades vetoriais $[\vec{B}, \vec{D}, \vec{E}, \vec{H}$ e $\vec{J}]$ relacionam-se por meio das relações constitutivas, que são descritas para um meio de permeabilidade magnética (μ), permissividade elétrica (ϵ) e condutividade (σ) além de fatores extras como a frequência angular $\omega = 2\pi f$, posição do espaço (\mathbf{r}), tempo (t), temperatura (T) e pressão (P). Sendo expressas (Couto, 2021) como:

$$\vec{J} = \sigma(\omega, \mathbf{E}, \mathbf{r}, t, T, P) \vec{E} \quad (4.15)$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\omega, \mathbf{E}, \mathbf{r}, t, T, P) \vec{E} \quad (4.16)$$

$$\vec{B} = \mu(\omega, \mathbf{H}, \mathbf{r}, t, T, P) \vec{H} \quad (4.17)$$

A equação (4.11) é reconhecida como Lei de Gauss para o campo magnético, em que o operador gradiente aplicado ao campo magnético induzido \vec{B} é igual a $\mathbf{0}$, definindo que monopólos magnéticos são inexistentes. A equação (4.12) é reconhecida como Lei de Gauss para o campo elétrico, em que o operador gradiente aplicado ao deslocamento elétrico \vec{D} é igual a densidade de carga livre ρ_f , onde relaciona o fluxo do campo elétrico à densidade de carga contida em uma superfície. Podendo ser nula e/ou igual a zero, quando não há geração de cargas de elétricas. A equação (4.13) é a Lei da Indução Eletromagnética de Faraday, em que o operador rotacional aplicado ao campo elétrico \vec{E} resulta na variação do magnético induzido \vec{B} pelo tempo e com sinal oposto, essa lei estabelece que campos elétricos são resultantes de campos magnéticos de indução transientes no espaço e tempo. A equação (4.14) é a Lei de Ampère-Maxwell, em que o operador rotacional aplicado a intensidade do campo magnético \vec{H} resulta no deslocamento e intensidade de cargas, que por sua vez determina o fato de que campos magnéticos são causados pelo fluxo de corrente elétrica e que o campo é proporcional à corrente total (condução mais deslocamento).

Duas componentes são responsáveis pelo campo magnético secundário. A densidade de corrente \vec{J} se relaciona diretamente com o campo elétrico \vec{E} pela equação (4.15) conhecida como Lei de Ohm, e descreve a chamada corrente de indução. Outro termo dado por $\left[\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right]$ na equação (4.14), se relaciona com o campo elétrico pela equação (4.16) e descreve a corrente de deslocamento.

Como os campos eletromagnéticos são harmônicos, é possível aplicar a transformada de Fourier e transpor as equações de Maxwell para o domínio da frequência. A expressão da variação dos campos é dada por $[e^{i\omega t}]$, de forma que o campo elétrico passa a ser reescrito como $[\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{i\omega t}]$. Partindo disso e das relações constitutivas é possível demonstrar que o termo relativo às correntes de deslocamento $\left[\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right]$ na equação (4.14) pode ser desprezado em relação ao termo das correntes de condução \vec{J} . Ao tomar a razão entre as duas componentes (Eq.(4.18)), tem-se:

$$\frac{i (\text{deslocamento})}{i (\text{condução})} = \left| \frac{\partial \vec{D} / \partial t}{\vec{J}} \right| = \left| \frac{i\omega \varepsilon \vec{E}_0 e^{i\omega t}}{\sigma \vec{E}_0 e^{i\omega t}} \right| = \left| \frac{2\pi f \varepsilon}{\sigma} \right| \ll 1 \quad (4.18)$$

Logo, as correntes de condução são maiores em relação as correntes de deslocamento, aplicando a transformada de Fourier e substituindo os termos vetoriais a partir das relações constitutivas as equações (4.13) e (4.14) são reescritas:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu_0 \vec{H} \quad (4.19)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} \quad (4.20)$$

Valendo-se da igualdade vetorial $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ e aplicando o rotacional na equação (4.19), tem-se:

$$\begin{cases} \nabla \times (\nabla \times \vec{\mathbf{E}}) = -i\omega\mu_0 \nabla \times \vec{\mathbf{H}} \\ \nabla (\nabla \cdot \vec{\mathbf{E}}) - \nabla^2 \vec{\mathbf{E}} = -i\omega\mu_0 \nabla \times \vec{\mathbf{H}} \end{cases} \quad (4.21)$$

Na segunda igualdade (*) (Eq.(4.21)), o divergente do campo elétrico é nulo pois não há cargas elétricas sendo geradas, restando apenas o termo Laplaciano $\nabla^2 \vec{\mathbf{E}}$. Substituindo a equação (4.20) nessa igualdade, tem-se:

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \vec{\mathbf{E}} &= -i\omega\mu_0 \nabla \times \vec{\mathbf{H}} \quad \therefore \\ \nabla^2 \vec{\mathbf{E}} &= i\omega\mu_0 \sigma \vec{\mathbf{E}} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Seguindo os mesmos passos acima para a equação (4.20)(4.19), é obtido de forma similar:

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \vec{\mathbf{H}} &= \sigma \nabla \times \vec{\mathbf{E}} \quad \therefore \\ \nabla^2 \vec{\mathbf{H}} &= i\omega\mu_0 \sigma \vec{\mathbf{H}} \end{aligned} \quad (4.23)$$

As equações (4.22) e (4.23) são chamadas Equações de Helmholtz e expressam uma equação de difusão de forma geral [$\nabla^2 \mathbf{A} = i\omega\mu_0 \sigma \mathbf{A}$], no domínio da frequência, e de forma [$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu_0 \sigma \partial \mathbf{A} / \partial t$], no domínio do tempo. As propagações das ondas eletromagnéticas no interior da terra dependem unicamente da condutividade do meio e de seus períodos.

4.2.3 ATENUAÇÃO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Um critério bastante utilizado para a descrição da penetração de ondas eletromagnéticas é o *skin depth* ou *profundidade pelicular* (δ). Esta é definida como a profundidade de alcance do campo elétrico reduzido em $1/e$ (Telford et al., 1990),

$$|E_x| = \frac{1}{e} E_0 \sim 0,37 E_0$$

ou seja, 37% da amplitude do sinal inicial. Essa profundidade é dada por:

$$\begin{aligned} e^{-1} &= e^{-a\delta} \rightarrow \delta = \frac{1}{a} \quad \therefore \\ \delta &= \sqrt{\left(\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}\right)} \approx 503 \sqrt{\left(\frac{1}{f\sigma}\right)} \end{aligned} \quad (4.24)$$

A equação (4.24) limita o alcance da profundidade de investigação que é dependente da frequência angular da onda e da condutividade do meio. Em termos de frequência ($f = \frac{\omega}{2\pi}$) e condutividade ($\sigma = \frac{1}{\rho}$) usualmente utilizado no método AEM, e onde δ é a profundidade em metros. Dessa equação observamos que se a resistividade é baixa ou a frequência é alta, ou ambos, o campo magnético não vai penetrar em

subsuperfície. Admite-se que a profundidade de investigação (DP) (Telford et al., 1990) pela equação (4.25) é aproximadamente igual a:

$$DP = \frac{2}{3} \delta \quad (4.25)$$

CAPÍTULO V

ARTIGO 1 – AVANÇOS NA PESQUISA EM GEOFÍSICA APLICADA PARA LEVANTAMENTOS AEM COM FOCO NA PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA: UMA REVISÃO

ARTICLE 1 - ADVANCEMENTS IN APPLIED GEOPHYSICS RESEARCH FOR AEM SURVEYS WITH A FOCUS ON GROUNDWATER PROSPECTING: A REVIEW

Costa G.L.¹ and M.G. Von Huelsen²;

¹*Seismological Observatory of University of Brasilia, University of Brasilia, Brasilia, 70910-900, Brazil*

Resumo

A pesquisa no campo da geofísica aplicada, especificamente em levantamentos eletromagnéticos aéreos (AEM), com foco na prospecção de água subterrânea, tem contribuído para o avanço de técnicas não destrutivas na exploração de recursos hídricos subterrâneos. Essa pesquisa fornece informações valiosas para a gestão sustentável de aquíferos e o planejamento adequado do abastecimento de água. Esses estudos desempenham um papel crucial na garantia da disponibilidade de água potável, um recurso vital para a sociedade. Um exemplo desse cenário é a região semiárida do Nordeste brasileiro, reconhecida como uma área com secas sazonais que agravam diversos problemas existentes, como o acesso limitado a água limpa para consumo e saneamento. A falta de água limpa para higiene pessoal leva a problemas de saúde e aumenta a vulnerabilidade a doenças. Há também uma redução na produtividade agrícola, impacto em indústrias dependentes de água e aumento nos custos para acessar fontes alternativas de água, como perfuração de poços mais profundos, além da escassez de recursos hídricos superficiais. Devido a essas preocupações ambientais, surgiu a necessidade de extração de água subterrânea. A pergunta levantada aqui foi como os levantamentos AEM podem auxiliar na proteção dos recursos hídricos subterrâneos, na tomada de decisões para o gerenciamento de aquíferos e qual o rumo das pesquisas nesse campo. Os termos de busca "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea" foram definidos, utilizando a Web of Science como banco de dados. A coleta de dados revelou um aumento significativo no número de citações sobre esse tema nos últimos 20 anos, atingindo um marco de 259 artigos.

Palavras-Chave: Eletromagnetismo Aéreo (AEM); Água Subterrânea; Hidrogeologia; Hidrogeofísica.

Abstract

Research in the field of applied geophysics, specifically airborne electromagnetic (AEM) surveys, with a focus on groundwater prospecting, has contributed to the advancement of non-destructive techniques for exploring underground water resources. This research provides valuable information for the sustainable management of aquifers and proper water supply planning. These studies play a crucial role in ensuring the availability of drinking water, a vital resource for society. One example of this scenario is the Brazilian Northeast semi-arid region, which is recognized as an area with seasonal droughts that exacerbate various existing problems such as limited access to clean water for drinking and sanitation. Lack of clean water for personal hygiene, leading to poor health and increased vulnerability to diseases. Reduced agricultural productivity, impact on industries dependent on water, and increased costs for accessing alternative water sources such as drilling deeper wells, as well as scarcity of surface water resources. Due to these environmental concerns, the need for groundwater extraction arose. The question posed here was how AEM surveys can assist in protecting underground water resources, making decisions for aquifer management, and where research in this field is heading. The search terms “Airborne Electromagnetics” and “Groundwater” were defined, using the Web of Science as the database. Data collection revealed a significant increase in the number of citations on this topic in the last 20 years, reaching a milestone of 259 articles.

Keywords: Airborne Electromagnetics (AEM); Groundwater; Hydrogeology; Hydrogeophysics.

Introdução

Levantamentos eletromagnéticos aéreos (AEM) envolvem o uso de sensores eletromagnéticos conectados a aeronaves ou helicópteros que transmitem um sinal eletromagnético. Quando esse sinal interage com a Terra, ele induz correntes secundárias (correntes parasitas) (Korus, 2018). A resposta eletromagnética é gerada com base na condutividade elétrica das rochas, controlada por fatores como teor de argila na composição mineral, texturas de sedimentos, litologias e teor de água nos poros (concentração de sais dissolvidos). Esses levantamentos permitem a caracterização das propriedades elétricas e hidrogeológicas dos materiais subsuperficiais quando as medidas AEM são realizadas a profundidades variando de 10 a centenas de metros. As respostas se apresentam na forma de correntes secundárias que podem ser registradas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Em geral, sistemas eletromagnéticos de domínio do tempo (TDEM) resolvem propriedades em maiores profundidades em comparação

com sistemas de domínio da frequência (FDEM). No entanto, sistemas FDEM possuem maior resolução nas proximidades da superfície (Bedrosian et al., 2016).

Seções de profundidade de condutividade elétrica podem ser construídas ao longo das linhas de voo por meio de imagens numéricas, inversão e interpolação entre as linhas de voo, possibilitando uma visualização tridimensional da condutividade elétrica (Siemon et al., 2009) (Boaga, 2017) (Knight et al., 2016). A aplicação de levantamentos AEM na prospecção de água subterrânea oferece várias vantagens, como a capacidade de cobrir grandes áreas de forma rápida e eficiente, detectar zonas de água doce e salgada, e identificar estruturas geológicas favoráveis para a acumulação de água subterrânea. Isso contribui para a otimização dos recursos hídricos, possibilitando um gerenciamento mais eficiente e sustentável dos aquíferos.

Apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, uma busca sobre o tema "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea" no banco de dados ISI Web of Science resultou em 84 resultados, sendo 72 deles artigos publicados em periódicos científicos. Devido à natureza recente desse estudo, compreender as contribuições mais relevantes e os principais autores no campo serve como um guia para futuras pesquisas. Portanto, o objetivo desta pesquisa é analisar os periódicos que mais publicam sobre esse tema, a evolução do número de publicações por ano, os documentos mais citados, os autores com as maiores taxas de publicação e citação, os países de origem das pesquisas, as áreas de pesquisa abordadas nas publicações, as instituições que mais publicam sobre o tema e a frequência de aparecimento de palavras-chave. Para atingir esse objetivo, será realizada uma pesquisa exploratória por meio de uma revisão sistemática.

Metodologia

Este estudo é de natureza exploratória, empregando uma abordagem quantitativa e utilizando uma revisão sistemática. A revisão sistemática da literatura (RSL) é uma técnica de pesquisa científica que envolve a coleta, avaliação crítica e síntese dos resultados de múltiplos estudos primários (Galvão T.F. e Harrad, 2015; Porritt et al., 2014; Castro 2021; Neri et al., 2021). Portanto, essa técnica foi executada em três passos simples para identificar literatura impactante e conduzir análises bibliométricas.

No primeiro passo, o banco de dados foi organizado utilizando a plataforma Web of Science, considerada uma das melhores e mais abrangentes (Calazans et al., 2015). A busca foi realizada utilizando as palavras-chave "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água

"Subterrânea" em artigos científicos publicados nos últimos 20 anos. A amostra para esta pesquisa compreende 72 estudos de 2002 a 2023.

No segundo passo, a própria plataforma Web of Science foi usada para identificar os países que mais publicaram (Figura 5.1), os periódicos que mais publicaram sobre o tema (Figura 5.2), a evolução ano a ano do tópico (Figura 5.3), os autores mais citados (Figura 5.4) e documentos (Tabela 5.1), a relação entre os autores que mais publicam e os mais citados, bem como a frequência de palavras-chave.

Finalmente, no terceiro passo, foi utilizado o software VOSViewer 1.6.5 (<https://www.vosviewer.com/>). Ele lê os dados do banco de dados Web of Science e, por meio de algoritmos de agrupamento, separa os autores em grupos com base em suas áreas de pesquisa. Esses grupos são chamados de clusters. De acordo com (Kretschmer 2004), as informações bibliométricas são levadas em consideração para definir os atributos dos autores, e com base na hipótese de que cientistas com atributos semelhantes têm uma frequência de citação mais alta entre si, a rede é separada em clusters. A análise foi conduzida em abril de 2023.

Revisão da Literatura e Resultados

Pelo ranking de países que mais publicam relacionado aos temas "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea" (Figura 5.1), a maioria dos artigos foram publicados por pesquisadores da Dinamarca (26,38%), seguidos por pesquisadores da Austrália (25%), Alemanha (25%), Estados Unidos (19,44%), Canadá (6,94%), Itália

(6,94%) e Holanda (6,94%). O Brasil não está listado entre os 25 principais países que mais publicam sobre o tema "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea".

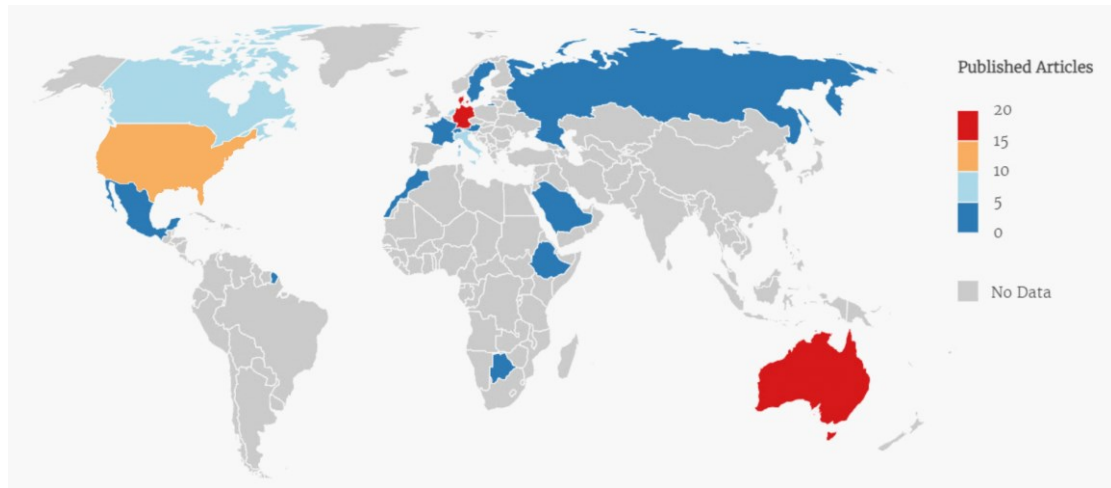


Figura 5.1: Classificação dos países que publicaram artigos com o tema "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea".

Dentre os periódicos que têm publicado extensivamente sobre a tecnologia de Levantamentos Eletromagnéticos Aéreos e Água Subterrânea (Figura 5.2), destacam-se: Near Surface Geophysics – classificação Qualis Q2; Journal of Applied Geophysics - classificação Qualis Q2; Exploration Geophysics - classificação Qualis Q2; International Journal - classificação Qualis Q2; Geophysical Journal International - classificação Qualis Q1; Geophysics - classificação Qualis Q1; Hydrogeology Journal - classificação Qualis Q1.

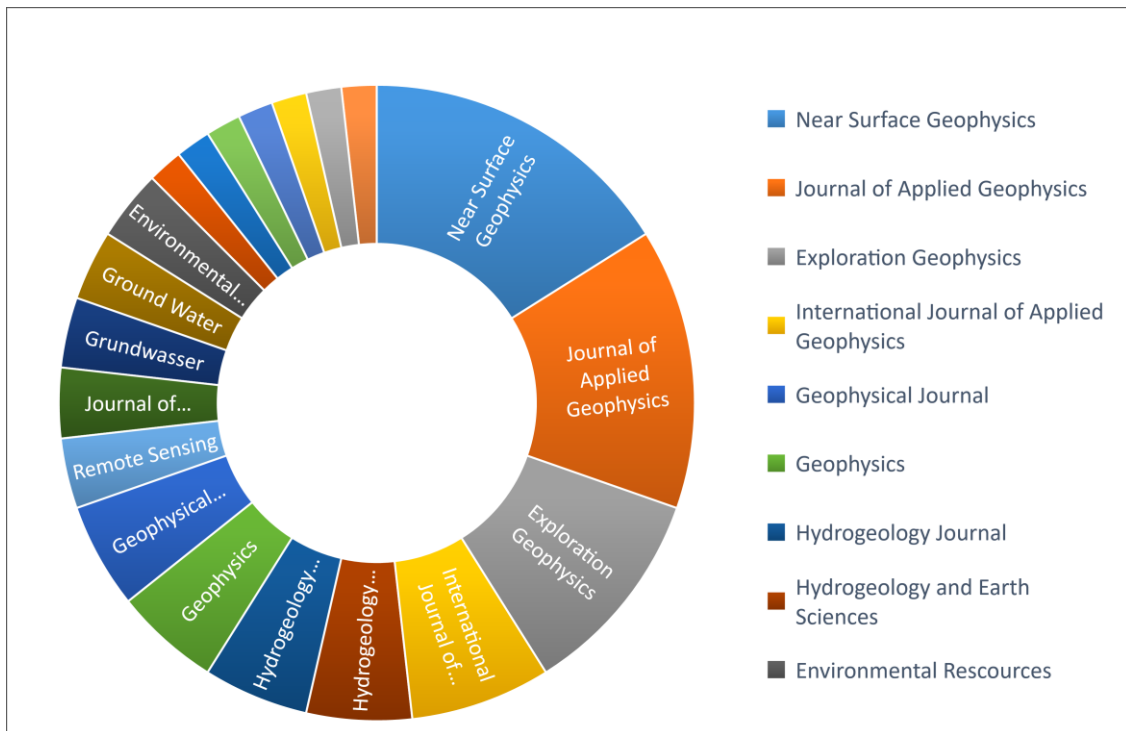


Figura 5.2: Classificação dos periódicos que mais publicam artigos com o tema "Eletrromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea".

Embora haja muitos bancos de dados disponíveis, a necessidade de registros com o mínimo possível de erros em seus metadados e, ao mesmo tempo, ter acesso a um banco de dados consolidado com uma reputação reconhecida por sua qualidade e nível de informações disponíveis orientou esta pesquisa a utilizar a Web of Science. Um total de 72 artigos científicos foi encontrado sobre o tema. O primeiro documento no banco de dados é do ano de 2002. Desde então, o tópico atingiu seu pico de 259 citações, considerando o período de 2002 até abril de 2023. Além disso, há uma progressão nas citações anuais, atingindo seu pico mais alto em 2021 com um máximo de 10 publicações e 259 citações, mantendo uma tendência de crescimento em comparação com os anos anteriores. No entanto, em 2022, houve uma diminuição significativa no número de publicações e citações relacionadas a este tópico. Espera-se que o ano de 2023 mostre uma recuperação no número de publicações, artigos e citações, mas ainda exibe uma forte queda (Figura 5.3).

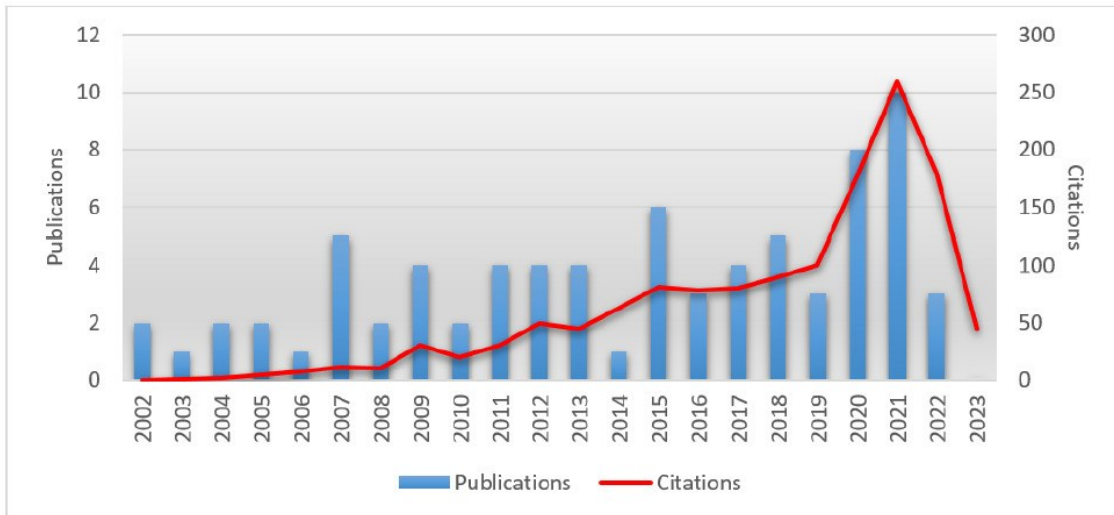


Figura 5.3: Evolução do número de publicações X citações de artigos anualmente.

Entre os autores que mais publicam estão Bernhard Siemon, Esben Auken, Annika Steuer, A. Viezzoli e H. Wiederhold, todos com muitas citações, sendo que alguns ultrapassam 100 citações (Figura 5.4). No entanto, entre os 10 artigos mais citados (Tabela 5.1), apenas artigos de Bernhard Siemon, Esben Auken, Annika Steuer e A. Viezzoli estão presentes.

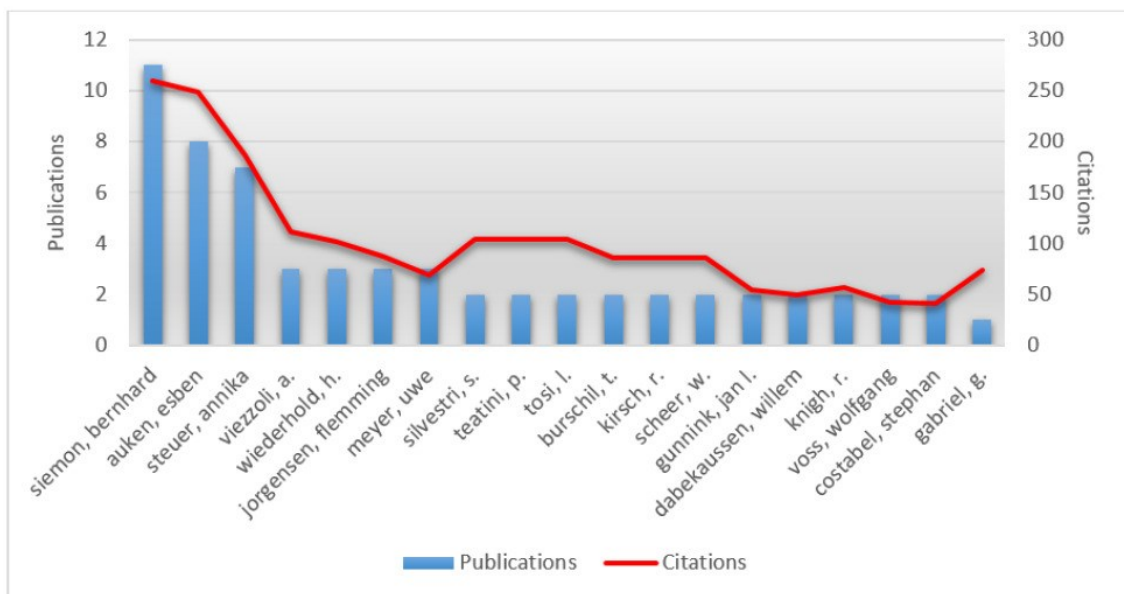


Figura 5.4: Relação entre o número de publicações X número de citações para os 20 principais autores.

Tabela 5.1: 10 Artigos mais citados.

Autores	Título	Contribuição / Amostra	Citado	Ano
Steuer et al., 2009	A comparison of helicopter-borne electromagnetics in frequency- and time-domain at the Cuxhaven valley in Northern Germany	O artigo destaca a importância do uso de levantamentos de Eletromagnetismo Aéreo (AEM) para estudos de recursos hídricos subterrâneos e monitoramento ambiental, concentrando-se principalmente no impacto potencial do aumento do nível do mar em aquíferos costeiros. Ele explora as vantagens dos levantamentos AEM, como sua capacidade de fornecer mapeamento rápido da resistividade e distribuição precisa da resistividade subsuperficial.	79	2009
Gabriel et al., 2003.	Geophysical investigation of buried Pleistocene subglacial valleys in Northern Germany	O artigo discute a integração de diferentes métodos geofísicos, como sísmica, gravimetria e Eletromagnetismo Aéreo (AEM), em estudos de águas subterrâneas. Esses métodos são essenciais para caracterizar as propriedades hidrogeológicas de vales subglaciais enterrados. Além disso, a investigação não apenas contribui para a compreensão e monitoramento de possíveis ameaças à qualidade da água subterrânea, mas também desempenha um papel crucial na gestão eficaz dos recursos hídricos subterrâneos.	74	2003
Viezzoli et al., 2010	Surface water–groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The Venice Lagoon example	O artigo contribui para os estudos de águas subterrâneas em ambientes costeiros transitacionais que interagem com corpos de água superficiais, como lagoas, estuários e deltas. A pesquisa na Lagoa de Veneza serve como modelo para outras áreas costeiras que enfrentam desafios semelhantes. Ao aplicar técnicas de Eletromagnetismo Aéreo (AEM), os pesquisadores podem obter insights detalhados sobre os complexos processos hidrológicos que ocorrem nesses ambientes.	72	2010

Jorgensen et al., 2012	Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise	O uso do SkyTEM, integrado a dados sísmicos de superfície e elétricos, para desenvolver modelos subsuperficiais que delineiem adequadamente a distribuição do aquífero entre interfaces de água doce/salgada e estruturas geológicas que afetam o fluxo de água subterrânea no norte da Alemanha.	69	2012
Kirkegaard et al., 2011	Salinity Distribution in Heterogeneous Coastal Aquifers Mapped by Airborne Electromagnetics	Demonstra como a profundidade da água e a salinidade podem ser mapeadas com precisão usando o SkyTEM em combinação com um esquema de inversão robusto e flexível.	65	2011
Knight et al., 2018	Mapping Aquifer Systems with Airborne Electromagnetics in the Central Valley of California	O estudo examinou a aplicação do método eletromagnético aéreo (AEM) para o desenvolvimento de modelos conceituais de sistemas aquíferos no Vale Central da Califórnia. O Vale Central é uma área agrícola crucial fortemente dependente de águas subterrâneas para irrigação. No entanto, uma compreensão detalhada dos sistemas aquíferos e sua distribuição espacial é essencial para o adequado e sustentável gerenciamento dos recursos hídricos. Ao comparar a interpretação resultante com uma seção transversal existente, a eficácia do levantamento AEM no mapeamento da hidroestratigrafia de sistemas aquíferos em larga escala no Vale Central foi demonstrada. Além disso, as descobertas também contribuíram para uma melhor compreensão da interconectividade entre aquíferos e suas relações com as unidades geológicas subjacentes.	41	2018

Teatini et al., 2011	Understanding the hydrogeology of the Venice Lagoon subsurface with airborne electromagnetics	Os dados revelam claramente a origem e a extensão interna da contaminação por água salgada em aquíferos costeiros rasos ao longo da margem sul da Lagoa de Veneza. Os dados do AEM foram complementados com aquisições sísmicas de alta resolução (VHRS, na sigla em inglês). A análise e integração desses dois conjuntos de dados permitem distinguir a heterogeneidade e a variabilidade litoestratigráfica dos fluidos subterrâneos.	32	2011
Siemon et al., 2011	Application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas	O artigo aborda o uso de levantamentos eletromagnéticos aéreos (AEM) em domínio de frequência em áreas urbanas para a exploração de águas subterrâneas na subsuperfície rasa. Ele aborda técnicas para corrigir dados sintéticos e reais para os efeitos de fontes artificiais nos dados adquiridos em áreas povoadas (Onstwedde - Países Baixos; Banda Aceh - Indonésia; Werra river valley - Alemanha).	27	2011
Costabel et al., 2017	Geophysical investigation of a freshwater lens on the island of Langeoog, Germany – Insights from combined HEM, TEM and MRS data	O artigo discute estratégias para combinar conjuntos de dados 1D e 3D em um esquema de inversão conjunto, integrado com dados litológicos obtidos de poços perfurados. Ele demonstra que a técnica é sensível à condutividade da água subterrânea nos sedimentos do aquífero, capaz de distinguir entre água doce e salina, e os dados se alinham com a condutividade medida nos poços.	26	2017

Oldenborger et al., 2013	Airborne time-domain electromagnetics, electrical resistivity and seismic reflection for regional three-dimensional mapping and characterization of the Spiritwood Valley Aquifer, Manitoba, Canada.	O artigo aborda a eficácia dos dados de Eletromagnetismo Aéreo (AEM) em comparação com dados sísmicos e elétricos de superfície. Os resultados obtidos pela imagem de profundidade de condutividade (CDI) têm o potencial de mapear morfologias complexas, como aquíferos subterrâneos em vales profundos, e indicam os materiais que preenchem os vales incisos, sendo mais resistivos do que o preenchimento do vale mais amplo, consistente com uma interpretação de areia e cascalho.	24	2013
--------------------------	--	---	----	------

Para representar os dados visualmente, uma Nuvem de Palavras (Figura 5.5) foi criada usando a ferramenta online de análise de conteúdo TAgCrownd. Todas as palavras-chave dos 72 documentos encontrados na busca da Web of Science foram inseridas na ferramenta. O software online gerou um diagrama que representa as cinquenta palavras-chave com as maiores frequências, onde o tamanho da fonte de cada palavra exibida no diagrama é proporcional ao número de citações para cada palavra. Isso permite a identificação das principais áreas ou tópicos de pesquisa.

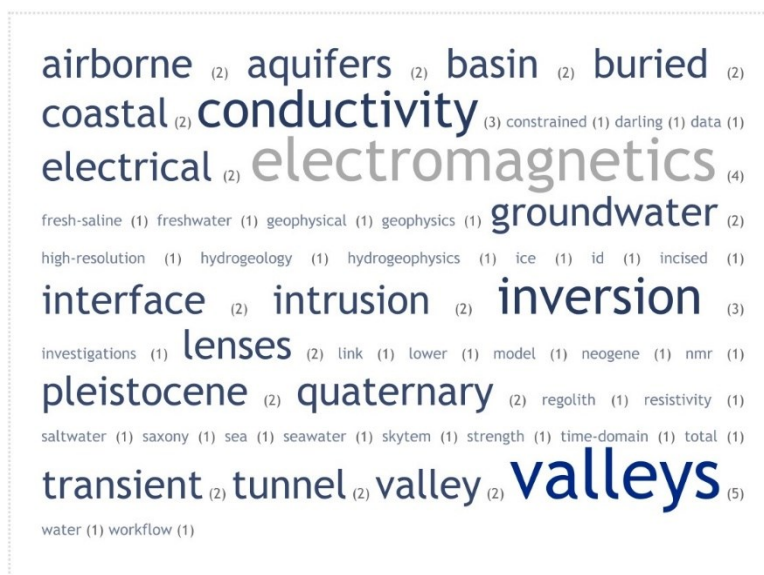


Figura 5.5: Frequência de palavras-chaves.

As palavras-chave são características distintivas do trabalho, permitindo que os estudos sejam agrupados e classificados (Calazans et al., 2015). Ao analisar a figura que inclui as cinquenta palavras-chave mais citadas, pode-se observar que o principal tema de pesquisa relacionado a levantamentos eletromagnéticos aéreos e água subterrânea é o estudo das fontes geradoras (doce-salinidade, água doce, água salgada, água subterrânea), ambientes de armazenamento de água (aquíferos, bacias, vales, costais, túneis enterrados, lentes, quaternários, regolito, intrusões) e técnicas e metodologias de prospecção (elétricas, condutividade, eletromagnéticas, inversão, hidrogeologia, hidrogeofísica).

Diferentes perspectivas sobre a tecnologia de Eletromagnetismo Aéreo contribuem para uma compreensão mais ampla do assunto, tornando essencial compreender as principais abordagens. Para alcançar esse objetivo, um mapa de cocitação foi gerado (Figura 5.6 e Figura 5.7) para estabelecer a proximidade dos estudos mais frequentemente abordados e suas principais contribuições ou foco teórico (Zupic e Cater

2015). Para essa análise, foram considerados documentos relacionados ao tema de 2002 até abril de 2023.

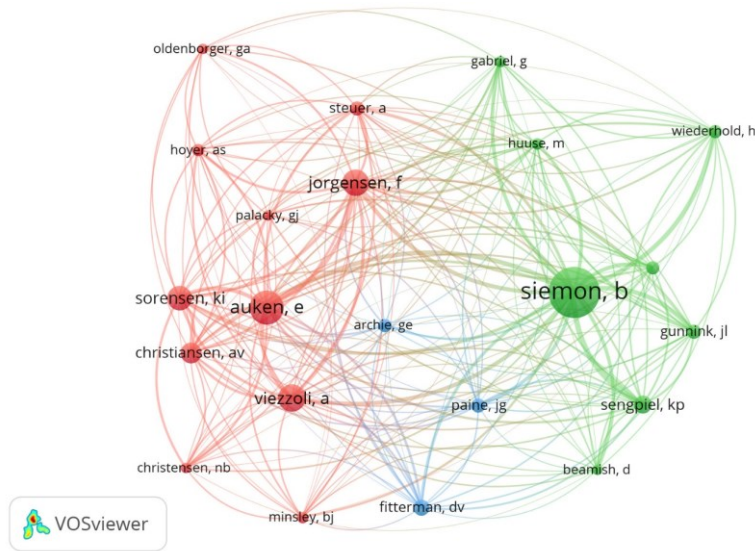


Figura 5.6: Mapa de rede de coautoria entre os autores dos artigos selecionados para o período de 2002 a 2023 (Fonte: Web of Science). A rede mais estruturada está centrada no pesquisador com mais publicações sobre o tema desta revisão sistemática da literatura (RSL). Linhas mais espessas indicam relações de citação direta e mais intensa entre os pesquisadores, enquanto linhas mais finas representam citação indireta e coautoria

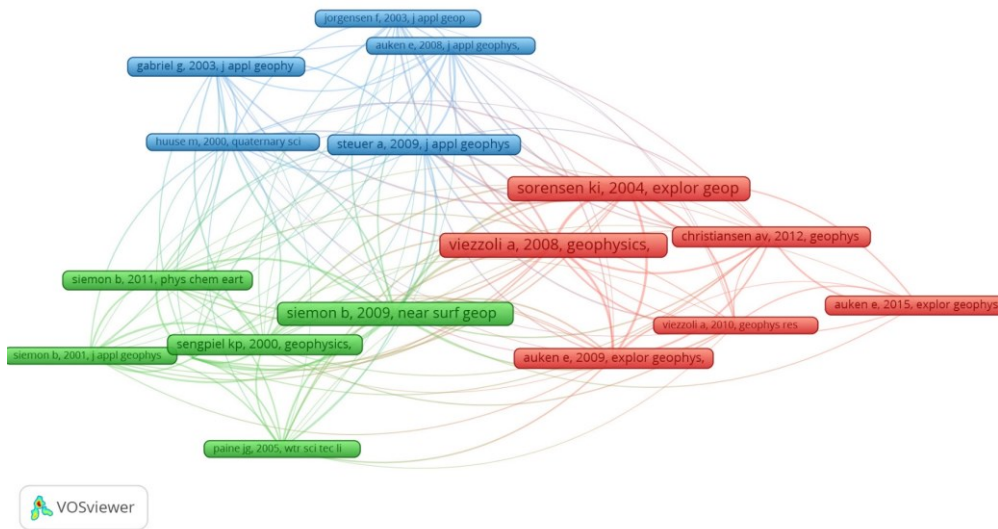


Figura 5.7: A intensidade da rede de cocitação entre os autores que pesquisam o assunto em questão (Fonte: Web of Science). Nesta figura, destaca-se a intensidade da rede em torno do autor central Siemon, B. em relação aos outros pesquisadores.

Na (Figura 5.6), é mostrado a rede de coautoria entre os autores mais citados e suas relações, a rede é agrupada e focada praticamente em 2 cluster: Cluster vermelho, rede centralizada nos autores Auken, Christensen, Jorgensen, Viezolli, Oldenburguer e entre outros, com intensa força de coautoria entre esses autores; Cluster verde, rede centralizadas em Siemon B. e Sengpil e entre outros com menor intensidade de coautoria, mas demonstrando um contrabalanço na rede de coautoria.

Na (Figura 5.7), é evidente como os trabalhos estão agrupados e citados, seguindo diferentes abordagens. Classificados em três clusters principais:

O cluster verde, trabalhos relacionados a levantamentos AEM, destaca melhorias e desenvolvimentos de perfis de resistividade e profundidade para dados coletados eletromagneticamente por helicópteros. Os autores apresentam estudos de caso e exemplos de aplicação desse método em várias regiões geográficas, enfatizando as vantagens dessas técnicas. Eles conseguem mapear eficientemente grandes áreas e obter informações detalhadas sobre a distribuição de aquíferos e características hidrogeológicas no subsolo. Os artigos também abordam desafios, limitações, perspectivas futuras e áreas de pesquisa em andamento relacionadas aos métodos eletromagnéticos aéreos para exploração de águas subterrâneas. Além disso, discutem a aplicação de levantamentos AEM em domínio de frequência para exploração de águas subterrâneas em áreas urbanas (Siemon, 2001; Siemon et al., 2009; Siemon et al., 2011; Gunnink et al., 2012; Sengpiel e Siemon 2000).

No cluster azul, são apresentados trabalhos relacionados a levantamentos AEM em domínio de tempo e frequência para caracterizar vales enterrados no norte da Alemanha. Os estudos descrevem técnicas robustas de inversão com restrições laterais, comparando os resultados e diferenças na resolução e sensibilidade desses métodos, incluindo técnicas como refração/reflexão sísmica e resistividade elétrica. As descobertas fornecem informações sobre a geometria e propriedades geológicas/hidrogeológicas dos vales, influenciando a distribuição e comportamento dos aquíferos na região estudada. Portanto, esses estudos contribuem para a compreensão da evolução geomorfológica e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos (Steuer et al., 2009; Gabriel et al., 2003; Auken et al., 2008; Jorgensen et al., 2003).

No cluster vermelho, os trabalhos concentram-se no desenvolvimento de novos algoritmos para modelagem direta e inversa de dados eletromagnéticos aéreos, visando

aprimorar a resolução e interpretação, destacando a importância de restrições espaciais para obter resultados mais precisos. Alguns desses estudos foram conduzidos na Lagoa de Venezia, na Itália, com foco no mapeamento da distribuição e interconexão de água superficial e subterrânea, revelando padrões espaciais na interface de água salgada/doce na região. Essas percepções são valiosas para o gerenciamento de recursos hídricos em ambientes costeiros. Portanto, esses trabalhos contribuem para o avanço das técnicas de modelagem e interpretação de dados eletromagnéticos aéreos e sua utilidade na exploração de águas subterrâneas (Viezzoli et al., 2008; Viezzoli et al., 2010; Auken et al., 2009; Auken et al., 2015; Sorensen e Auken, 2004; Christiansen e Auken 2012).

Uma análise de acoplamento bibliográfico também foi conduzida (Figura 5.8 e Figura 5.9), revelando as principais frentes de pesquisa, ou seja, como os estudos mais recentes estão configurados. Para essa análise, foram considerados documentos relacionados ao tema de 2013 a 2023.

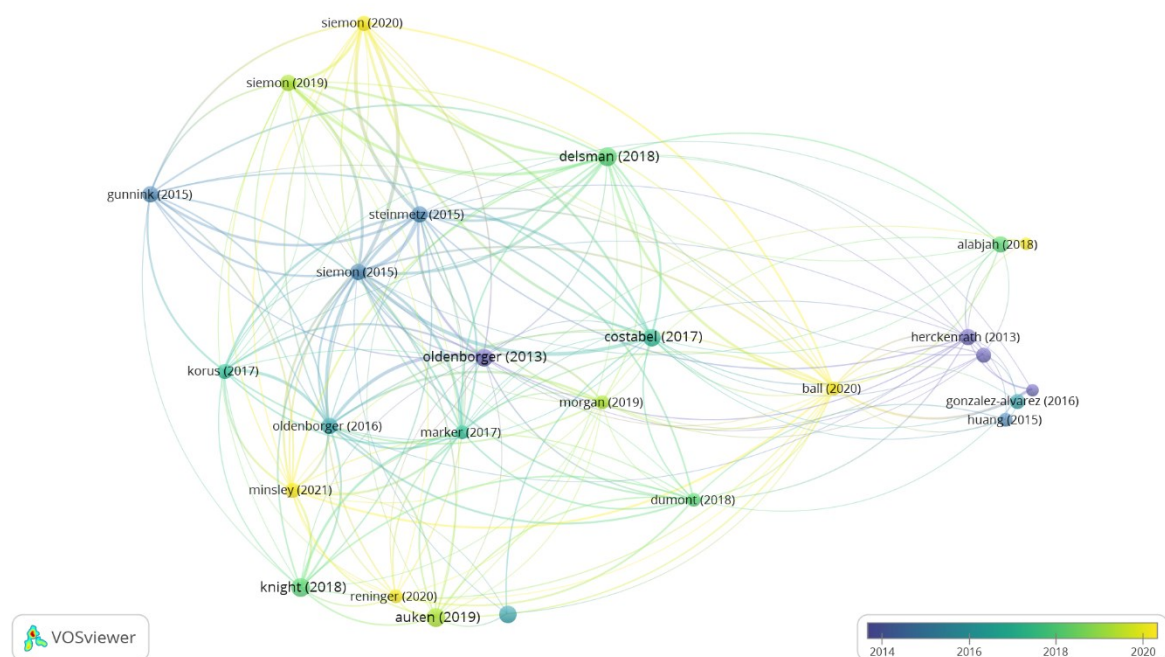


Figura 5.8: Mapa de acoplamento bibliográfico: Principais pesquisas.

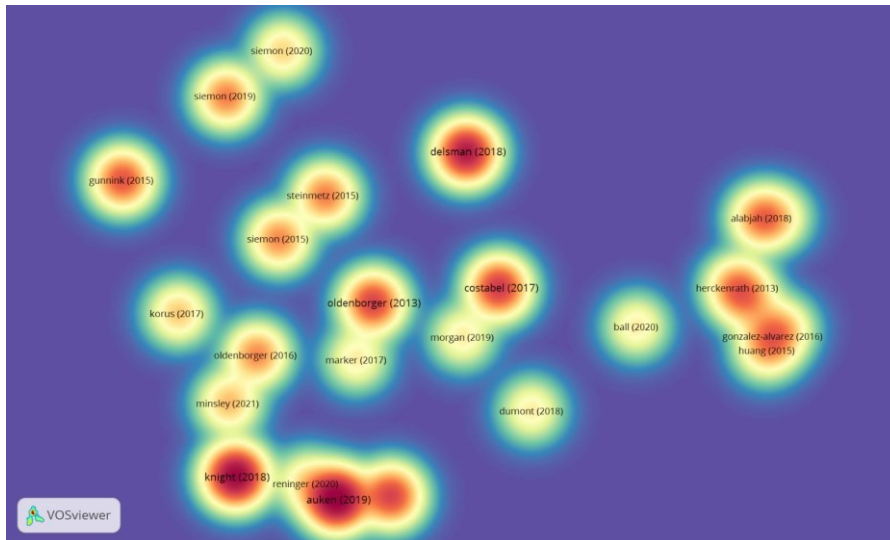


Figura 5.9: Mapa de densidade de citação: Principais pesquisas. Note a cores mais quentes para os artigos mais citados.

Pelo mapa de acoplamento bibliográfico e densidade de citações (Figura 5.8 e Figura 5.9), destacam-se os trabalhos de: Knight et al., 2018; Delsman et al., 2018; Costabel et al., 2017; Oldenborger et al., 2016; Siemon et al., 2019; Steinmetz et al., 2015 e Minsley et al., 2021. No artigo publicado na revista *GEOPHYSICS*, que atualmente possui 45 citações, Auken et al., 2019 descrevem o desenvolvimento de um sistema eletromagnético transitório rebocado por um veículo terrestre chamado towed TEM, projetado para mapear os primeiros 70 metros do subsolo com detalhes no Vale Central da Califórnia. O uso dessas técnicas em regiões como o Delta do Mississippi para localizar locais de recarga artificial ou mapear com grande detalhe a geologia subsuperficial é uma aplicação valiosa na construção de modelos hidrogeológicos, essenciais para infraestrutura, abastecimento de água, armazenamento e recuperação de aquíferos, agricultura, depósitos de aterros sanitários e construção.

No artigo publicado por Delsman et al. (2018) na revista *Environmental Research Letters*, que foi citado pelo menos 34 vezes, o estudo aborda o uso de levantamentos eletromagnéticos aéreos (AEM) para mapear a salinidade em larga escala em Zeeland, uma província no sudoeste dos Países Baixos, com o objetivo de aprimorar a gestão da água subterrânea na região. A intrusão salina é uma preocupação significativa em áreas costeiras, onde a água do mar pode infiltrar-se nos aquíferos e comprometer a qualidade da água doce. Portanto, a gestão cuidadosa é essencial para evitar a superexploração desses recursos hídricos vulneráveis, exigindo informações detalhadas sobre sua ocorrência espacial. A coleta de dados eletromagnéticos em larga escala visava mapear a

distribuição de salinidade no subsolo. Com base nesses dados, eles desenvolveram um modelo probabilístico para estimar a probabilidade de ocorrência de água salina em diferentes áreas de Zeeland. O artigo descreve detalhadamente a metodologia usada para a aquisição de dados eletromagnéticos e a construção do modelo probabilístico de salinidade. Assim, a aplicação do levantamento eletromagnético aéreo (AEM) mostrou ser uma ferramenta valiosa para mapear eficientemente a condutividade do solo, como um indicador de novos recursos hídricos subterrâneos, sendo sensível às zonas de transição de água doce-salina, traduzindo a condutividade do solo para a salinidade da água por meio da construção de um modelo de voxel 3D de alta resolução. Os resultados forneceram uma visão mais detalhada e abrangente da distribuição de salinidade em Zeeland, o que é crucial para a gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos na região.

O artigo publicado por Minsley et al. (2021) no *Geophysical Journal International*, que já possui 11 citações, apresenta um estudo de caso para abordar a combinação de dados eletromagnéticos aéreos com técnicas estatísticas avançadas para quantificar as incertezas do modelo. O estudo revela que a incerteza estrutural do modelo é significativa e pode depender de vários fatores, como a qualidade dos dados e a natureza do meio, onde os autores discutem as implicações dessas incertezas para a interpretação geológica e hidrogeológica dos resultados obtidos. O artigo contribui para o avanço das técnicas de quantificação de incertezas na modelagem geofísica e destaca a importância de considerar a incerteza nos resultados. Isso auxilia os geofísicos na tomada de decisões apropriadas e interpretações de modelos geofísicos em estudos relacionados à exploração e gestão de recursos naturais.

O artigo publicado por Flinchum et al. (2021) no *Geophysics Journal*, que já possui 1 citação, investiga um sistema remoto de águas subterrâneas em um paleovale semiárido usando uma combinação de técnicas geofísicas. Os pesquisadores buscam aprimorar a compreensão das propriedades hidrogeológicas do subsolo, especificamente na Austrália árida e semiárida. Os métodos geofísicos utilizados no estudo incluem eletromagnéticos aéreos (AEM), refração sísmica, reflexão sísmica e ressonância magnética nuclear (NMR) em poços. Cada uma dessas técnicas fornece informações valiosas sobre diferentes aspectos do subsolo, podendo limitar a geometria do aquífero,

identificar contrastes de salinidade e identificar processos que impulsionam a troca de fluxos.

O estudo é especialmente significativo para regiões remotas e semiáridas, onde o acesso a recursos hídricos subterrâneos é essencial para diversos fins, como agricultura, abastecimento de água e preservação ambiental. As descobertas desta pesquisa podem contribuir para uma melhor gestão de recursos hídricos e uso sustentável de águas subterrâneas nesses ambientes desafiadores.

No geral, o artigo demonstra a importância e eficácia da combinação de várias técnicas geofísicas para obter uma compreensão abrangente da hidrogeologia subsuperficial e sua relevância para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em áreas remotas e semiáridas, demonstrando-se relevante no propósito desta revisão literária.

E, finalmente, o mapa de correlação das instituições (Figura 5.10) que mais publicaram artigos nesse tema de 2010 a 2023. Foram selecionadas instituições com um mínimo de 3 publicações

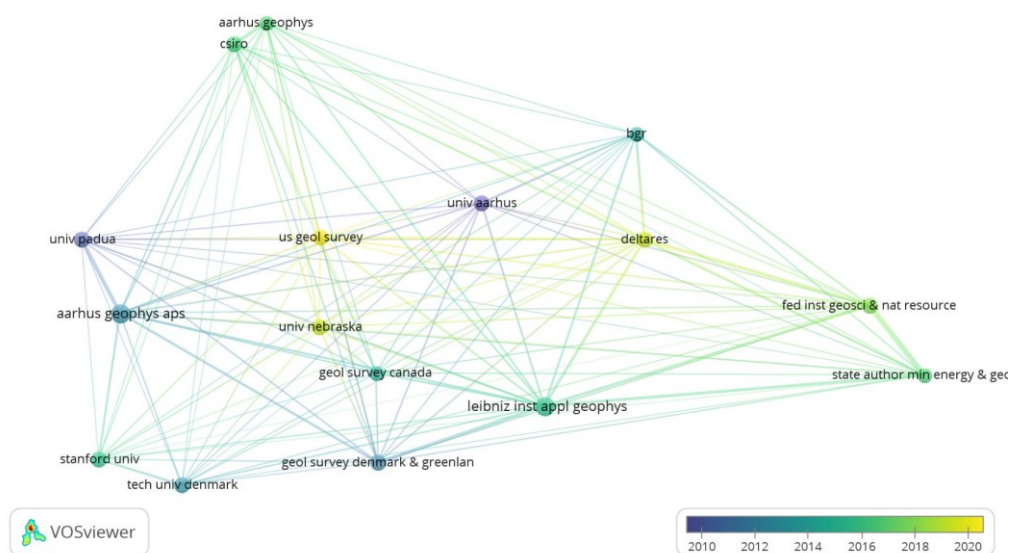


Figura 5.10: Mapa de acoplamento bibliográfico: Instituições Responsáveis.

No acoplamento bibliográfico das instituições responsáveis (Figura 5.10), várias instituições renomadas se destacam no campo da geofísica aplicada, contribuindo

significativamente para o avanço do conhecimento científico e sendo reconhecidas por suas publicações e citações. Entre essas instituições estão:

Universidade de Aarhus (Dinamarca): A Universidade de Aarhus é conhecida por sua excelência em pesquisa geofísica. Com 8 publicações e 234 citações, esta instituição tem sido pioneira em diversas áreas, como estudos sobre a estrutura interna da Terra, processos geodinâmicos e interações atmosfera-oceano.

Instituto Federal de Geociências e Recursos Naturais (BGR - Alemanha): O BGR é uma instituição de pesquisa alemã dedicada ao estudo das ciências da Terra. Com 5 publicações e 162 citações, o instituto contribuiu significativamente para a compreensão dos recursos naturais e processos geológicos em escalas regional e global.

Aarhus Geophysics: Aarhus Geophysics é um centro de pesquisa especializado em geofísica localizado na Dinamarca. Com 5 publicações e 161 citações, esta instituição se destacou em áreas como prospecção geofísica, modelagem de dados e interpretação sísmica.

Instituto Leibniz de Geofísica Aplicada (LIAG): Localizado na Alemanha, o LIAG é um instituto de pesquisa dedicado à aplicação prática da geofísica em diversas áreas, incluindo recursos naturais, engenharia geotécnica e monitoramento ambiental. Com 5 publicações e 116 citações, o instituto tem sido reconhecido por sua abordagem interdisciplinar e contribuições para a geofísica aplicada.

Universidade de Pádua (Itália): A Universidade de Pádua, na Itália, possui uma longa tradição em pesquisa geofísica. Com 3 publicações e 104 citações, a instituição tem sido ativa em estudos de sismologia, vulcanologia e geofísica ambiental.

Serviço Geológico dos Estados Unidos (US Geological Survey - EUA): O Serviço Geológico dos Estados Unidos é conhecido por sua extensa pesquisa geofísica e monitoramento. Com 3 publicações e 24 citações, esta organização desempenhou um papel fundamental na compreensão da geologia e na previsão de desastres naturais nos Estados Unidos.

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO - Austrália): A CSIRO é uma organização de pesquisa científica na Austrália que abrange

cada vértice no gráfico, significando que o nó com o maior número de conexões estará no centro da rede. Conforme confirmado anteriormente na (Figura 5.11), as palavras dos títulos e resumos corroboram o que foi encontrado nas palavras-chave dos artigos, com "airborne electromagnetics" e "groundwater" localizados no centro da rede, também sendo as mais citadas. Cinco subgrupos/clusters podem ser distinguidos:

Cluster verde com palavras-chaves como: "airborne radiometrics", "fresh-saline groundwater", "valleys", "saltwater intrusion", "3D inversion" and "Pleistocene".

Cluster amarelo com palavras-chaves: "buried quaternary valleys", "geophysical investigations", "time domain", "Cuxhaven" and "geophysical investigations".

Cluster azul com palavras-chaves: "tunnel valleys", "buried valleys", "helicopter-borne electromagnetic", "SkyTEM", "heterogeneity" and "TEM".

Cluster roxo com palavras-chaves: "airborne electromagnetic", "coastal aquifer", "geophysical methods", "Darling base" and "salinity".

Cluster vermelho com palavras-chaves: "groundwater", "inversion", "electromagnetics", "constrained inversion", "water", "interface" and "landscape evolution".

Esses clusters representam grupos de palavras que frequentemente aparecem juntas nos artigos, indicando temas comuns e áreas de pesquisa dentro do campo de "Eletromagnetismo Aéreo" e "Água Subterrânea". A visualização dessa rede ajuda a identificar as relações entre as palavras mais citadas e sua interconexão, fornecendo informações importantes sobre as principais áreas de foco da pesquisa nesse domínio.

Conclusões

O objetivo desta pesquisa foi identificar as principais abordagens relacionadas aos Levantamentos Eletromagnéticos Aéreos (AEM) focados em águas subterrâneas e mais precisamente em regiões semiáridas, os autores que fizeram as contribuições mais significativas e as principais fontes de pesquisa. Esses trabalhos abrangem diversos aspectos relacionados à aplicação de métodos geofísicos, particularmente o método (AEM), para investigar e caracterizar o subsolo. O foco principal é aprimorar a resolução, precisão e compreensão das propriedades geológicas e hidrogeológicas do subsolo e explorar os recursos hídricos subterrâneos. Isso inclui modelagem tridimensional de dados eletromagnéticos aéreos por meio de inversão espacialmente limitada, possibilitando modelos mais precisos e detalhados de aquíferos de águas subterrâneas. Além disso, a pesquisa abrange a caracterização de características geomorfológicas subterrâneas, como vales enterrados, interação e troca de água salgada/doce entre a

superfície e o subsolo em ambientes costeiros, algoritmos avançados e estáveis para modelagem direta e inversa de dados eletromagnéticos e elétricos obtidos por meio de diversas técnicas, como levantamentos aéreos e terrestres e poços. Isso estende a aplicabilidade desses métodos em estudos geofísicos para prospecção de águas subterrâneas e gerenciamento de recursos hídricos.

Entre os autores que fizeram contribuições significativas são:

Bernhard Siemon: Seus estudos comparam dados AEM nos domínios do tempo e da frequência, proporcionando insights sobre as vantagens e limitações desses métodos para investigar recursos hídricos subterrâneos.

Esben Auken: Ele se destaca na investigação de vales enterrados usando técnicas de inversão de dados AEM, aprofundando a compreensão da resolução dessas técnicas e a caracterização de vales enterrados.

Annika Steuer: Ela contribui para o conhecimento sobre a aplicação de métodos AEM na exploração de águas subterrâneas em áreas urbanas. Seus estudos abordam desafios e soluções práticas para o uso desses métodos em ambientes urbanos complexos.

A. Viezzoli e P. Teatine: Eles conduziram estudos sobre a troca de água de superfície e subsuperfície em ambientes costeiros. Sua pesquisa, incluindo o exemplo da Lagoa de Veneza, fornece informações cruciais sobre a interação entre água doce e salgada nessas áreas e sua influência na gestão de recursos hídricos.

Jorgensen F.: Ele contribuiu com estudos sobre a investigação de vales enterrados na Dinamarca, usando uma abordagem integrada de várias técnicas geofísicas, possibilitando a compreensão da geometria e propriedades desses vales, impactando positivamente o gerenciamento de aquíferos.

Flinchum et al., 2021: Contribui para os estudos de águas subterrâneas por meio da aplicação de diversas técnicas geofísicas em um sistema remoto de águas subterrâneas em um antigo vale semiárido. Sua pesquisa aborda os desafios de compreender e caracterizar os recursos hídricos subterrâneos em tais regiões. Além disso, seu trabalho fornece insights e serve como referência para outros cientistas e pesquisadores que atuam no campo de estudos de águas subterrâneas. Ao utilizar AEM e técnicas geofísicas adicionais para aprimorar o conhecimento hidrogeológico em regiões semelhantes, ele

contribui para uma compreensão mais profunda dos sistemas de águas subterrâneas e sua importância para comunidades locais e ecossistemas.

Costa G.L.: Propõe modelagem e inversão de dados eletromagnéticos e magnéticos para uma interpretação conjunta e obtenção de uma imagem volumétrica de favorabilidade para hidrogeofísica numa região semiárida do nordeste brasileiro, mas que pode ser aplicada em outras áreas.

Numa perspectiva mais ampla, esses autores desempenharam papéis extremamente relevantes no avanço do conhecimento e das técnicas utilizadas na exploração de águas subterrâneas e na caracterização de aquíferos. Seus estudos tiveram um impacto significativo no gerenciamento sustentável dos recursos hídricos e na compreensão dos processos geológicos e hidrogeológicos que moldam esses ambientes. Como resultado, o objetivo desta pesquisa de apresentar uma revisão sistemática das principais contribuições da literatura de alto impacto foi alcançado.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, ao Instituto de Geociências e à própria Universidade de Brasília, a nossa profunda gratidão pelo apoio e colaboração ao longo de toda nossa jornada de pesquisa.

Referencias

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; JACOBSEN, L. H.; SORENSEN, K. I. 2008. A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of tem data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 65, n. 1, p. 10–20. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985108000232>.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; KIRKEGAARD, C.; FIANDACA, G.; SCHAMPER, C.; BEHROOZMAND, A. A.; BINLEY, A.; NIELSEN, E.; EFFERSO, F.; CHRISTENSEN, N. B.; SORENSEN, K.; FOGED, N.; VIGNOLI, G. 2015. An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data. **Exploration Geophysics**, Taylor Francis, v. 46, n. 3, p. 223–235. <https://doi.org/10.1071/EG13097>.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; WESTERGAARD, J. H.; KIRKEGAARD, C.; FOGED, N.; VIEZZOLI, A. 2009. An integrated processing scheme for high-resolution

airborne electromagnetic surveys, the skytem system. **Exploration Geophysics**, Taylor Francis, v. 40, n. 2, p. 184–192. <https://doi.org/10.1071/EG08128>.

AUKEN, E.; FOGED, N.; LARSEN, J. J.; LASSEN, K. V. T.; MAURYA, P. K.; DATH, S. M.; EISKJAER, T. T. 2019. ttem — a towed transient electromagnetic system for detailed 3d imaging of the top 70 m of the subsurface. **GEOPHYSICS**, v. 84, n. 1, p. E13–E22. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0355.1>.

BEDROSIAN, P. A.; SCHAMPER, C.; AUKEN, E. 2016. A comparison of helicopter-borne electromagnetic systems for hydrogeologic studies. **Geophysical Prospecting**, v. 64, n. 1, p. 192–215. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2478.12262>.

BOAGA, J. 2017. The use of fdem in hydrogeophysics: A review. **Journal of Applied Geophysics**, v. 139, p. 36–46. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985117301507>.

CALAZANS, A. T. S.; MARIANO A. M.; PALDÊS, R. A. 2015. A systematic review of the literature on functional software size metrics using metaanalytic approach. **ADMPG**, scielo, v. 55, p. 335 – 342, 09. ISSN 1983-6791.

CASTRO, K. C. P. L. e CUNHA, L. S. 2021. Forensic investigations with the identification of human remains with ground penetrating radar (gpr): A review. **Estudos Geológicos**, v. 31, p64-86, 02. [10.18190/1980-8208/estudos-geologicos](https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudos-geologicos).

CHRISTIANSEN, A. V. e AUKEN, E. 2012. A global measure for depth of investigation. **GEOPHYSICS**, v. 77, n. 4, p. WB171–WB177. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0393.1>.

COSTABEL, S.; SIEMON, B.; HOUBEN, G.; GUNTHER, T. 2017. Geophysical investigation of a freshwater lens on the island of Langeoog, Germany – insights from combined hem, tem and mrs data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 136, p. 231–245. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116304980>.

DELSMAN, J. R.; BAAREN, E. S. VAN; SIEMON, B.; DABEKAUSSEN, W.; KARAOLIS, M. C.; PAUW, P. S.; VERMAAS, T.; BOOTSMA, H.; LOUW, P. G. B.; GUNNINK, J. L.; DUBELAAR, C. W.; MENKOVIC, A.; STEUER, A.; MEYER, U.; REVIL, A.; ESSINK, G. H. P. O. 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 13, n. 8, p. 084011. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aad19e>.

FLINCHUM, B.; PEETERS, L.; MUNDAY, T.; CAHILL, K. 2021. Improving the hydrogeologic conceptualization of a remote semiarid palaeovalley groundwater system using airborne electromagnetics, seismic refraction and reflection, and downhole nuclear magnetic resonance. **Geophysics**, v. 86, n. 5, p. WB149–WB168, 09. ISSN 0016-8033. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0614.1>.

GABRIEL, G.; KIRSCH, R.; SIEMON, B.; WIEDERHOLD, H. 2003. Geophysical investigation of buried pleistocene subglacial valleys in northern germany. **Journal of Applied Geophysics**, v. 53, n. 4, p. 159–180. ISSN 0926-9851. Geophysical Investigations of Buried Quaternary Valleys in the Formerly Glaciated NW European Lowland: Significance for Groundwater Exploration. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985103000594>.

GALVÃO T.F., P. T.; HARRAD, D. 2015. Principais itens para relatar revisões sistemáticas e metaanálises: A recomendação prisma. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, scielo, v. 24, p. 335 – 342, 06. ISSN 1679-4974.

GUNNINK, J. L.; BOSCH, J. H. A.; SIEMON, B.; ROTH, B.; AUKEN, E. 2012. Combining ground-based and airborne em through artificial neural networks for modelling glacial till under saline groundwater conditions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 8, p. 3061–3074. <https://hess.copernicus.org/articles/16/3061/2012/>.

JORGENSEN, F.; LYKKE-ANDERSEN, H.; SANDERSEN, P. B.; AUKEN, E.; NORMARK, E. 2003. Geophysical investigations of buried quaternary valleys in denmark: an integrated application of transiente electromagnetic soundings, reflection seismic surveys and exploratory drillings. **Journal of Applied Geophysics**, v. 53, n. 4, p. 215–28. ISSN 0926-9851. Geophysical Investigations of Buried Quaternary Valleys in the Formerly Glaciated NW European Lowland: Significance for **Groundwater Exploration**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985103000624>.

JORGENSEN, F.; SCHEER, W.; THOMSEN, S.; SONNENBORG, T. O.; HINSBY, K.; WIEDERHOLD, H.; SCHAMPER, C.; BURSCHIL, T.; ROTH, B.; KIRSCH, R.; AUKEN, E. 2012. Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 7, p. 1845–1862. <https://hess.copernicus.org/articles/16/1845/2012/>.

KIRKEGAARD, C.; SONNENBORG, T. O.; AUKEN, E.; JORGENSEN, F. 2011. Salinity Distribution in Heterogeneous Coastal Aquifers Mapped by Airborne Electromagnetics. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 1, p. 125–135, 02 2011. ISSN 1539-1663. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0038>.

KNIGHT, R.; SMITH, R.; ASCH, T.; ABRAHAM, J.; CANNIA, J.; VIEZZOLI, A.; FOGG, G. 2018. Mapping aquifer systems with airborne electromagnetics in the central valley of california. **Groundwater**, v. 56, n. 6, p. 893–908. <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gwat.12656>.

KORUS, J. 2018. Combining hydraulic head analysis with airborne electromagnetics to detect and map impermeable aquifer boundaries. **Water**, v. 10, n. 8. ISSN 2073-4441. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/975>.

KRETSCHMER, H. 2004. Author productivity and geodesic distance in bibliographic co-authorship networks, and visibility on the web. p. 409–420.

MINSLEY, B. J.; FOKS, N. L.; BEDROSIAN, P. A. 2021. Quantifying model structural uncertainty using airborne electromagnetic data. **Geophysical Journal International**, v. 224, n. 1, p. 590–607, 08. ISSN 0956-540X. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa393>.

NERI, L. B.; BARROS, L.; FONTENELE, D. 2021. Evolution of research in infrasound technology using consolidated meta-analytic approach theory. **Modern Sciences Journal**, v. 31.

OLDENBORGER, G. A.; PUGIN, A. J.-M.; PULLAN, S. E. 2013. Airborne time-domain electromagnetics, electrical resistivity and seismic reflection for regional three-dimensional mapping and characterization of the spiritwood valley aquifer, manitoba, canada. **Near Surface Geophysics**, v. 11, n. 1, p. 63–74. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.3997/1873-0604.2012023>.

OLDENBORGER, G.; LOGAN, C.; HINTON, M.; PUGIN, A.-M.; SAPIA, V.; SHARPE, D.; RUSSELL, H. 2016. Bedrock mapping of buried valley networks using seismic reflection and airborne electromagnetic data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 128, p. 191–201. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116300581>.

PORRITT, K.; GOMERSALL, J.; LOCKWOOD, C. 2014. Jbi's systematic reviews: Study selection and critical appraisal. **The American Journal of Nursing**, v. 114, n. 6, p. 47–52. <http://dx.doi.org/10.1097/01.NAJ.0000450430.97383.64>.

SENGPIEL, K.; SIEMON, B. 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. **GEOPHYSICS**, v. 65, n. 6, p. 1983–1992. <https://doi.org/10.1190/1.1444882>.

SIEMON, B. 2001. Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 46, n. 1, p. 65–76. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985100000409>.

SIEMON, B.; BAAREN, E. VAN; DABEKAUSSEN, W.; DELSMAN, J.; DUBELAAR, W.; KARAOLIS, M.; STEUER, A. 2019. Automatic identification of fresh–saline groundwater interfaces from airborne electromagnetic data in zeeland, the netherlands. **Near Surface Geophysics**, v. 17, n. 1, p. 3–25. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nsg.12028>.

SIEMON, B.; CHRISTIANSEN, A. V.; AUKEN, E. 2009. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. **Near Surface Geophysics**, v. 7, n. 5-6, p. 629–646. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.3997/1873-0604.2009043>.

SIEMON, B.; STEUER, A.; ULLMANN, A.; VASTERLING, M.; VOS, W. 2011. Application of frequency domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater

exploration in urban areas. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 36, n. 16, p. 1373–1385. ISSN 1474-7065. **Urban Geophysics**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706511000398>.

SORENSEN, K. I. e AUKEN, E. 2004. Skytem – a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, Taylor Francis, v. 35, n. 3, p. 194–202. <https://doi.org/10.1071/EG04194>.

STEINMETZ, D.; WINSEMANN, J.; BRANDES, C.; SIEMON, B.; ULLMANN, A.; WIEDERHOLD, H.; MEYER, U. 2015. Towards an improved geological interpretation of airborne electromagnetic data: a case study from the cuxhaven tunnel valley and its neogene host sediments (northwest germany). **Netherlands Journal of Geosciences**, Cambridge University Press, v. 94, n. 2, p. 201–227.

STEUER, A.; SIEMON, B.; AUKEN, E. 2009. A comparison of helicopter-borne electromagnetics in frequency and time-domain at the cuxhaven valley in northern germany. **Journal of Applied Geophysics**, v. 67, n. 3, p. 194–205. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985107000717>.

TEATINI, P.; TOSI, L.; VIEZZOLI, A.; BARADELLO, L.; ZECCHIN, M.; SILVESTRI, S. 2011. Understanding the hydrogeology of the venice lagoon subsurface with airborne electromagnetics. **Journal of Hydrology**, v. 411, n. 3, p. 342–354. ISSN 0022-1694. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411007281>.

VIEZZOLI, A.; CHRISTIANSEN, A. V.; AUKEN, E.; SoRENSEN, K. 2008. Quasi-3D modeling of airborne tem data by spatially constrained inversion. **GEOPHYSICS**, v. 73, n. 3, p. F105–F113. <https://doi.org/10.1190/1.2895521>.

VIEZZOLI, A.; TOSI, L.; TEATINI, P.; SILVESTRI, S. 2010. Surface water–groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The venice lagoon example. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 1. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009GL041572>.

ZUPIC, I.; CATER, T. 2015. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.

CAPÍTULO VI

ARTIGO 2 – CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA AEROTRANSPORTADA DE SISTEMAS DE AQUÍFEROS CRISTALINOS FRATURADOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO: AVANÇOS NO CONHECIMENTO HIDROGEOFÍSICO PARA ÁREAS SUJEITAS A SECA.

ARTICLE 2 - AEROGEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF FRACTURED CRYSTALLINE AQUIFERS SYSTEM IN THE BRAZILIAN NORTHEASTERN SEMIARID REGION: ADVANCEMENTS IN HYDROGEOPHYSICAL KNOWLEDGE FOR DROUGHT-PRONE AREAS.

Costa G.L.¹ and M.G. Von Huelsen¹;

¹Seismological Observatory of University of Brasilia, University of Brasilia, Brasilia, 70910-900, Brazil

Resumo

A seca sazonal que ocorre no Nordeste do Brasil, agrava diversos problemas existentes na região. Nesse cenário a escassez de água afeta desde a subsistência da população até o desenvolvimento socioeconômico com o plantio realizado em larga escala. A baixa disponibilidade de recursos hídricos superficiais provocou a necessidade de busca por uma forma alternativa de captação de água, por meio de poços d'água subterrâneos, sendo uma das formas mais utilizadas na região do semiárido brasileiro. O presente trabalho visa observar a relação e a eficácia da aplicabilidade de dados geofísicos aerotransportados na identificação de estruturas e delimitação de regiões com alta favorabilidade à retenção de água subterrânea. Assim, serão utilizados os dados do Projeto PROASNE-Brasil, liberado pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB-CPRM), tendo como objetivo melhorar as condições de vida na região nordeste do Brasil, provendo-a de soluções sustentáveis para os problemas causados pela seca. O PROASNE consistiu na aquisição de dados geofísicos (magnetometria e eletromagnetometria) aerotransportados obtidos por helicóptero (HEM) na região de Serrinha-RN. A magnetometria foi sensível ao delimitar contatos magnéticos e detectar feições geológicas como contatos litológicos, foliação do embasamento cristalino e fraturas sub-verticais por meio da solução de Euler e Amplitude do Sinal Analítico. A inversão magnética recuperou corpos magnéticos em profundidade responsáveis pela variação do campo local, revelando estruturas geológica não mapeadas. O levantamento utilizou a tecnologia de métodos eletromagnéticos, especificamente no domínio da frequência (FDEM), que se constitui em uma ferramenta potencial no mapeamento e distribuição dos recursos hídricos subterrâneos nos ambientes de embasamento cristalino. Foram obtidas imagens da condutividade aparente para três faixas de frequência nominal e discriminados os condutores rasos a profundos, além da elaboração das seções da imagem da condutividade pela profundidade (CDI) para todas as linhas de voo, para enfim gerar uma malha 3D da condutividade aparente de toda a área da pesquisa na região de Serrinha e posteriormente a inversão dos dados de eletromagnetometria. As CDI's mostraram valores condutivos

elevados próximos a poços tubulares perfurados e cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e estruturas geológicas mapeadas pelo SGB e a inversão FDEM delimitou de maneira eficiente a condutividade da cobertura sedimentar; foram detectadas zonas condutivas nos terrenos cristalinos mostrando relação direta da condutividade com a presença de água salinizada. Esta pesquisa mostra dois fatores primordiais: os resultados obtidos tiveram êxito na identificação de estruturas e regiões em subsuperfície com alto potencial ao fluxo e armazenamento de água; a empregabilidade de técnicas de processamento aos dados eletromagnéticos aerotransportados mostrou um potencial na contribuição ao avanço da pesquisa hidrogeológica da região brasileira, podendo se estender a outras áreas.

Keywords: Eletromagnetismo Aerotransportado (AEM); Água Subterrânea; Hidrogeologia; Hidrogeofísica; modelagem 3D; Inversão; Regiões Semiáridas.

Abstract

The seasonal drought occurring in Northeast Brazil exacerbates various existing problems in the region. In this scenario, water scarcity affects everything from the population's subsistence to socioeconomic development with large-scale planting. The low availability of surface water resources has led to the need to search for an alternative water source through underground wells, one of the most commonly used methods in the Brazilian semiarid region. This study aims to observe the relationship and effectiveness of the applicability of airborne geophysical data in identifying structures and delineating regions with high favorability for retaining groundwater. The data from the PROASNE-Brazil Project, released by the Brazilian Geological Survey (SGB-CPRM), will be used for this purpose, aiming to improve living conditions in the Northeast region of Brazil by providing sustainable solutions to problems caused by drought. PROASNE involved the acquisition of airborne geophysical data obtained by helicopter (HEM) in the Serrinha-RN region. The survey used electromagnetic methods, specifically in the frequency domain (FDEM), which is a potential tool in mapping and distributing underground water resources in crystalline basement environments. Images of apparent conductivity were obtained for three nominal frequency ranges, discriminating shallow to deep conductors. Conductivity depth sections (CDI) were prepared for all flight lines, generating a 3D mesh of apparent conductivity for the entire research area in the Serrinha region. Subsequently, data inversion was performed for electromagnetic data. CDIs showed elevated conductive values near drilled boreholes registered in the Groundwater Information System (SIAGAS) and geological structures mapped by the SGB. The FDEM inversion efficiently delineated the conductivity of sedimentary cover, revealing the depth of the crystalline basement top; conductive zones in crystalline terrains were detected, showing a direct relationship between conductivity and the presence of saline water. Magnetometry was sensitive in delineating magnetic contacts and detecting geological features such as lithological contacts, foliation of the crystalline basement, and sub-vertical fractures through Euler's solution and Analytic Signal Amplitude. Magnetic inversion recovered magnetic bodies in depth responsible for local field variations, revealing unmapped geological structures. This research demonstrates two crucial factors: the successful identification of structures and subsurface regions with high potential for water flow and storage, and the application of processing techniques to airborne electromagnetic data shows potential in advancing hydrogeological research in the Brazilian region, with potential applicability to other areas.

Keywords: Airborne Electromagnetics (AEM); Groundwater; Hydrogeology; Hydrogeophysics; 3D modelling; Inversion; Semiarid Regions.

Introdução

Grande parte do Nordeste Do Brasil (NE) constitui o chamado Polígono das Secas, que passou a ser denominado de Semiárido Brasileiro (Figura 6.1 - B), que engloba uma área de 1.237.000 km² (cerca de 80% da região), na qual há grande escassez de água (Agência Nacional de Águas (ANA), 2012). Estas características naturais posicionam o semiárido brasileiro numa situação desfavorável ao abastecimento de água. Os solos são pouco espessos, os rios são intermitentes, a vegetação é do tipo caatinga e as chuvas ocorrem sazonalmente, concentradas nos quatro primeiros meses do ano. Tais fatores, aliados à conjuntura socioeconômica da região, dificultam o fornecimento de água pelo poder público no modo tradicional, ou seja, pelo sistema reservatório-adutora, como existem nas cidades. A solução encontrada provém da perfuração de poços subterrâneos, do armazenamento da água da chuva, de carros-pipa e, mais recentemente, da construção de barragens submersas em aluviões de drenagens intermitentes. De modo independente, mas contribuindo para agravar os efeitos provocados pelo clima semiárido, cerca de 70% do substrato da área do Polígono das secas é composto por rochas do embasamento cristalino de natureza granito-gnaiss-migmatítica. As rochas cristalinas recebem essa denominação devido a sua composição de minerais cristalizados que dão características específicas de resistência e deformabilidade. Do ponto de vista hidrogeológico, a principal característica destas rochas é o fato de que a sua porosidade intergranular é desprezível. Desta maneira, a principal forma de percolação e armazenamento da água ocorre ao longo das discontinuidades aproximadamente planares existentes no substrato. Geologicamente, estas discontinuidades são representadas por falhas, fraturas, foliações ou contatos geológicos intemperizados. Nestes terrenos, a água subterrânea encontrada é levemente salina e, conseqüentemente, é esperado em que a mesma se comporte como condutor em um campo eletromagnético induzido. A área de estudo (Figura 6.1 - A) está localizada no município de Serrinha, na mesorregião Agreste Potiguar no Rio Grande do Norte, Brasil. É geograficamente situada entre os municípios de São José do Campestre, Lagoa de Pedras, Santo Antônio, e Lagoa de Salga, a 76 km da capital – Natal. O acesso de Natal é dado pelas rodovias pavimentadas BR-226 e RN-160. A área do levantamento dos dados geofísicos aerotransportados é delimitada pelas coordenadas UTM zona 25S: 209000E - 222000E / 9305000N - 9313000N cobrindo uma área de 104 km².

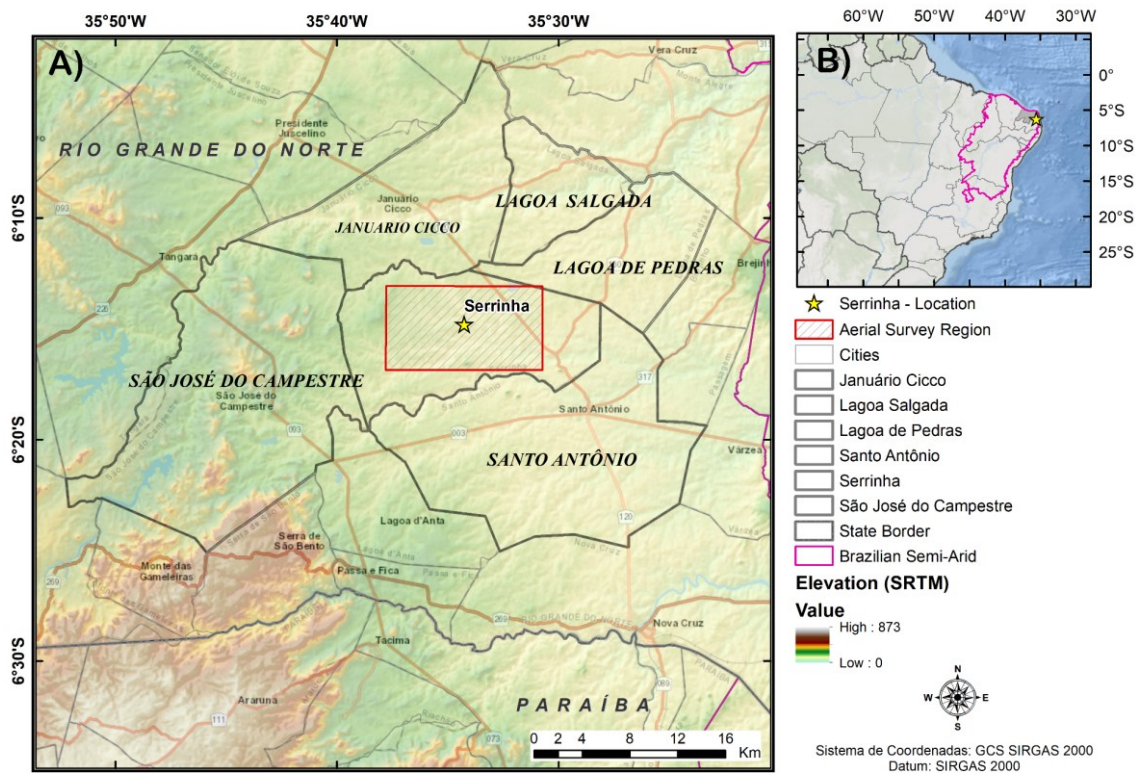


Figura 6.1: Localização geográfica: A) Área de estudo (Serrinha – retângulo vermelho); B) Polígono das Secas (Semiárido Brasileiro - polígono rosa).

Geologia

A área estudada constitui uma pequena porção da Província Estrutural da Borborema no Nordeste brasileiro, mais precisamente na parte central do Maciço São José do Campestre (MSJC), situado a leste do Sistema de Dobramentos Seridó (Brito Neves, 1983) e tem em comum formações geológicas constituídas por rochas cristalinas do pré-cambriano recobertas por depósitos aluviais.

O MSJC representa um complexo mosaico de blocos gnáissicos formados durante diferentes pulsos de acreção crustal entre o Arqueano e o Paleoproterozóico, delimitado por zonas de cisalhamento e intrudido por corpos granitóides de idade brasileira (Dantas et al., 1998; Dantas et. al., 2004), onde é possível identificar deformações dúcteis na porção sudeste, referente a Zona de Cisalhamento Rio Açu Mirim, e fraturas NNE e NW provenientes de um episódio tectônico mais antigo. Esta configuração geotectônica, com eventos registrados desde o Arqueano até o Cenozoico, proporciona alto grau de complexidade para o estudo geodinâmico da região em questão.

Serrinha, utilizou-se a folha geológica São José do Campestre (SB.25-Y-A-I) (Roig e Dantas, 2013). Para o entendimento geológico local e, portanto, foi elaborado o mapa geológico/geomorfológico da área de Serrinha (Figura 6.2), que inclui unidades geológicas, sobrepostas de estruturas geológicas, hidrografia e a poços de água subterrânea cadastrados (SIAGAS, 2011). Grande parte da área é composta por rochas pré-cambrianas do Éon Arqueano sendo que as unidades geológicas dominantes que compõem o maciço cristalino pertencem as eras Paleoarqueano, Mesoarqueano e Neoarqueano.

Outras regiões da área apresentam formações do Éon Farenozoico sendo as eras paleoproterozoico (PP), neoproterozoico (NP), e por fim o Éon Farenozoico de era cenozoico (Paleógeno-Neógeno), das quais se subdividem em complexos, depósitos e suítes.

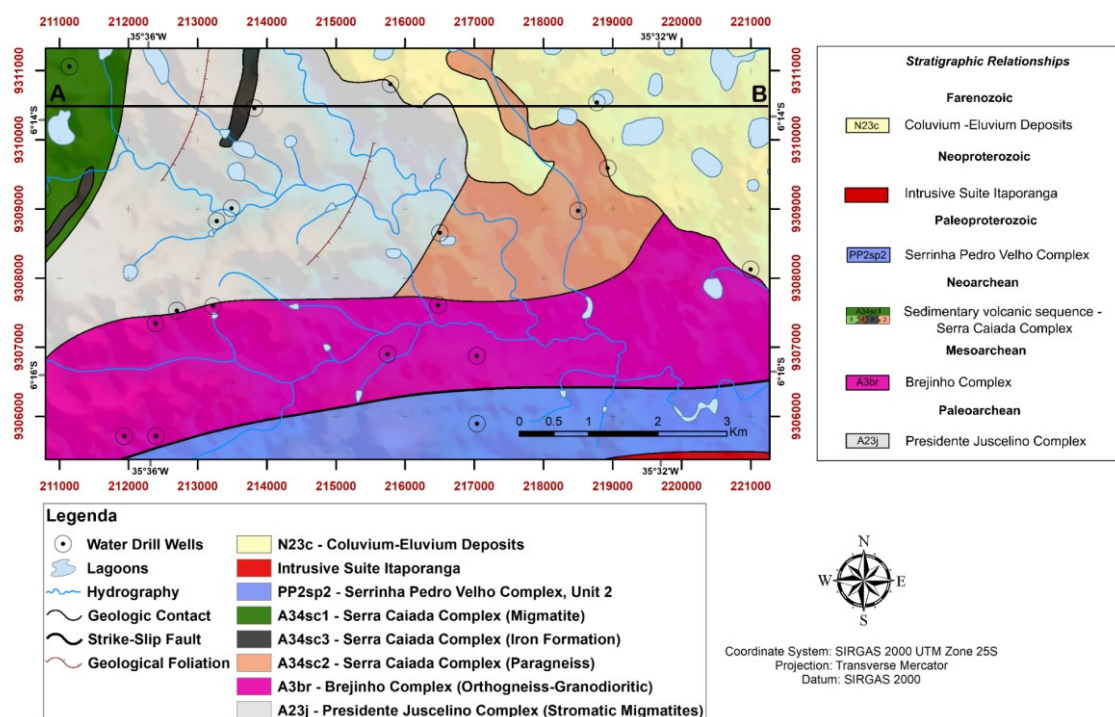


Figura 6.2: Mapa geológico e geomorfológico de Serrinha (adaptado de Roig e Danta, 2013)

Rochas arqueanas de natureza ígnea e metamórfica ao sul da área como migmatitos do complexo Presidente Juscelino (A23j); ortognaisses-granodioríticos do complexo Brejinho (A23br) e intrusões vulcânicas (hornblenda e/ou biotita granitos) da Suíte Itaporanga do neoproterozoico, compõe a maior parte do maciço cristalino de Serrinha. Sequência de rochas neoarqueanas de natureza vulcano sedimentar (migmatitos; paragneisses e formações ferríferas) como o complexo Serra Caiada (A34sc) e coberturas farenozoicas de natureza sedimentar areno-argilosa como os depósitos colúvio-eluviais (N23c), compõem a porção norte da área de estudo. E com relação ao contexto geológico estrutural da área, as estruturas geológicas proeminentes são contatos geológicos, foliações e falha do tipo transcorrente *Strike-Slip* (Roig e Dantas, 2013).

Por meio do perfil geológico A-B (Figura 6.3) traçado ao norte da área de Serrinha (Figura 6.2) é possível observar a disposição estrutural das rochas cristalinas (pré-cambrianas) e as coberturas aluvionares (Farenozoico). As rochas cristalinas tais como complexo Presidente Juscelino e complexo Serra Caiada (A34sc) estão dispostas em camadas inclinadas e os traços da foliação ígnea acompanha esse mergulho. Subsequentemente uma parte a leste dos complexos cristalinos são recobertas por depósitos colúvio-eluvionares. Poços de água subterrâneos produtivos já foram perfurados ao longo do perfil, sendo os complexos Serra Caiada/Presidente Juscelino e depósitos aluvionares as unidades geológicas perfuradas (Roig e Dantas, 2013).

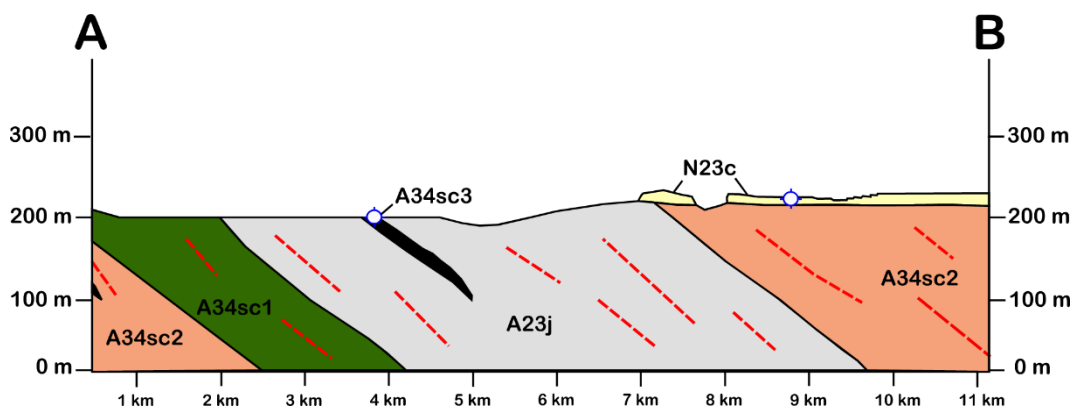


Figura 6.3: Perfil geológico A-B. A foliação é representada pelas linhas tracejadas (vermelhas) e os poços de água subterrâneos perfurados representado pelos círculos (azuis; Adaptado de Roig e Dantas, 2013).

Configuração Hidrogeológica

A hidrogeologia dos aquíferos fissurais, encontrados em rochas ígneas e metamórficas, destaca-se pela falta de espaços entre grãos nas rochas. A água está presente em fissuras, fraturas, fendas e outras estruturas geológicas (Figura 6.4).

A interconexão das fraturas é vital para aumentar a porosidade (fraturas abertas) e permeabilidade (fraturas interconectadas) nas rochas. Em áreas com fraturas predominantemente verticais, como no Planalto da Borborema, as interconexões ocorrem onde diferentes redes de fraturas se encontram ou quando fraturas horizontais as interceptam. Fraturas horizontais distribuem a água infiltrada por uma área maior, alimentando mais fraturas em profundidade. Portanto, o sucesso de um poço depende do número de fraturas produtoras interceptadas. Em áreas com fraturas verticais, recomenda-se poços inclinados para alcançar mais fraturas. Poços verticais são mais adequados em áreas com fraturas horizontais.

De forma sistemática, as características produtivas e a qualidade da água são explicadas pela interação de diversos fatores ao longo do tempo, tais como: gradientes hidráulicos; gradientes litostáticos e gradientes de origem neotectônica aliados a interação de tensões capilares e rugosidade da fratura (Costa e Silva, 1997) em cada sítio podem condicionar fluxo ao longo do maciço cristalino, gerando sistemas naturais de bombeamento (Coriolano, 2002).

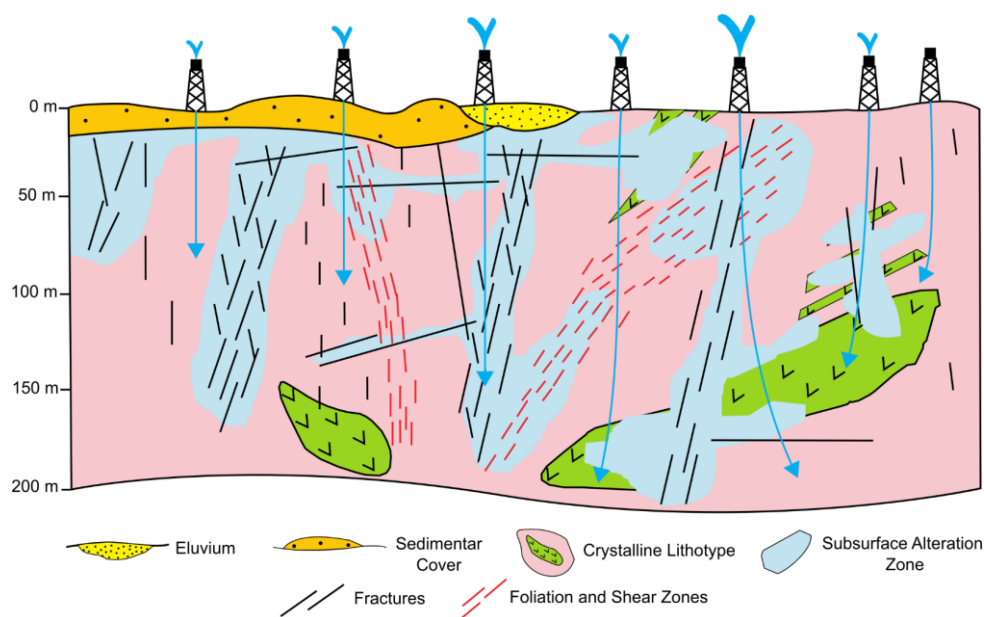


Figura 6.4: O diagramal conceitual ilustra a formação de zonas de alteração, ocorrendo infiltração superficial pelas coberturas e o fluxo por meio de fraturas (adaptado de Feitosa et al., 2008).

Segundo Nascimento da Silva (2004) os modelos de fluxo e armazenamento de água subterrânea aplicados na locação de poços tubulares para Serrinha - RN é a Calha Elúvio- Aluvionar e Riacho-Fenda.

O Modelo Calha Elúvio-Aluvionar foi caracterizado por Silva (2000) e Nascimento (2001), neste modelo a drenagem e a calha de sedimentos não evidenciam controle por fraturas subjacentes ou aflorantes. Desse modo, trechos retilíneos da drenagem podem estar controlados pela foliação das rochas. A drenagem flui sobre uma calha de aluviões antigos e regolitos, recarregando descontinuidades no substrato capeados pelos sedimentos. A água subterrânea acumulada está distribuída desde a cobertura sedimentar (aluviões) até o regolito desenvolvido sobre o cristalino intemperizado e entre outras descontinuidades. A espessura da cobertura elúvio-coluvionar atua como aquífero poroso, o que impede, em parte, a rápida evaporação, consequentemente transfere a água superficial para o aquífero cristalino

A literatura tornou clássico o modelo Riacho-Fenda (Figura 6.5), proposto inicialmente por (Siqueira, 1967) está fundamentado no controle de trechos retilíneos de drenagens ou riachos ao longo de zonas de falhas ou fraturas. Em terrenos cristalinos fraturados a coincidência da drenagem superficial com zonas densamente fraturadas permitem condições ideais para recarga e armazenamento de água, partindo dessas condições o cruzamento de cursos de água são locais favoráveis para locação de poços.

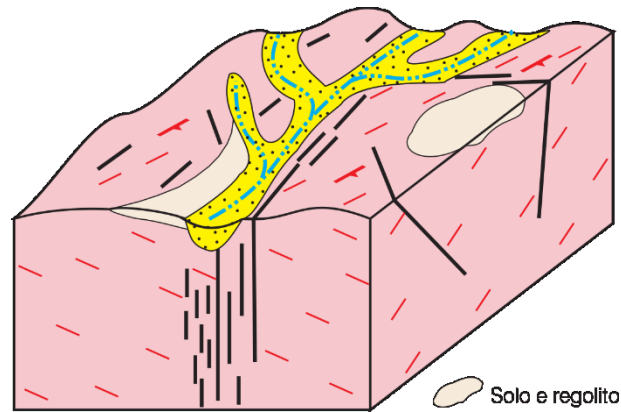


Figura 6.5: Modelo Riacho-Fenda: Observa-se que as fraturas coincidem com o eixo da drenagem, ocorrendo conexão em ambos pela superfície e subsuperfície. (Extraído de Feitosa et al., 2008).

Para o entendimento hidrogeológico local e a disposição do sistema aquífero foi elaborado o mapa hidrogeológico da área de Serrinha (Figura 6.6) que utilizou do Mapa hidrogeológico do estado do Rio Grande do Norte (Galvão Neto et al., 2022), que inclui domínios hidrogeológicos, sobrepostas de estruturas geológicas, hidrografia e a poços de água subterrânea cadastros (SIAGAS, 2011).

Os Domínios Hidrogeológicos são um conjunto de unidades geológicas que apresentam as mesmas similaridades hidrogeológicas, incluindo litologia, espessura, principais aquíferos e sistemas aquíferos, modos de circulação, qualificação química das águas subterrâneas, etc. (Feitosa et al., 2008). Entre os diferentes tipos de Domínios Hidrogeológicos, a região de Serrinha é dividida por dois domínios hidrogeológicos: Domínio Granular/Poroso associado as coberturas (depósitos colúvio-eluviais) este é um aquífero formado por sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas; Domínio Fissural Cristalino está relacionado as rochas cristalinas com as formações arqueanas e proterozóicas este é um aquífero formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação da água se faz nas fraturas, fendas e falhas, abertas devido à movimentação neotectônica. A capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e interconexão, permitindo a infiltração e fluxo da água. No mapa foram incluídos valores da condutividade elétrica medidas nos poços que chegam a valores máximos de 13.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e valores médios em torno de 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

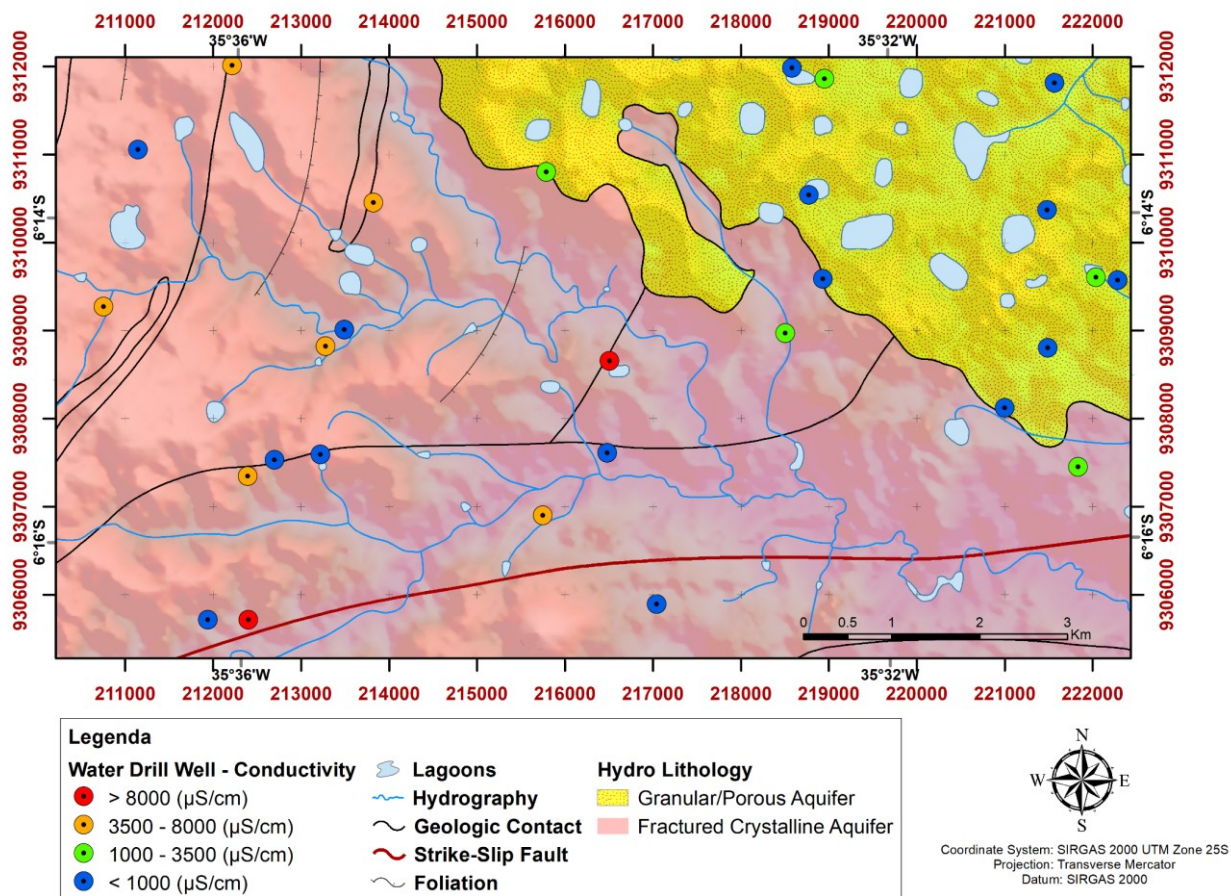


Figura 6.6: Mapa Hidrogeológico de Serrinha (adaptado de Galvão Neto et al., 2022)

Geofísica

Levantamento Magnético e Eletromagnético Aerotransportados (AEM)

Este estudo empregou dados geofísicos aéreos em escala detalhada na região de Serrinha/RN, incluindo magnetismo e eletromagnetismo aerotransportado no domínio da frequência (FDEM), para caracterizar estruturas geológicas e a hidrogeologia em escala regional, afim de investigar a água subterrânea de característica salina em aquíferos cristalinos fraturados pré-cambrianos que se estendem em uma região seca (semiárido brasileiro) e que se assemelham a outras regiões de seca ao redor do mundo como o semiárido australiano (Rutherford et al., 2021; Flinchum et al., 2021).

Por um lado, a investigação magnetométrica é uma técnica geofísica que se fundamenta na caracterização das propriedades magnéticas das rochas sob a superfície terrestre. Isso é alcançado por meio de um sistema aeromagnético instalado em uma aeronave que registra variações no campo magnético terrestre. Seu principal objetivo é mapear anomalias magnéticas na crosta terrestre, resultado de variações na composição geológica e distribuição de minerais magnéticos que influenciam o campo magnético local (Reeves, 2005). Assim, o propósito deste trabalho é selecionar anomalias de interesse exploratório que estejam associadas a estruturas geológicas como contatos,

fraturas e falhas em profundidade e que possuam a capacidade de armazenar água subterrânea.

Os dados do campo magnético são amplamente empregados na exploração geofísica, destacando-se pela sua aplicação em modelos de inversão 3D. Esses modelos permitem interpretar os dados magnéticos, proporcionando uma descrição da susceptibilidade magnética da subsuperfície. (Ellis et al., 2012).

Por outro lado, a investigação eletromagnética é uma técnica geofísica que se fundamenta na caracterização das propriedades elétricas das rochas sob a superfície terrestre. Esse sistema artificial rebocado por aeronave emite sinais radiofrequência (campo primário) que interagem com a crosta terrestre, resultando na indução de correntes secundária, conhecida como correntes de Eddy (Korus, 2018; Viezzoli et al., 2010). A geração dessas correntes secundárias está diretamente relacionada à condutividade elétrica das rochas, sendo influenciada por diversos fatores, incluindo a presença de argila na composição mineralógica, as características texturais dos sedimentos, as litologias, o teor de água nos poros (incluindo a concentração de sais dissolvidos), mineralização metálica e a porosidade das rochas (Steuer et al., 2009; Gunnink et al., 2012; Auken et al., 2008).

A partir das correntes de Eddy induzidas são geradas conseqüentemente campos secundários que são registrados nos domínios da frequência ou do tempo. Em termos gerais, sistemas eletromagnéticos no domínio do tempo (TDEM) têm a capacidade de investigar as propriedades subsuperficiais em maiores profundidades em comparação com sistemas no domínio da frequência (FDEM). No entanto, os sistemas FDEM possuem uma maior capacidade de resolução quando se trata de características próximas à superfície (Knight et al., 2018; Siemon et al., 2011). As medidas são realizadas em uma ampla faixa de frequências (10kHz) e profundidades, variando de rasas, em torno de 10 metros, a profundas, alcançando centenas de metros (Christiansen & Auken, 2012; Auken et al., 2015; Siemon et al., 2019).

Uma das principais aplicações desses dados é a criação de seções em profundidade que descrevem a condutividade elétrica da subsuperfície (Oldenborger et al., 2016). Isso é alcançado por meio de técnicas de imagem numérica e inversão, permitindo a elaboração de representações 2D da condutividade elétrica ao longo das trajetórias de voo e, posteriormente, a interpolação entre essas trajetórias (Minsley et al., 2021; Delsman et al., 2018), resultando numa visualização tridimensional que oferece informações sobre a condutividade elétrica da subsuperfície.

Neste estudo, o sistema magnético e FDEM utilizado para adquirir os dados geofísicos aerotransportados sobre o embasamento cristalino é ilustrado na (Figura 6.7). A medição EM envolve tanto os campos primários (relacionados ao transmissor) quanto os campos secundários (relacionados à geologia do cristalino). A condutividade do embasamento cristalino é derivada pela comparação das respostas *in-phase* e *quadrature* em diferentes frequências.

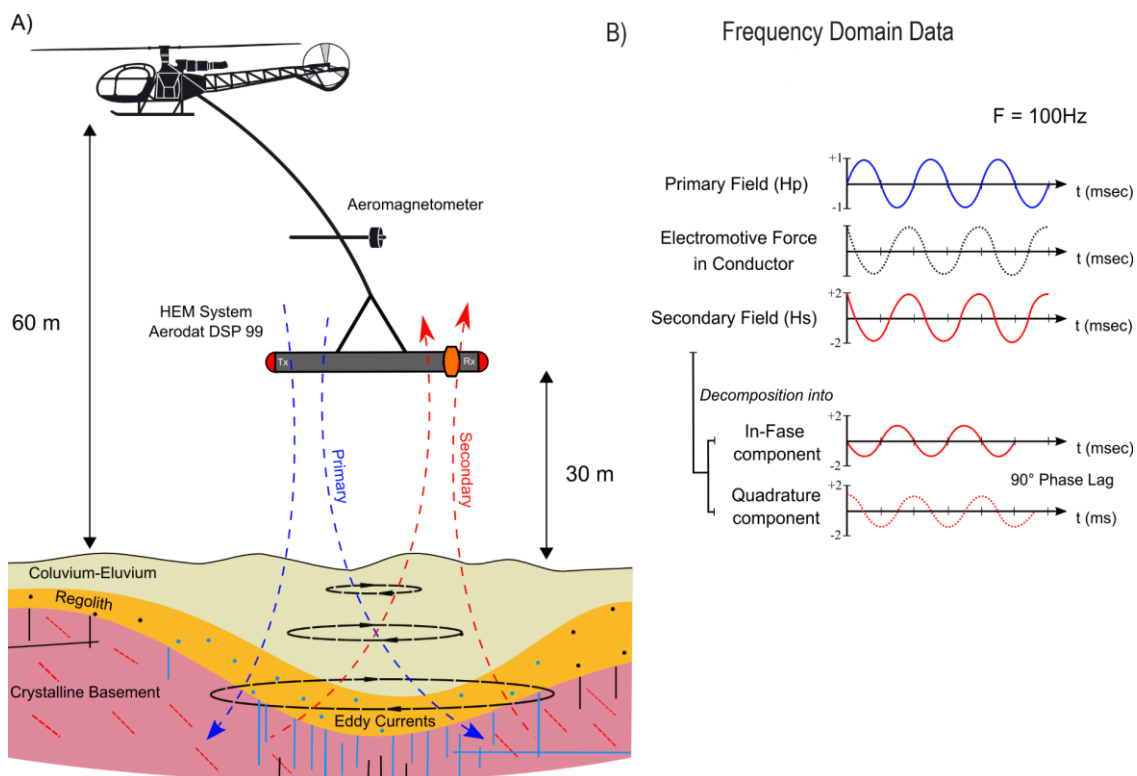


Figura 6.7: A) Esquema simplificado do levantamento aeromagnético e HEM (Helicóptero Eletromagnético) com fonte artificial no domínio da frequência, conduzido por helicóptero sobre embasamento cristalino fraturado e regolito para investigar água subterrânea entre grãos e fendas. B) Sistema EM no domínio da frequência induz campos senoidais em diferentes frequências, distinguindo campos primários e secundários, computando a diferença entre campos medidos e calculados. O dado FDEM é representado como componentes “In-phase” (IP) e “ Out-of-phase” (ou Quadratura). (adaptado de Legault, 2015).

Os dados magnéticos foram adquiridos por meio do sistema aeromagnetométrico de vapor de césio (Geometrics G-822A), cujo sensor é rebocado por uma aeronave (Helicóptero modelo Esquilo HB350) a uma distância de 30 metros da superfície e realiza leituras do campo magnético total.

Os dados eletromagnéticos no domínio da frequência (FDEM) foram adquiridos pelo equipamento modelo Aerodat-DSP-99, que opera em cinco faixas de frequência. Este sistema é composto por dois pares de bobinas (transmissora/receptora) em modo coaxial (CX1-918,5/924,0 Hz; CX2-4.443 Hz/4.525) e por três pares de bobinas em modo coplanar (CPI-874,3/865,0 Hz; CP2-4.865/4.834 Hz; CP3-33.645/33.086 Hz), sendo o espaçamento entre as bobinas de 6,4 m, isto permite a leitura das componentes fase e quadratura do campo eletromagnético secundário. No modo coaxial, as bobinas ficam na posição vertical e a profundidade de investigação é mais superficial, já em modo coplanar as bobinas posicionam-se na horizontal, onde o campo eletromagnético alcança uma maior profundidade (Legault, 2015).

As linhas de voo foram realizadas na direção E-W numa velocidade de 144 Km/h, sendo à distância entre as linhas de voo de 100 m e o intervalo de aquisição dos dados de condutividade de 0,1 segundo. As linhas de controle foram na direção N-S, com

espaçamento de 500 m entre elas. Desta forma, foram adquiridos mais de 570.000 valores das componentes fase e quadratura para cada configuração das bobinas e frequência relacionada (LASA Eng. S/A e CPRM, 2001).

Propriedades Físicas dos Mineiras e Rochas

Para uma correlação e interpretação dos dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos da área de estudo foi realizado um estudo das propriedades dos minerais e rochas que nos fornecem valores de susceptibilidade magnética e condutividade elétrica das rochas que compõe a geologia da região, e a condutividade usualmente utilizadas na literatura para água salina subterrânea.

Por um lado, a susceptibilidade magnética das rochas pode variar consideravelmente com a sua composição e estrutura, principalmente pela presença de minerais ricos em ferro como magnetita, ilmenita e hematita. A (Tabela 6.1) demonstra valores estabelecidos em literatura para diferentes tipos de rochas e que serão utilizadas na interpretação magnética neste trabalho, principalmente para rochas ígneas e metamórficas que compõe a maior parte da área de Serrinha, especificamente os terrenos cristalinos que se constituem em rochas ígneas metamorfizadas.

Tabela 6.1: Tabela de susceptibilidade magnética para diferentes tipos de rocha. (adaptado de Isles e Ranking, 2013).

Materials	Magnetic Susceptibility (SI)
Igneous Rocks	
Gabbro/norite	$10^{-3} - 10$
Granite/granodiorite/tonalite	$10^{-4} - 10^{-1}$
Acid volcanics	$0 - 10^{-1}$
Metamorphic Rocks	
Metasediments	$0 - 10^{-1}$
Amphibolite/basic granulite	$10^{-3} - 10^{-1}$
Banded Iron Formation (Hematite-rich/Magnetic-rich)	$10^{-5} - 10^{-3}$
Sedimentary Rocks	
Carbonates, shales, sands/silts	$0 - 10^{-3}$
Detrital magnetite (Fe-rich chemical sediments)	$10^{-1} - 10^{-3}$

Por outro lado, conforme destacado por Keller (1988), o ponto de partida na análise das propriedades elétricas das rochas reside na compreensão das características dos minerais que as constituem. Esses minerais são classificados em três grupos distintos: metais, semicondutores e isolantes.

Os metais, de modo geral, apresentam alta condutividade elétrica devido à abundância de elétrons livres. Os semicondutores exibem uma condutividade intermediária, enquanto os isolantes possuem baixa condutividade, sendo exemplificados por minerais como quartzo.

As interpretações dessas propriedades elétricas das rochas desempenham um papel crucial na inferência de informações sobre o embasamento cristalino, com ênfase especial na identificação de água salina subterrânea. É pouco provável que a condutividade de metais e semicondutores varie significativamente com as diferentes frequências utilizadas na geofísica.

Embora as propriedades das rochas possam ser consideradas como uma combinação simples das propriedades de seus minerais constituintes, nem sempre é o caso. A complexidade em prever essas propriedades é, em grande parte, atribuída à presença de água, uma substância não mineral que pode estar internamente presente nas rochas. Como a água exerce forte influência na condutividade e permissividade dielétrica, mesmo pequenas quantidades podem alterar significativamente o comportamento das propriedades da rocha. A (Tabela 6.2) ilustra a variação nos valores de condutividade de rochas e água com diferentes concentrações de sais.

Tabela 6.2: Tabela de condutividade para diferentes tipos de condutores. Ênfase no intervalo de condutividade para água nos interstícios da rocha (adaptado de Dentith e Mudge, 2014).

Materials	Conductivity [σ] (S/m)
Conductors	
Native metals	$10^7 - 10^8$
Semiconductors	
Oxides	$10^{-8} - 10^4$
Regolith (Saprolite)	$10^{-4} - 10^{-1}$
Crystalline rocks (Igneous & metamorphic)	$10^{-5} - 10^{-3}$
Ironstones	$10^{-8} - 10^4$
Pore contents (Water: fresh to Hyper-saline)	$10^{-2} - 10^1$
Sedimentary rocks (Shale & Mudrocks)	$10^{-2} - 10^1$
Insulators	
Quartz, feldspars, pyroxenes, amphiboles, carbonates	$10^{-7} - 10^{-14}$

Problema Geofísico Inverso

Como mencionado anteriormente, este trabalho integra dados magnéticos e eletromagnéticos no domínio da frequência. Mas para realizar a inversão é necessário conhecer o problema direto da magnetometria e da eletromagnetometria.

As equações utilizadas para o modelo direto têm como base os trabalhos de Ellis et al. (2012); e Couto (2021), sendo abordadas de forma sucinta nessa pesquisa.

O problema geofísico direto é entendido como o procedimento matemático para calcular e quantificar valores teóricos de uma grandeza física (como potencial elétrico, cargaabilidade, campo magnético, e etc.) relacionada a um conjunto de parâmetros físicos em um modelo geofísico (como resistividade elétrica e susceptibilidade magnética).

Inversão com dados do campo magnético

Os dados magnéticos foram modelados usando o algoritmo *Magnetization Vector Inversion* (MVI) disponível na plataforma (*VOXI Earth Modelling System*) fornecido pelo software Oasis Montaj (2022.2 SeequentTM). Esse algoritmo é introduzido por Ellis et al., 2012 e posteriormente explicado por Couto, 2021. Nesta seção será demonstrado de forma breve as equações que descrevem o algoritmo de inversão.

O problema MVI é definido como a solução para \mathbf{m} dado \mathbf{B} sujeito a uma condição de regularização apropriada. No software Oasis Montaj, o problema inverso para MVI (Ellis et al., 2012) é solucionável e definido pela função objetivo:

10

$$\Phi_{\text{total}}(\mathbf{m}) = \Phi_d(\mathbf{m}) + \lambda \cdot \Phi_m(\mathbf{m}) \quad (6.1)$$

Onde:

$$\Phi_d(\mathbf{m}) = \sum_{j=1}^M \left| \frac{G_j m - B_j}{e_j} \right|^2 \quad (6.2)$$

$$\Phi_m(\mathbf{m}) = |w_0 m|^2 + \sum_a \left| w_a \frac{\partial}{\partial a} m \right|^2 \quad (6.3)$$

A equação (6.1) define a função objetivo em termos da equação do dado e o erro associado a cada ponto do dado. Com $\mathbf{m}_l \leq \mathbf{m} \leq \mathbf{m}_u$, onde Φ_d e Φ_m são o ajuste (Eq. (6.2)) e o modelo da função objetiva (Eq. (6.3)), respectivamente, e_j é o desvio padrão para o j -ésimo ponto observado, w_0 e w_a são os pesos do modelo associados à minimização do modelo gradiente $\frac{\partial}{\partial a} \mathbf{m}$ e λ é parâmetro de regularização de Tikhonov.

Inversão Eletromagnética

No método FDEM, as grandezas físicas de interesse são o campo magnético ($\vec{\mathbf{H}}$) e campo elétrico ($\vec{\mathbf{E}}$) gerado pelo processo de difusão e que são fundamentadas nas equações de Maxwell. Os parâmetros físicos associados para o modelo geofísico são resistividade elétrica (ρ) ou a condutividade (σ) e suas feições geométricas (valores de profundidade, extensões lateral e vertical – para o caso (1D)). A resposta do cálculo do problema direto é o procedimento chave para resolver problema inverso em geofísica. Essa sessão, será discutido de forma geral o problema direto (Auken et al., 2015) para campos EM:

$$F(\rho, z) \propto \hat{z} \int_0^{\infty} f(\lambda, z) \cdot \lambda \cdot J_0(\lambda \rho) d\lambda \quad (6.4)$$

A equação (6.4) é definida com o problema direto para calcular as componentes do campo EM (Couto 2021), onde (λ) é a frequência espacial e (J_0) é a função de Bessel de ordem 0. A habilidade de resolver integral inversa do tipo transformada de Hankel de forma eficaz possibilita o cálculo rápido de qualquer componente do campo eletromagnético pela diferenciação das equações do potencial vetorial.

Nesta seção será demonstrado de forma breve as 2 equações que descrevem o algoritmo de inversão:

1) *Skin depth* (1D) resultando nas CDI's e que serão utilizadas na confecção do modelo CDI's 3D.

2) Algoritmo de Ellis (1998) que será utilizado na confecção do modelo de inversão dos dados eletromagnéticos no domínio da frequência.

Usualmente, o dado do campo secundário (medido) é segmentado em suas componentes em fase e quadratura que são invertidos em valores de condutividade. Neste trabalho a condutividade elétrica aparente (mS/m) foi calculada para cada frequência a partir das componentes em fase e quadratura, usando modelo de pseudo-camada, definido por Fraser (1978). Este modelo consiste em uma camada sobre um semiespaço infinito. Com o resultado da condutividade aparente foi aplicada a formulação da profundidade máxima de alcance como segue.

Como descrito por Telford et al. (1990), um dos pilares fundamentais para descrever a penetração de ondas eletromagnética é *skin depth* ou profundidade de alcance do sinal EM (Eq. (6. 5)), é a distância na qual o sinal é reduzido em $\frac{1}{e}$, ou seja, 37% da amplitude do sinal inicial. Onde (δ) é a profundidade em metros e dado em função da condutividade em relação a uma corrente (i) e a frequência angular ($\omega = 2\pi f$), podendo ser reescrita em termos de frequência (f) do dado.

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}\right)} \approx 503 \sqrt{\left(\frac{1}{f\sigma}\right)} \quad (6. 5)$$

Os dados FDEM também foram modelados e invertidos por meio do algoritmo *Frequency Domain EM Inversion* disponível na plataforma (VOXI Earth Modelling System) fornecido pelo software Oasis Montaj (2022.2, SeequentTM). Esse algoritmo introduzido por (Ellis, 1998), na ideia de calcular um modelo 1D (σ) para cada célula da matriz a fim de construir o modelo 3D. Esse processo visa minimizar a função objetivo:

$$\Phi_{\text{total}}(\sigma) = \Phi_d(\sigma) + \lambda \cdot \Phi_m(\sigma) \quad (6. 6)$$

Onde:

$$\Phi_m(\sigma) = \|W(\sigma - \sigma^{\text{ref}})\|^2 \quad (6. 7)$$

$$\Phi_d(\sigma) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{H_i^{\text{obs}} - H_i^{\text{pre}}[\sigma]}{\delta H_i^{\text{obs}}} \right|^2 \quad (6. 8)$$

A equação (6. 6) em termos da condutividade e muito similar a equação (6. 1) também define a função objetivo em termos do dado e o erro associado a cada ponto, o termo (λ) é o parâmetro de compensação reconhecido como Regularizador de Tikhonov (Tikhonov e Arsenin, 1977).

Em Φ_d (Eq.(6. 7)) é o problema de otimização restrita (*data misfit*) responsável por garantir a recuperação do modelo calculado, ajustado ao conjunto de dados observados. O parâmetro (W) é um operador matricial, estabelecendo peso no modelo recuperado ou dado calculado. O parâmetro (σ) representa o modelo direto dos dados de

condutividade, e uma referência ao modelo (σ^{ref}) é frequentemente incluído para dar maior flexibilidade em controlar o modelo recuperado.

Em Φ_m (Eq.(6. 8)) representa modelo da função objetivo que garante o modelo recuperado contenha estruturas geológicas plausíveis, onde os parâmetros (H_i^{obs}) e (H_i^{pre}) são os campos magnéticos ou campo secundários observados e calculados para cada célula respectivamente e (δ) é o erro associado ao dado observado.

Escolha adequada de λ e W regulariza o problema inverso e, junto com σ^{ref} , controla o caráter arbitrário da solução para o problema inverso.

Resultados

Como resultado dessa pesquisa foram obtidos produtos magnéticos e eletromagnéticos que foram integrados a litologia e estruturas geológicas. As imagens magnéticas destacadas foram o campo magnético anômalo, sua derivada vertical e a deconvolução de Euler. Com esses produtos foram demarcados os lineamentos magnéticos e obtidos os diagramas de rosetas indicando as direções desses lineamentos.

As imagens obtidas do processamento dos dados FDEM foram as de condutividade aparente para as 3 faixas de frequência, sua composição ternária CMY viabilizando uma interpretação simultânea das anomalias condutivas rasas a profundas. Além disso, foram calculadas as profundidades (de acordo com a profundidade de alcance do sinal EM) e obtidas as CDI's, as quais foram interpoladas resultando numa visão 3D para a região de Serrinha. Posteriormente destacou-se uma CDI com direção E-W para interpretação 2D.

Utilizando ambos os dados magnéticos e FDEM foi realizado o processo de inversão para se recuperar corpos em profundidade afim de se obter valores de susceptibilidade magnética e condutividade respectivamente. Nos produtos de inversão e nas secções foi considerado o Modelo Digital de Terreno (Figura 6.8):

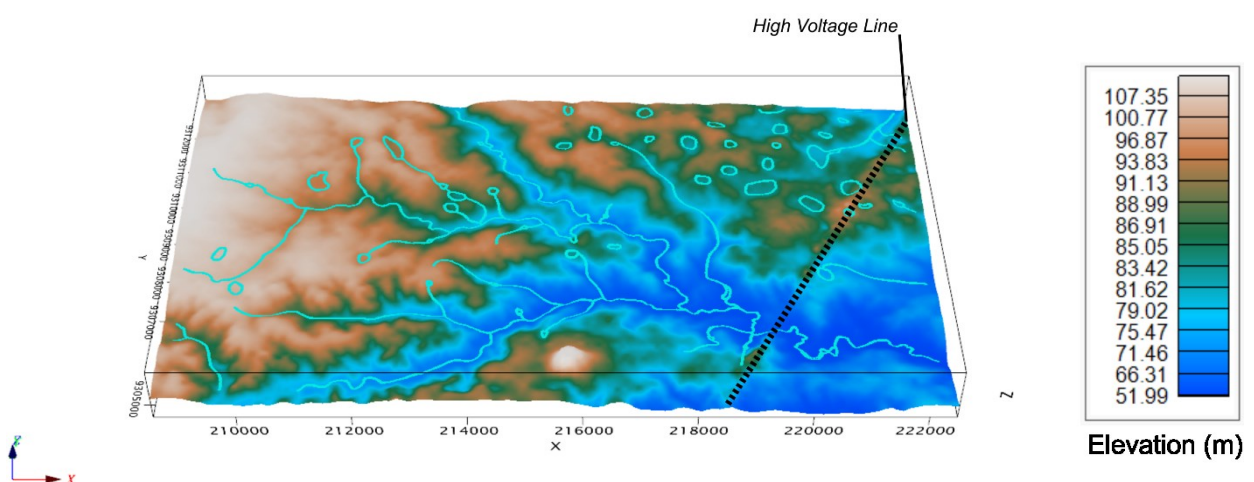


Figura 6.8: Modelo digital de terreno em perspectiva 3D de Serrinha com exagero vertical 10X e sobreposto a hidrografia da área e Linha de alta tensão .

Produtos e Interpretação magnética

Segundo Grant (1985), o mineral magnético mais importante – a magnetita pode ser utilizada como um marcador da história evolutiva de uma região, servindo como discriminador da litoestratigrafia metamórfica pelo fato de que os processos de formação e depleção de magnetita são bastante sensíveis à pressão, temperatura e presença de fluidos. A principal utilização dos dados magnéticos aerotransportados nesta interpretação foi identificar as direções rúpteis. Todas as imagens magnéticas geradas foram correlacionadas com as litologias presentes em Serrinha, predominantemente o paragnaisse e migmatito (Figura 6.9).

Utilizando a imagem do campo magnético anômalo (ou *TMI - Total Magnetic Intensity*) (Figura 6.9 - A) e aplicando as técnicas de realce ao TMI, foi calculada a derivada vertical do campo magnético – Dz (Figura 6.9 - B) obtendo a taxa de variação do campo com destaque para as fontes mais rasas. Foi obtida também, a malha da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Figura 6.9 - C), do campo magnético anômalo; esse produto de forma genérica, centraliza a anomalia do corpo magnético independente da orientação da magnetização do corpo (Isles e Rankin, 2013). Para complementar e reforçar a interpretação magnética e geológica das estruturas e formações da área, foram utilizados os resultados obtidos pela Deconvolução de Euler para os dados do campo magnético anômalo (Figura 6.9 - D). Nesse procedimento foi utilizado o índice estrutural 1, para fontes magnéticas oriundas de corpos verticalizados (fraturas e diques), que do ponto de vista hidrogeológico podem ser estruturas responsáveis pela infiltração e recarga do aquífero.

Pelas imagens do campo magnético anômalo, da amplitude do sinal analítico (ASA), da derivada Dz e do Euler (Figura 6.9 – A a D) foram individualizadas grosseiramente duas regiões magneticamente contrastantes: a porção norte da área (Figura 6.9 - C), caracterizada pelas “cores frias” e que define regiões com baixo conteúdo de minerais magnéticos e a porção sul da área, denotada pelas “cores quentes”, que indicam regiões com conteúdo mais significativo de minerais magnéticos. O limite entre as duas unidades magnéticas é paralelo a falha de geológica transcorrente (em vermelho mapeada pelo serviço geológico brasileiro (Roig e Dantas, 2013) e caracterizada por Nascimento et al., 2023) e coincide com o contato entre os complexos Brejinho, Serra Caiada e Presidente Juscelino. Principalmente a imagem Dz (Figura 6.9 - B) mostra o relevo magnético ao sul bem movimentado com direção E-W a NE-SW contrastando com o relevo mais calmo e anomalia de maior comprimento de onda na parte norte e com direção dos lineamentos arqueando de direção NE-SW (sul) para N-S (norte).

Assim na parte sul pode-se destacar a direção regional NE/SW na área do riacho Açu-mirim e da falha *strike-slip* (Roig e Danta, 2013) ao sul apresenta forte deformação estrutural e uma alta frequência de anomalias de alta amplitude que estão associadas a este episódio neotectônico e que se estendem ao longo dos Complexos Brejinho e Serrinha Pedro Velho e parcialmente a Suíte Itaporanga.

Na região norte a assinatura geofísica relacionada aos lineamentos cristalinos e fratura sob os depósitos colúvio-eluvionares são bem evidentes, revelando diversas estruturas anômalas ocultadas pelo capeamento sedimentar que se tornam de extrema relevância nesta interpretação. A correlação entre os domínios magnéticos e litotipos é

complexa pois, dentro do dominante (gnaisses) ocorrem contrastes magnéticos marcantes, provavelmente associados com diferenças composicionais (gnaisses graníticos ou granodioríticos, bandas anfibolíticas) e/ou metamórficas (zonas com migmatização mais pronunciadas; Lima, 2002), por sua vez refletidos em variações menores no conteúdo de magnetita.

Na região oeste do mapa é observado um corpo bem discriminado com direção NE-SW aparentemente bandado que se estendem dentro do Complexo Presidente Juscelino, além disso no extremo oeste observa-se amplitude de baixa a média com direção próxima a N-S que estão em comum acordo os migmatitos e paragnaisses respectivamente, as formações ferríferas apresentam amplitude do sinal analítico de média a alta.

O resultado da Deconvolução de Euler (Figura 6.9 - D), aplicado aos dados magnéticos, indica que as soluções estão predominantemente concentradas em profundidades relativamente rasas, variando entre 6m e 90m. Isto ocorre devido a anomalias de alta frequência, e conseqüentemente relacionadas a fontes mais rasas. No mapa é possível identificar soluções mais profundas na porção noroeste e soluções mais rasas na porção sudeste dividindo a área em um limite central que acompanha a direção NE-SW e E-W (a leste), é interessante notar que uma alta frequência de soluções acompanha contatos geológicos por toda a área, tais como os contatos dos complexos Brejinho, Serrinha Pedro Velho, Serra Caiada, Presidente Juscelino e os depósitos Coluvio-Eluviais.

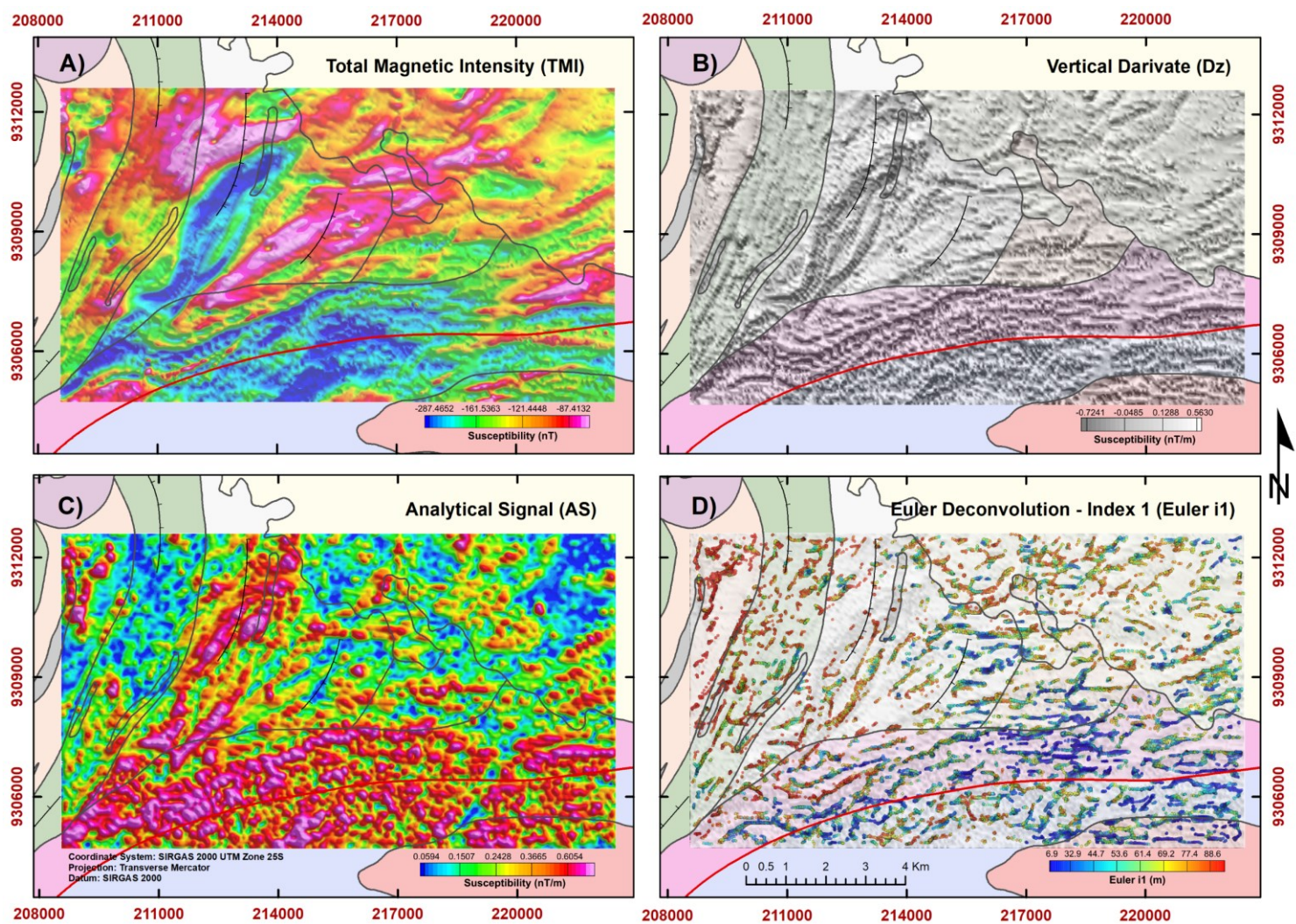


Figura 6.9: Mapa Magnético e Geológico Integrado. A) Intensidade magnética Total -TMI B) Derivada de primeira ordem vertical - DZ C) Amplitude do Sinal Analítico - ASA do TMI D) Deconvolução de Euler - índice estrutural 1 do TMI.

Como produto magnético final, foi produzido um mapa de domínios e lineamentos magnéticos da região. Os domínios magnéticos delimitam anomalias magnéticas variando de baixa a alta amplitude, e suas direções preferenciais. Já os lineamentos magnéticos são de grande importância na análise da direção das estruturas magnéticas, podendo definir as direções dos tensores neotectônicos (Queiroz, 2021).

No total, foram definidos 5 domínios magnéticos (Figura 6.10). Os lineamentos foram obtidos principalmente com base nos produtos da primeira derivada vertical e deconvolução de Euler. Ao todo foram traçados 464 lineamentos magnéticos, e foram obtidos diagramas de rosetas para cada domínio.

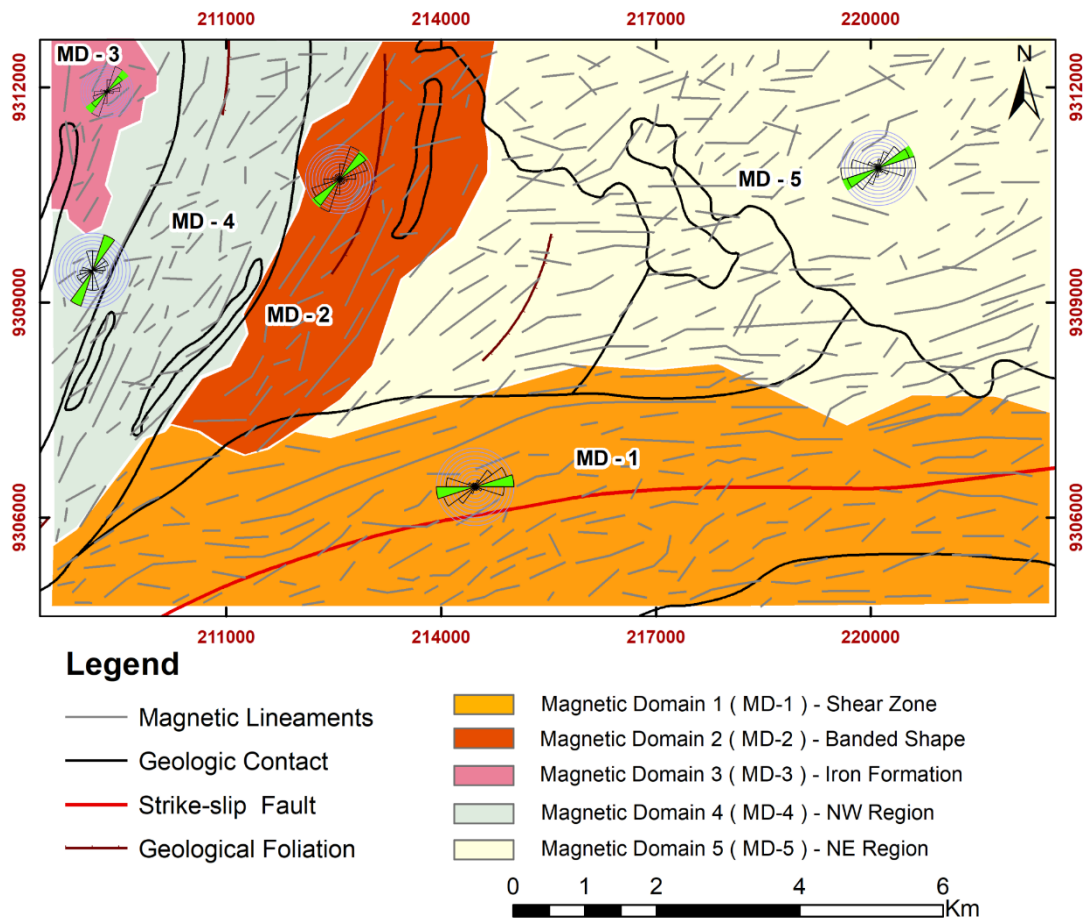


Figura 6.10: Domínios magnéticos de Serrinha com lineamentos magnéticos e diagrama de rosetas magnéticas para cada domínio magnético interpretado (MD-1; MD-2; MD-3; MD-4 e MD-5). Note a direção preferencial ajustada é representado pela roseta (verde).

Domínio Magnético 1 (MD-1) se situa ao extremo sul de Serrinha onde predomina a falha do tipo *strike-slip* ao longo do riacho Açu-mirim mapeada pela CPRM e caracterizada como uma zona de cisalhamento resultante da cinemática distensional e com cinemática transcorrente sinistral (Nascimento et al., 2023) e ressalta uma região bastante deformada por esse evento neotectónico. Esse domínio é caracterizado por alta intensidade magnética devido a mobilização de minerais magnéticos ao longo dessa descontinuidade. Foram traçados 140 lineamentos apresentando uma tendência E-W preferencialmente de N80E;

Domínio Magnético 2 (MD-2) se situa a centro-oeste de Serrinha onde predomina o alvo bandado com direção NE-SW e que se estende pelo complexo Presidente Juscelino. Esse domínio caracteriza-se por anomalias magnética de alta intensidade. Foram traçados 40 lineamentos apresentando uma direção preferencial de N40E;

Domínio Magnético 3 (MD-3) se situa a NW de Serrinha onde predomina alvos magnéticos e engloba parte da formação ferrífera e o complexo Serra Caiada. Foram traçados 18 lineamentos, assim como (MD-2) apresentam tendência NE-SW com direção preferencial de N35E;

Domínio Magnético 4 (MD-4) se situa a oeste de Serrinha sendo uma área menos deformada entre os domínios MD-2 e MD-3. Esse domínio apresenta anomalias magnéticas de baixa intensidade. Foram traçados 85 lineamentos que apresentam uma direção preferencial N-S aproximadamente de N40E;

Domínio Magnético (MD-5) se situa a centro e NE de Serrinha, aqui predomina uma região menos deformada em sua geologia estrutural. Esse domínio engloba os depósitos quaternários colúviais e o complexo Serra Caiada e parcialmente o complexo Presidente Juscelino. Caracteriza-se por anomalias magnéticas de intensidades intermediárias. Foram traçados 181 lineamentos que apresentam uma direção preferencial E-W aproximadamente de N70E.

Inversão dos dados magnéticos: Susceptibilidade e Gradiente magnético

Com o intuito de modelar os corpos e estruturas magnéticas em três dimensões foi realizada a inversão magnética utilizando os algoritmos (Eq. (6. 1)) para obtenção da Susceptibilidade e do gradiente magnético conforme explicada na seção de inversão (Figura 6.11 – A e C), a susceptibilidade variou em torno de (-0,04 a 12,1 SI), já o gradiente teve variação de (0.0001 - 8.6 nT/s). Na inversão foi utilizada como informação a priori um modelo de profundidade até 200 m, com o intuito de facilitar a visualização de estruturas mais rasas importantes para a recarga e acúmulo de água subterrânea nos aquíferos cristalinos. A malha foi discretizada em células (50x50x25 m) e foi utilizada a ponderação iterativa com fator: 2, para as propriedades positivas no intuito de realçar anomalias positivas. A inversão foi realizada de forma iterativa, tendo o total de 22 iterações e o parâmetro de ajuste final em 1,0056 para inversão susceptibilidade e 17 iterações com parâmetro de ajuste final 1,0425 para obtenção do gradiente magnético.

Para individualizar os corpos magnéticos com maior amplitude foi feito um clip dos valores susceptibilidade em 0,03 (SI) (Figura 6.11 - B) e 0,03 (nT/s) (Figura 6.11 - D), para ambos os modelos os corpos magnéticos recuperados coincidem com as maiores amplitudes do sinal analítico. É evidente a recuperação dos corpos cristalinos em profundidade, responsáveis pela anomalia magnética (alta susceptibilidade) como o corpo bandado de grande extensão do domínio magnético 2 (MD-2) que foi bem recuperado pela inversão, assim como corpos magnéticos com direção N-S a oeste do domínio magnético 4 (MD-4) que acompanham os contatos geológicos dos paragnaisses, migamatitos e formações ferríferas do complexo Serra Caiada e também os alvos magnéticos a NW do domínio magnético 3 (MD-3). Pode-se também observar os corpos magnéticos de alta frequência associados a direção NE-SW do domínio magnético 1 (MD-1) resultado da transcorrência do tipo *strike-slip* e corpos magnéticos de média a alta amplitude sob a cobertura dos depósitos aluvionares do domínio magnético 5 (MD-5).

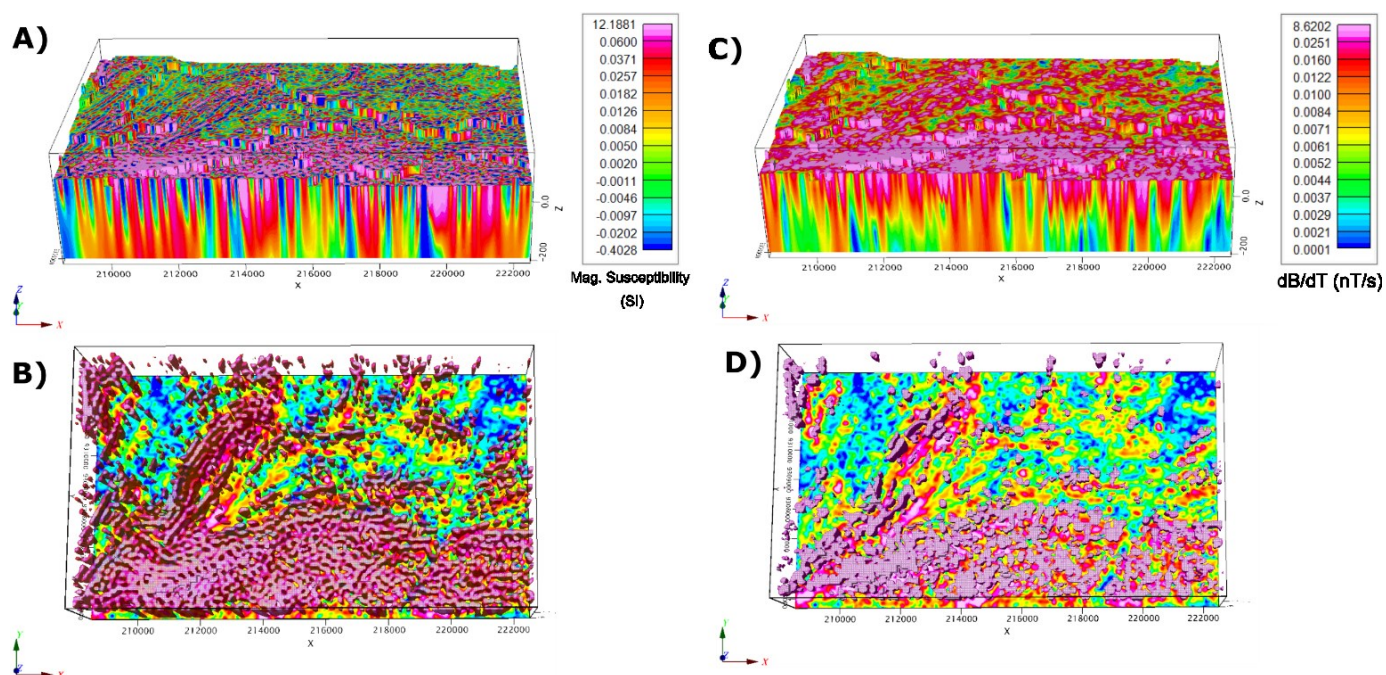


Figura 6.11: A) Imagem em 3D, resultado da inversão magnética em valores de susceptibilidade (SI); B) Visão superior da isosuperfície com de valor 0,03 (SI) da susceptibilidade sobre a imagem ASA; C) Imagem em 3D, resultando da inversão magnética em valores de gradiente magnético (nT/s); D) Visão superior da isosuperfície de valor 0,03 nT/s sobre a imagem ASA.

Para o entendimento dos corpos magnéticos recuperados pela inversão, em termos de profundidade, foram realizados cortes horizontais em profundidades diferentes, representados na (Figura 6.12 – B, C e D) para a Susceptibilidade e (Figura 6.13 – B, C e D) para o gradiente magnético, definidas em 20 m; - 80 m e -180 m, respectivamente.

No corte mais raso da imagem da susceptibilidade (Figura 6.12 - B), é observado um relevo magnético, mais movimentado que pode estar associado a estruturas rasas como fraturas, lineamentos e falha resultante de episódios neotectônicos e responsáveis pela infiltração e recarga da rede de aquíferos cristalinos, além de apresentar uma boa correlação com a amplitude do sinal analítico – ASA (Figura 6.12 - A). Já nas profundidades de 80 m e -180 m (Figura 6.12 – C e D) observa-se anomalias magnéticas de baixa frequência, sendo possível notar o aumento de espessura de corpos magnéticos em profundidade, revelando a continuação desses corpos em profundidade alcançando centenas de metros. Os resultados das inversões estão de acordo com os domínios magnéticos definidos anteriormente (Figura 6.10) e ficam bem evidentes em especificamente em três locais: 1° em torno da direção NE/SW (falha tipo *strike-slip*) do domínio magnético 1 (MD-1); 2° corpo bandado no complexo Presidente Juscelino com direção NE-SW do domínio magnético 2 (MD-2); 3° sob o depósito aluvionar do domínio magnético 5 (MD-5).

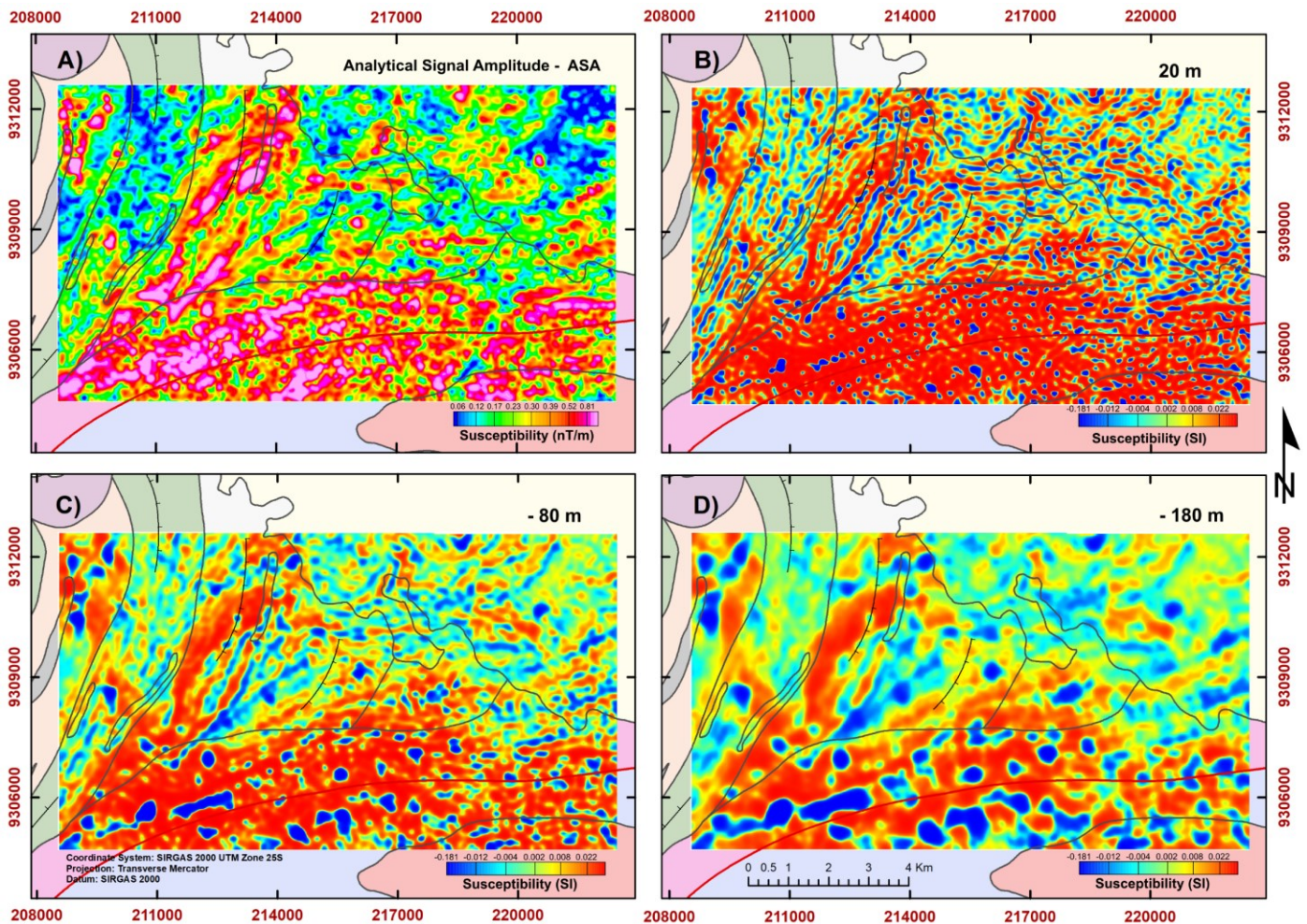


Figura 6.12: A) Imagem ASA B) Corte a 20 m, de profundidade do modelo inverso magnético obtendo a imagem 2D da susceptibilidade; C) Corte a -80 m do mesmo modelo inverso D) Corte a -180 m. Todos com sobreposição da geologia.

Para o corte mais raso da imagem do gradiente magnético (Figura 6.13 - B), observa-se também um relevo da variação do campo magnético bem alterado, associado a estruturas rasas, mas com alvos mais pronunciados apresentando boa correlação com a amplitude do sinal analítico – ASA (Figura 6.13 – A). Nas profundidades de 80 m e -180 m (Figura 6.13 – C e D) observa-se anomalias magnéticas de baixa frequência, sendo possível notar o aumento de espessura de corpos magnéticos em profundidade, mas de forma suave e diminuindo a variação do campo com a profundidade. No entanto, percebe-se que pelas profundidades definidas, o gradiente magnético realçou as fontes magnéticas de alta frequência mais rasas observadas no corte 20 m (Figura 6.13 – B) e suaviza fontes magnéticas de baixa frequência nos cortes mais profundos (Figura 6.13 – C e D). Os traços magnéticos também coincidem com os domínios magnéticos estabelecidos anteriormente (Figura 6.10) e ficam bem evidentes nos domínios magnéticos MD-1, MD-2 e MD-3.

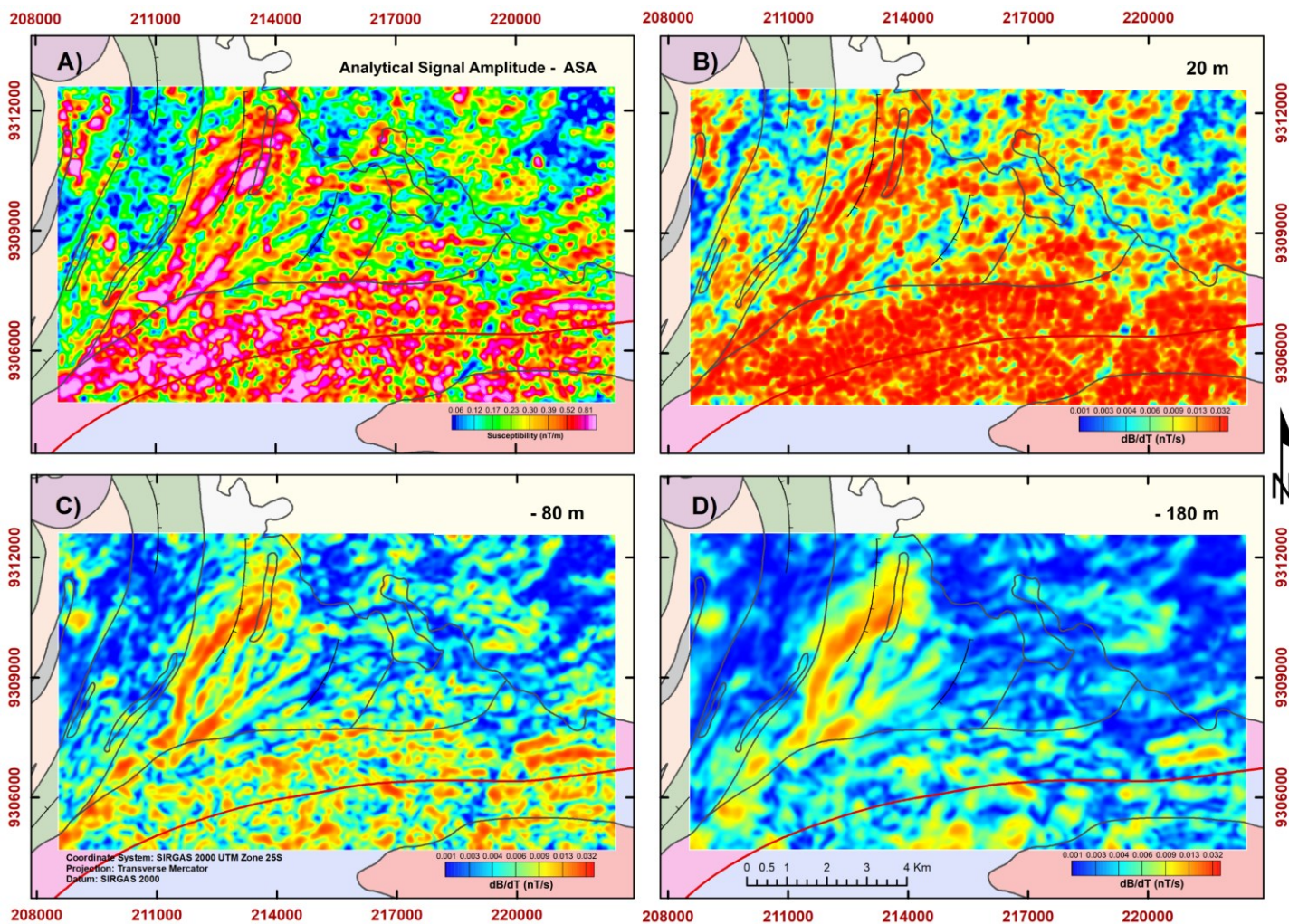


Figura 6.13: Mapa do gradiente magnético integrado. A) Amplitude do Sinal Analítico e MVI para cortes em profundidade: B) 20 m C) -80 m D) -180 m.

Foi selecionada uma linha de voo (número L30060) ao norte da área (sentido E-W) para análise de estruturas magnéticas em profundidades e para investigar o aquífero fissural cristalino e o aquífero poroso conforme o mapa hidrogeológico (Figura 6.6). A linha de voo situada na porção norte, cruza os complexos Presidente Juscelino e Serra caiada que predomina o aquífero fissural cristalino que tem como característica as rochas metamórficas (migmatitos e paragnaisses), e os depósitos Colúvio-Eluviais que predomina o aquífero granular/poroso, que tem como características sedimentos aluvionares e regolito. Assim com base na linha L30060 foi extraído uma secção do modelo 3D de susceptibilidade e gradiente magnético para análise:

Na secção da susceptibilidade pela profundidade (Figura 6.14), nas soluções de Euler e no perfil do sinal analítico é notória a diferença da parte leste e da oeste (limita pela abcissa 214600E) A parte oeste (aquífero cristalino fraturado) destaca-se as mais altas amplitudes (abcissas: 210000E) e a extremo oeste (abcissas: 208500E) trata-se de anomalias magnéticas mais profundas alcançando cota -200m e alto mergulho, próximo de 214000 a amplitude é alta com mergulho para oeste e é coincidente com a drenagem (abcissas: 214500E); a leste as amplitudes são mais baixas (aquífero poroso).

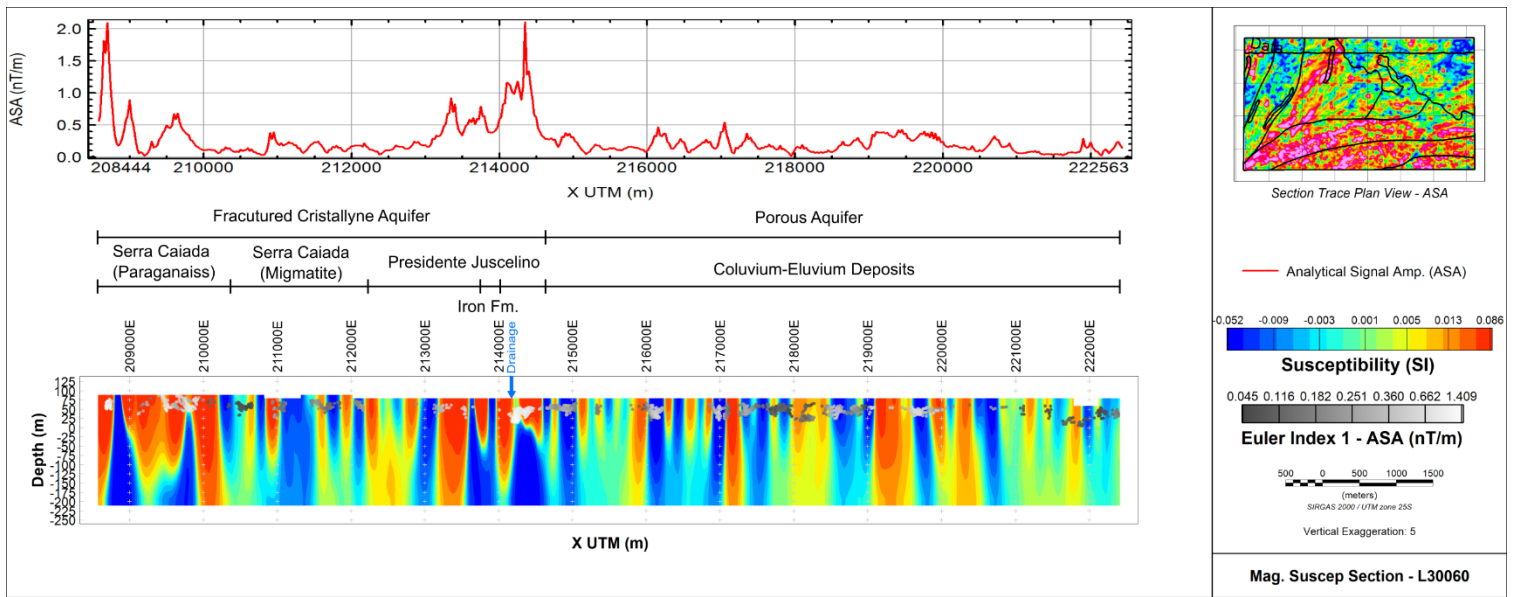


Figura 6.14: Seção da susceptibilidade magnética (L30060) extraído do modelo. Foi adicionado o ASA ao mapa de visão plana e soluções de euler na seção seguindo o sinal ASA. Note os limites dos aquíferos fraturado e poroso; contatos litológicos entre a secção e o perfil ASA.

Na sessão do gradiente pela profundidade (Figura 6.15) observa-se anomalias magnéticas mais pronunciadas próximas a superfície e centraliza-se diversas soluções nas altas amplitudes do gradiente magnético, como na região do aquífero cristalino fraturado (abscissa:214500E) que coincide com o eixo da drenagem e a extremo oeste (abscissa: 208500E). A leste percebe-se soluções estão centralizadas em algumas anomalias de alta amplitude do gradiente magnético, como na região do aquífero poroso (abscissa:216000 e 217000E).

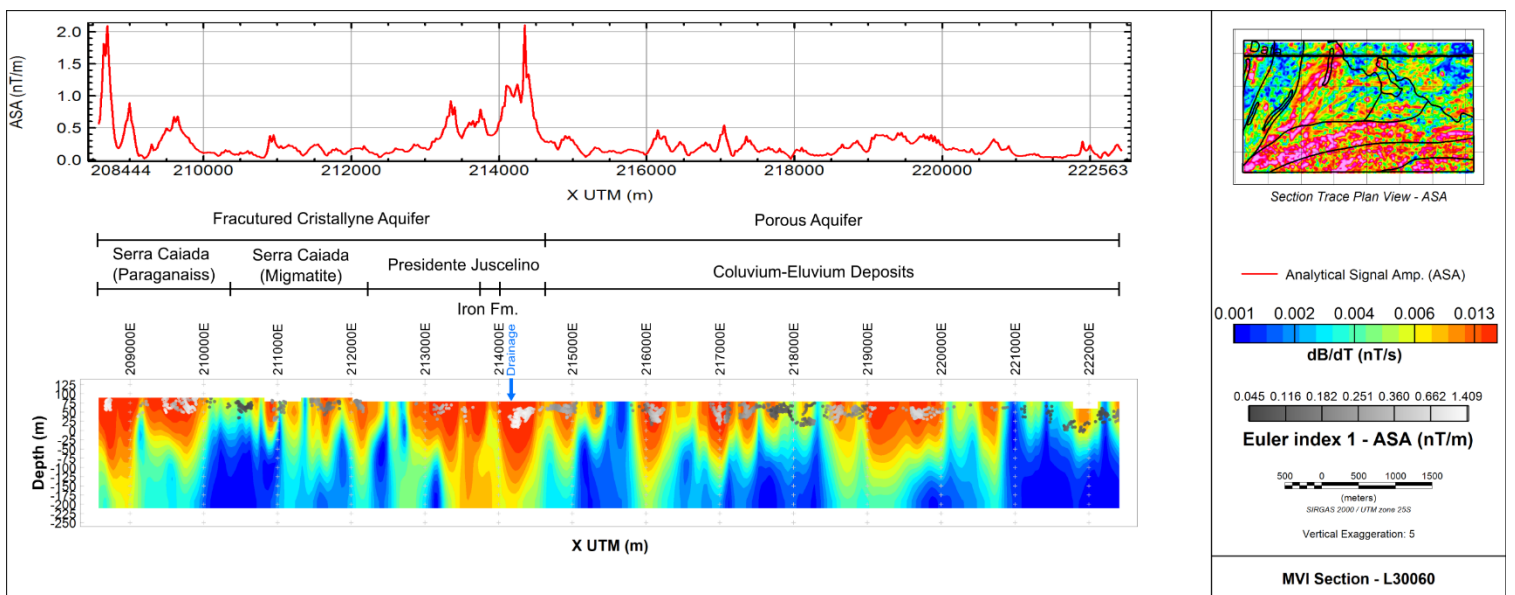


Figura 6.15: Seção MVI (L30060) extraído do modelo. Foi adicionado o ASA ao mapa de visão plana e soluções de euler na seção seguindo o sinal ASA. Note os limites dos aquíferos fraturado e poroso; contatos litológicos entre a secção e o perfil ASA.

Aerolevantamento FDEM

O processamento de dados FDEM também foi realizado utilizando o software Seequent Oasis Montaj (2022.2). O método interpolador de dados usado foi a Krigagem. A condutividade aparente foi calculada com base no modelo de semiespaço infinito definido por Fraser (1978), esse modelo consiste em uma camada resistiva sobre um semiespaço condutor, assim foram obtidas as imagens da condutividade para três frequências e duas geometrias (coaxial e coplanar). Os filtros aplicados foram hanning e Cosseno direcional, ajustando os parâmetros necessários para cada imagem da condutividade. As três frequências foram: baixa (900 Hz), média (4.500Hz) e alta (33.000Hz) para os arranjos coaxial e coplanar. No entanto, neste trabalho serão analisadas as imagens da condutividade na geometria coplanar por apresentarem melhor resolução e razão sinal-ruído.

A Figura 6.16 mostra as imagens da condutividade para as três faixas de frequência e (Figura 6.16 - D) mostra a imagem ternária CMY das três frequências com o intuito de identificar estruturas geofísicas com potencial de armazenamento de água subterrânea relacionando-as com os altos condutivos. As anomalias condutivas para o mapa de alta frequência (33 kHz) variam em torno de (-16 a 140 mS/m), para o mapa de média frequência (4.5 kHz) a condutividade varia em torno de (-3 a 55 mS/m) enquanto para o mapa de baixa frequência (900 Hz) a condutividade varia em torno de (2 a 30 mS/m). Observamos que a imagem de condutividade com baixa frequência, que representam os condutores mais profundos, possui razão sinal/ruído mais baixa. Pode-se observar pelos respectivos mapas que a NW da área, prevalece um alto condutivo com grande extensão na porção N/NE e alguns lineamentos com direção aproximadamente N-S na porção oeste. Na parte sul da área destaca-se poucos e extensos lineamentos condutivos com direção NE-SW e E-W associados principalmente ao eixo de drenagem ao longo do riacho Açú-mirim.

Com a imagem (CMY) foi possível visualizar a condutividade dos corpos em profundidade para as três frequências, ou seja, três profundidades simultaneamente. Nessa imagem destacam-se os condutores rasos a profundos simultaneamente pela coloração escura, os condutores profundos apresentam na cor amarela e os intermediários na cor magenta (Figura 6.16 - D). Na região sul do mapa foi possível identificar correlação dos lineamentos condutivos finos e extensos NE/SW, E/W com a rede hidrografia da região mais especificamente ao riacho Açú-mirim, evidenciando a alta condutividade de níveis rasos a profundos associados a ambiente hidrogeológicos, por ser uma zona de alto precedente tectônico, as fraturas e foliações presentes são significativas ao serem associadas a hidrogeologia local. Além disto, uma parte do lineamento condutivo e do riacho Açú-mirim é cortada pela falha geológica do tipo *strike-slip*, esta área está subparalela à direção de compressão máxima, portanto, é uma importante estrutura de recarga e acúmulo de água (Nascimento da Silva, 2001).

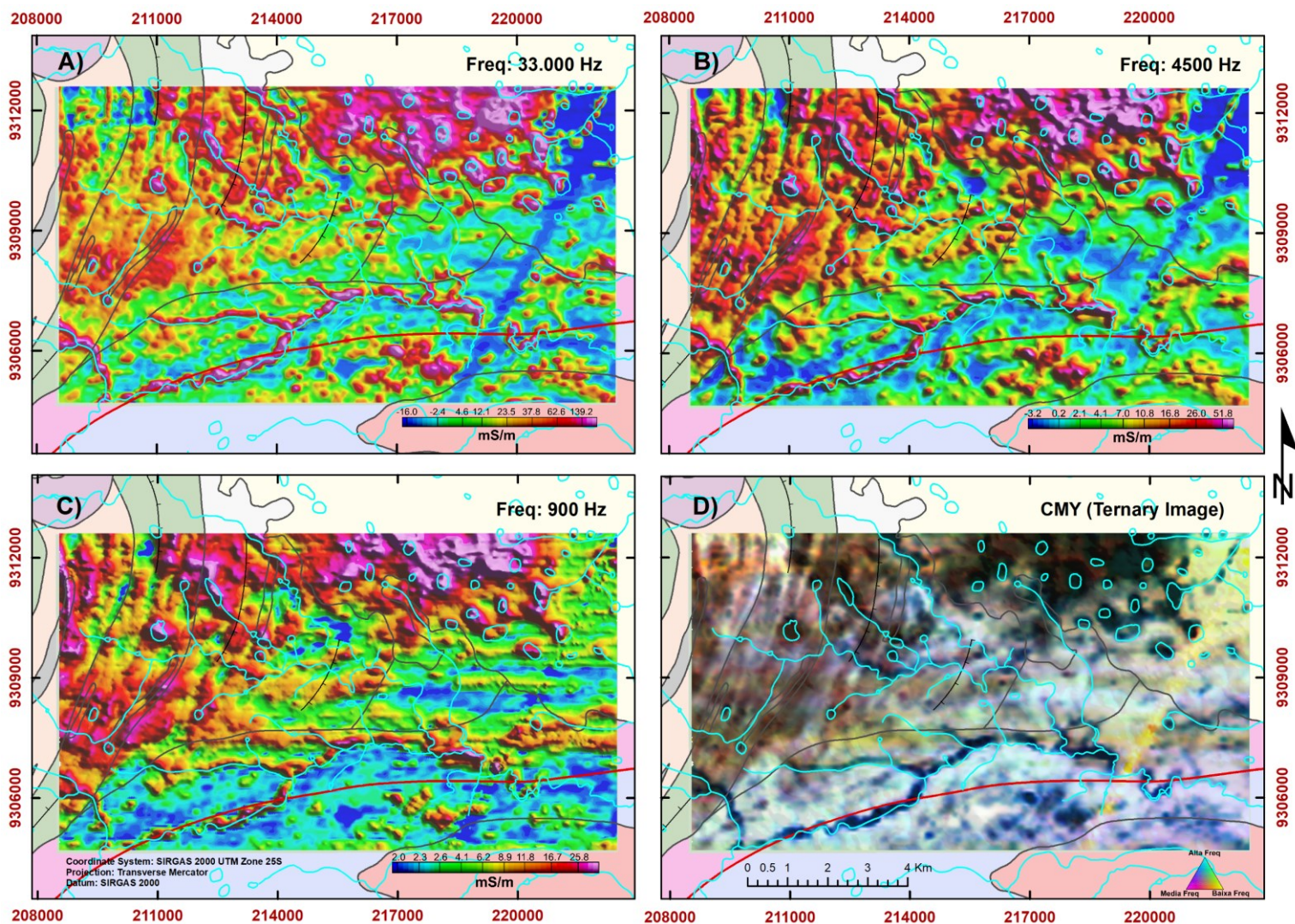


Figura 6.16: Mapa FDEM e geológico integrado. A) Anomalias condutivas (33 kHz); B) Anomalias condutivas (4.5 kHz); C) Anomalias condutivas (900 Hz); D) Imagem Ternária Multifrequência (CMY).

Para a interpretação da condutividade para as três profundidades, foi interpretado o mapa ternário CMY multifrequência (Figura 6.16 – D), e produzido um mapa de domínios condutivos para Serrinha (Figura 6.17). Os domínios condutivos delimitam regiões no embasamento cristalino associadas a infiltração e acúmulo de água salina. As regiões anômalas de Serrinha foram individualizadas em domínios condutivos o que permite uma análise mais local dos alvos hidrogeológicos. Já os lineamentos condutivos são de grande importância na análise da direção das estruturas hidrogeológicas potencialmente recarregadas por água.

No total, foram definidos 3 domínios condutivos (Figura 6.17). Seus limites foram inferidos pelas regiões mais condutivas a menos condutivas. Para auxiliar na interpretação foram sobrepostos poços tubulares de água perfurados e registrados com as respectivas medidas de condutividade e suas litologias e estruturas geológicas mapeadas. Adicionalmente, foram traçados os lineamentos condutivos com base nas anomalias condutivas nas três profundidades expostas na imagem CMY, que em sua grande maioria

acompanham feições geológicas (foliação, contatos, fratura e estruturas subverticais infiltradas com a água salina). Ao todo foram traçados 406 lineamentos e confeccionados os diagramas de rosetas discriminando a direção dos principais lineamentos e suas tendências na área de estudo para os respectivos domínios condutivos:

Domínio condutivo 1 (CD-1): situa-se ao sul de Serrinha onde foi possível identificar maior correlação dos lineamentos condutivos com as direções NE-SW e E-W, estando ao longo da rede de drenagem (riacho Açú-mirim). O restante da área tem condutividade de baixa a média. Por ser uma zona de alto precedente tectônico, as fraturas abertas e foliações presentes são significativas ao serem associadas com estruturas hidrogeológicas responsáveis pela recarga do aquífero. Muitos dos lineamentos condutivos acompanham contatos geológicos, como o contato dos Complexos Presidente Juscelino/Brejinho e o Complexo Brejinho/Pedro Velho, região associada à formação de aluviões e regolito. Foram traçados 119 lineamentos que apresentam uma direção preferencial de N80E (média ajustada). Essa região tem poços de condutividade variada, com 2 poços perfurados próximo ao eixo da drenagem e 2 poços próximos a falha do tipo *strike-slip*, esta é uma região propícia ao fluxo e recarga do aquífero cristalino, porém pouco explorado em relação as demais regiões.

Domínio condutivo 2 (CD-2): situa-se a centro e NW de Serrinha onde observa-se uma região condutiva de rasa a profunda com lineamentos de direção NNE-SSW com condutividade média a alta aproximadamente (Figura 6.16 e Figura 6.17). Observa-se também boa correlação da condutividade dos poços perfurados que acompanham os lineamentos e contatos geológicos da área, nesta região concentra-se poços predominantemente mais condutivos entre 4000 a 8000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e até mesmo maiores que 8000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), logo os contatos geológicos e lineamentos condutivos nesta região, especificamente os contatos dos complexos Serra Caiada e Presidente Juscelino são estruturas propícias a recarga e fluxo de água subterrânea;

Domínio condutivo 3 (CD-3): situa-se a NE de Serrinha, onde observa-se uma região condutiva de rasa a profunda a NE uma área de baixa condutividade: esse domínio engloba os depósitos quaternários coluviais e parcialmente os complexos Serra Caiada / Presidente Juscelino, observa-se tendência nos lineamentos sobre lagoas e açudes e limite do contato litológico. Foram traçados 107 lineamentos que apresenta uma direção preferencial E-W aproximadamente de N280W. Essa região tem uma alta densidade de lineamentos condutivos e poços com condutividade baixa menores que 1000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a intermediária entre 1000 a 4000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) são os depósitos aluvionares ao norte caracterizado pelo aquífero poroso, percebe-se uma alta densidade de poços perfurados nesta região e já se considera uma área propícia a retenção e acúmulo da água subterrânea

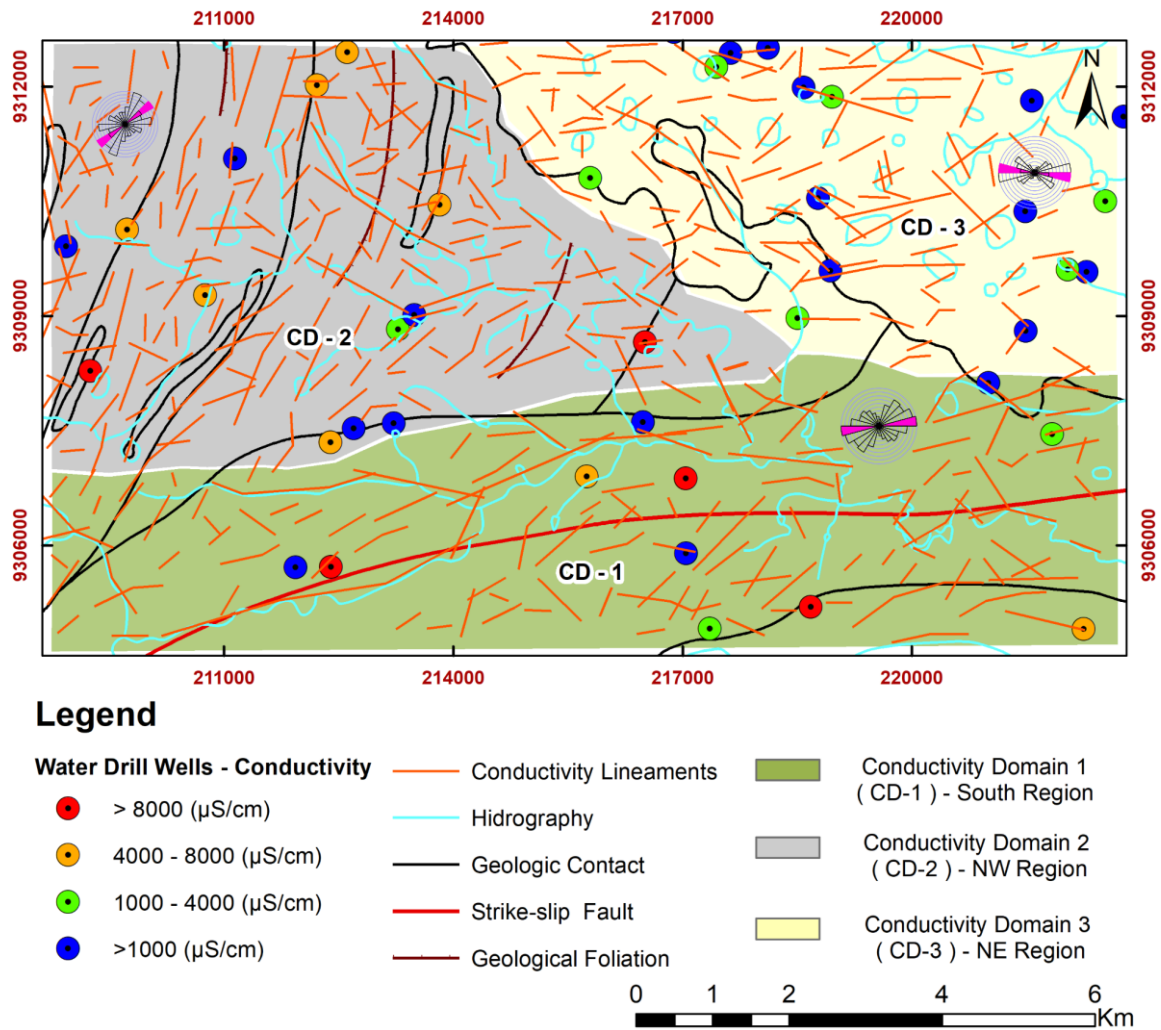


Figura 6.17: Domínios Condutivos de Serrinha e lineamentos condutivos com diagrama de rosetas condutivas para cada domínio condutivo (CD-1; CD-2 e CD-3). Note a direção preferencial ajustada é representada pela roseta (magenta) e intervalo de condutividade em ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nos poços perfurados.

Inversão FDEM

Após o cálculo da condutividade aparente pelo método de Fraser, 1978 e a inversão dos dados eletromagnéticos foi possível obter duas modelagens 3D: a) as imagens da condutividade pela profundidade (*conductivity depth image - CDI*) b) modelo inverso FDEM da área de estudo.

O modelo (Figura 6.18) foi obtido com as CDI's através da interpolação, utilizando o método da krigagem em células cúbicas com espaçamentos lateral e vertical (25x25x10). Observou-se camadas mais resistivas com condutividade abaixo de (5 mS/m) que provavelmente estão relacionadas ao embasamento cristalino (profundidade de 50 m). Foram notadas áreas mais condutivas, em torno de (140 mS/m) relacionadas aos eixos de drenagem nos vales, capeamento sedimentar e estruturas geológicas que podem estar preenchidas pela água salina. Foi realizado um corte em 50 mS/m para

individualizar as estruturas condutivas que estão em acordo com os lineamentos condutivos interpretados no mapa (Figura 6.17).

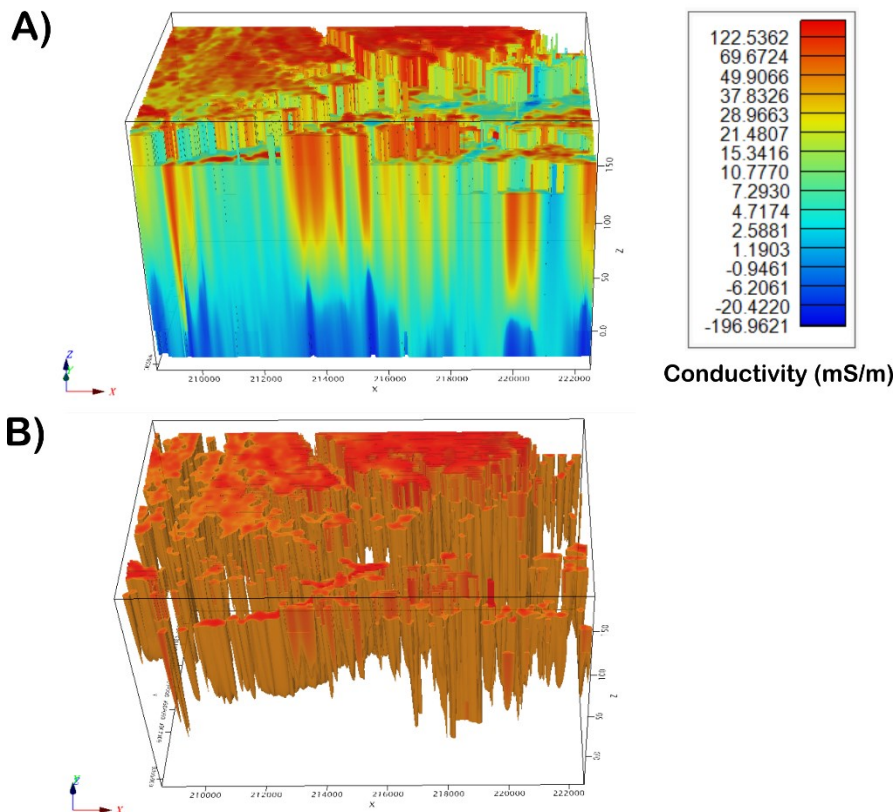


Figura 6.18: A) Imagem 3D da condutividade obtida pela interpolação das CDI's

B) Imagem 3D da condutividade acima de 50 (mS/m).

O modelo (Figura 6.20) foi obtido pela inversão dos dados eletromagnéticos. No processo de inversão FDEM foi inserida informação a priori, que se constitui em um modelo de três camadas para a área de Serrinha (Figura 6.19), baseado na análise do perfil geológico. O modelo de condutividade inicial foi de 3 camadas homogêneas com profundidades (100 m; 50 m e -150 m) e condutividades (0.001 mS/m; 0.01 mS/m e 50 mS/m). Além disso foi estabelecido um peso de 0,001 para o modelo inicial, após o primeiro conjunto de iterações o resultado servia de modelo inicial para o próximo conjunto de iterações e assim por diante até finalizar o processo de inversão.

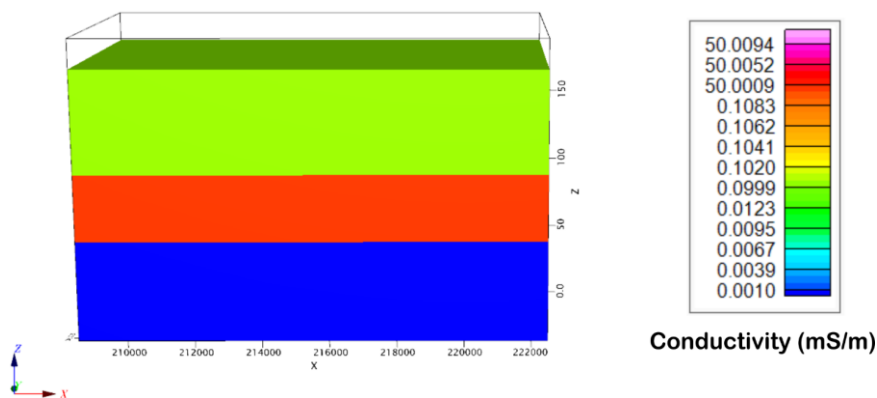


Figura 6.19: Informação apriori: modelo condutivo 3 camadas.

O modelo inverso foi obtido em células cúbicas com espaçamentos lateral e vertical (50x50x2) respectivamente. A condutividade da área de Serrinha, apresentou valores mais resistivos (0.0001 a 0.001 S/m) relacionados ao embasamento cristalino em maiores profundidades e mais condutivos em torno de (0.16 S/m) relacionados aos eixos de drenagem nos vales, capeamento sedimentar e estruturas geológicas que podem estar preenchidas pela água salina. O modelo obtido mostra uma capa condutiva suave associado a cobertura sedimentar até a profundidade de (50 m) e um contraste de propriedade física abrupto para um meio menos condutivo abaixo da profundidade de (50 m).

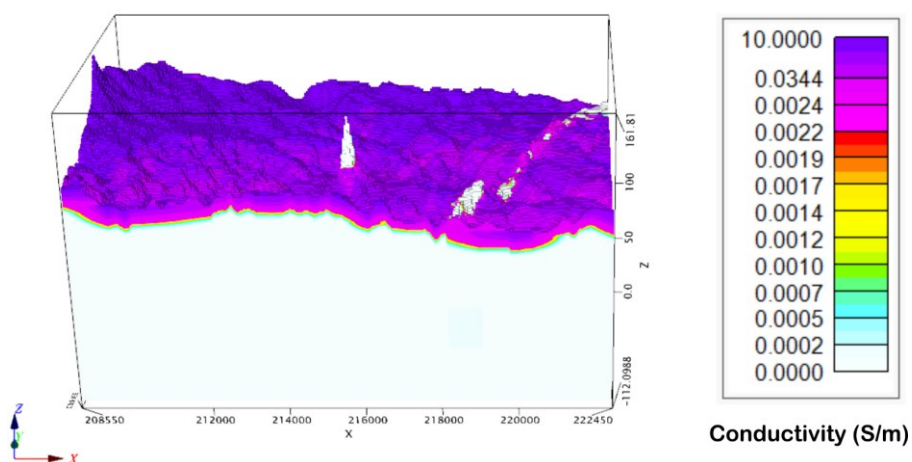


Figura 6.20: Modelo VOXI 3D da condutividade.

Foram realizados cortes horizontais em 4 profundidades dentro do intervalo (75m e 45 m) (Figura 6.21). O modelo restringe e demarca muito bem alvos como estruturas condutivas ao longo dos eixos de drenagem, na região nordeste (cobertura aluvionar) e no extremo noroeste.

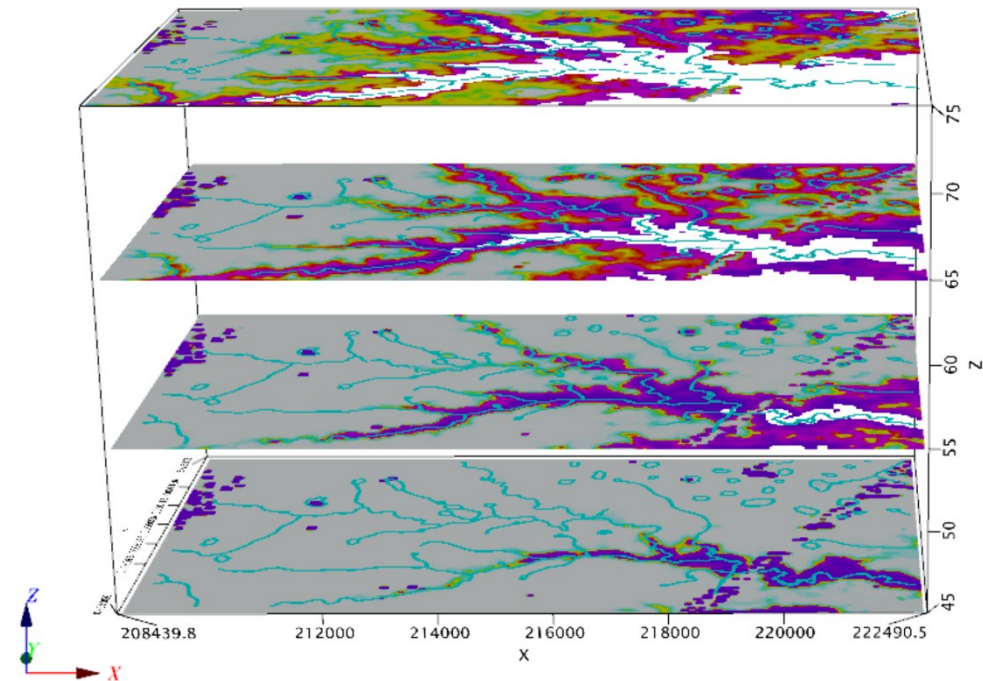


Figura 6.21: Cortes em profundidade do modelo VOXI 3D da condutividade em 4 profundidades: 75 m; 65 m; 55 m e 45 m.

Secção da condutividade - Conductivity Depth image (CDI)

A (Figura 6.22) apresenta a secção da condutividade pela profundidade da linha L30060N na parte norte do levantamento, além dos perfis das condutividades para os arranjos coplanares e coaxiais nas três frequências, do perfil da amplitude do sinal analítico e do resultado do Euler sobre a secção.

A CDI L30060N (Figura 6.22) situada na porção norte (sentido E-W) da área do levantamento está inserida a oeste no contexto dos complexos Presidente Juscelino e Serra caiada que predomina o aquífero fissural cristalino e a leste os depósitos Colúvio-Eluviais que predomina o aquífero granular/poroso, que tem como característica as rochas metamórficas (migmatitos e paragnaisses), impermeável e fraturado. A CDI atinge uma profundidade próxima a 40 metros e no geral observa-se uma camada de alta condutividade mais rasa podendo estar associada à camada de sedimentos relacionado aos regolitos e aluviões. Nas regiões entre as abscissas (217000E/221000E) inseridas nos depósitos colúvio-eluviais observa-se um alto condutivo e média/altas respostas magnéticas em profundidade, evidenciando a calha de sedimentos e estruturas subverticais não mapeadas geologicamente, região propícia ao acúmulo de água subterrânea. Dentro dessa região é notória a correspondência de áreas anômalas (alta condutividade) na secção e as altas amplitude nos perfis condutivos principalmente na abscissa (219000E) coincidindo uma alta condutividade (~50 mS/m) e soluções de Euler com inclinação para oeste, onde também está presente um poço tubular perfurado.

Entre as abscissas (208500E/210000E) no contexto da formação Serra Caiada (Paragnaisse) a condutividade varia de média a alta (15 a 30 mS/m) e apresenta uma alta resposta magnética exposta pelas soluções de Euler e a amplitude do sinal analítico: Entre as abscissas (211000E/213000E) região de contato transicional entre as formações Serra Caiada e Presidente Juscelino uma alta condutividade (~30 mS/m) na superfície e em profundidade e uma resposta magnética intermediária exposta pelas soluções de Euler, especificamente na abscissa (212000E) pode-se observar um alto condutivo (~38 mS/m) de média amplitude magnética com soluções de Euler subvertical caracterizando um alvo hidrogeológico e um poço tubular perfurado existe próximo ao contato litológico.

Observa-se na abscissa (214300E) uma resposta condutiva de intermediária a alta (~32 mS/m) e alta amplitude magnética (1,8 nT/m) além das soluções de Euler mostrando um lineamento magnético subvertical; nessa área encontra-se um contato transicional e a drenagem, podendo indicar uma possível estrutura do tipo riacho-fenda

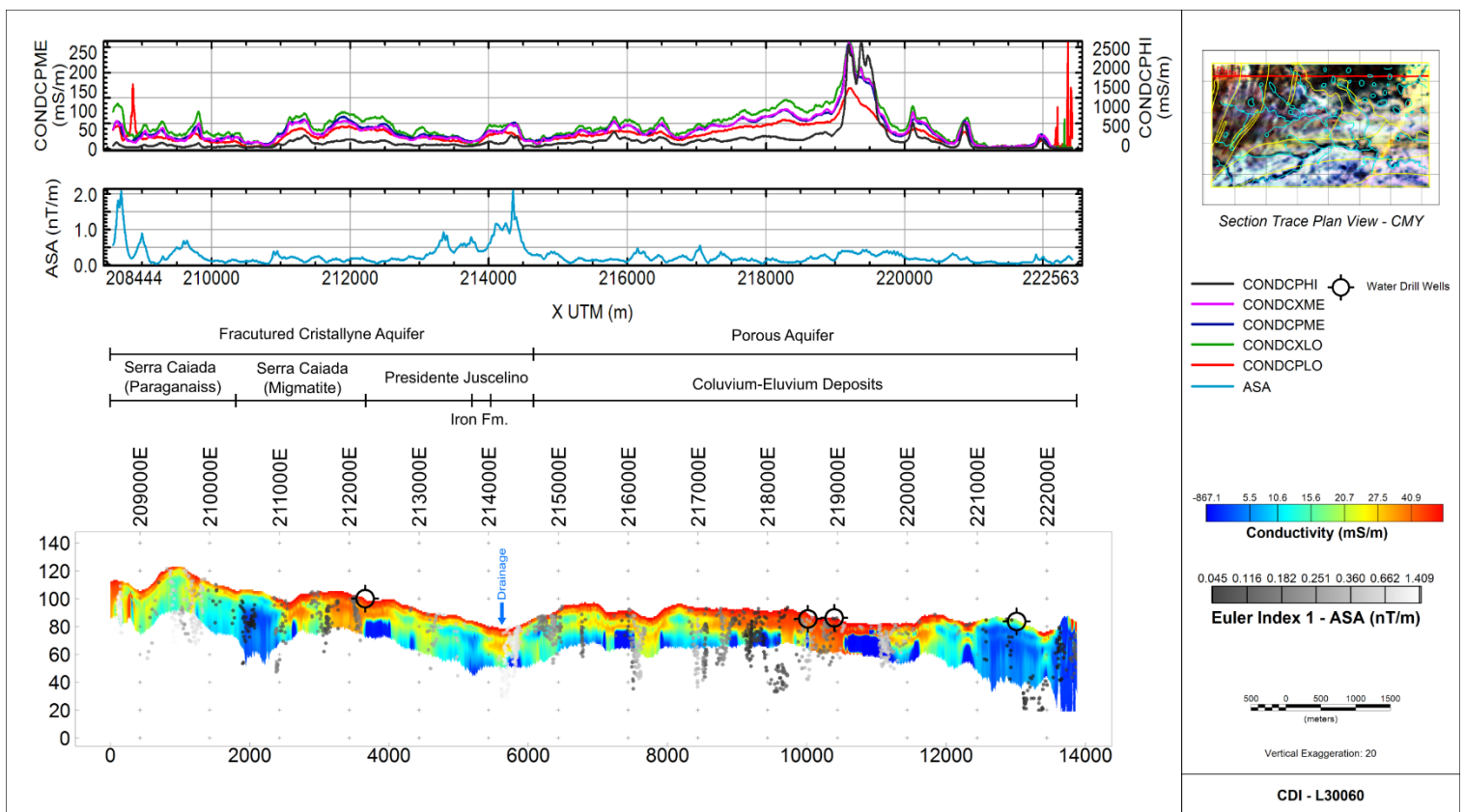


Figura 6.22: Conductivity depth image (CDI) - L30060 sobreposto soluções de euler acompanhando o sinal ASA; Poços e perfís da condutividade para as 3 frequências nas geometrias coaxial e coplanar. Note os limites dos aquíferos fraturado e poroso; contatos litológicos entre a secção e o perfil ASA.

Favorabilidade Hidrogeológica

Para correlacionar os resultados do modelo Voxel (condutividade) e as estruturas magnéticas obtidas pelo processo de inversão (susceptibilidade magnética), foram integrados os dados 3D magnéticos e eletromagnéticos (Figura 6.23) para contextualizar corpos e estruturas magnéticas associadas a geologia em subsuperfície, com corpos e estruturas condutivas associadas às características hidrogeológicas do aquífero cristalino.

A integração das respostas de susceptibilidade magnética (Figura 6.11 - A) e condutividade elétrica CDI's 3D (Figura 6.18) gerou um volume que chamamos modelo de favorabilidade hidrogeológica (Figura 6.23), para tanto foi considerado o volume da condutividade maior que (6 mS/m) o qual foi interseccionado com a isosuperfície de 0,03 (SI) (Figura 6.11 - B).

Foi estabelecido a isosuperfície de 0.01 (SI) para individualizar as estruturas subverticais e intersectar os modelos de condutividade CDI's 3D em 6 (mS/m) (Figura 6.23) respectivamente.

Foram também sobrepostas as estruturas geológicas mapeadas e a hidrografia de Serrinha responsáveis majoritariamente pela recarga dos aquíferos. O resultado desta integração apresenta correlação com os domínios e lineamentos magnéticos (Figura 6.10) e condutivos (Figura 6.17) descritos anteriormente e revela claramente estruturas magnéticas e condutivas simultaneamente em regiões ao longo dos eixos de drenagem ao sul (Riacho Açú-mirim; domínio CD-1), contatos litológicos a NW (domínio CD-2) e sob a cobertura aluvionar a NE (domínio CD-3), alvos favoráveis pela recarga do aquífero e acúmulo da água subterrânea.

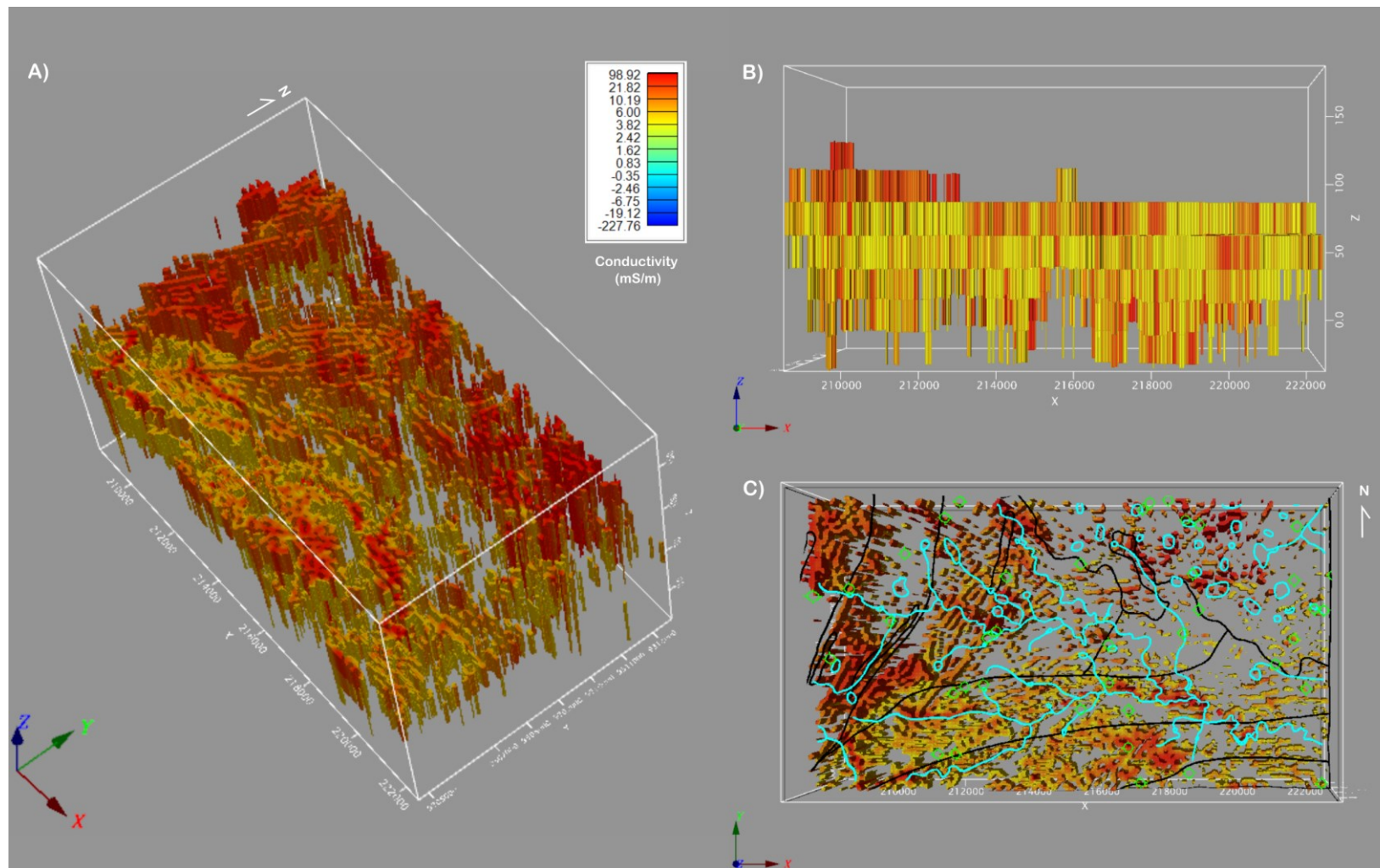


Figura 6.23: Modelo de favorabilidade hidrogeológica 3D: A) Vista principal (Suldeste de Serrinha); B) Vista lateral esquerda (Sul de Serrinha); C) Vista superior sobreposta os contatos litológicos (Linha preta), hidrografia (Linha ciano) e poços (alvos verdes).

Discussão

Com relação aos resultados magnéticos é importante ressaltar que análise dos mapas magnéticos (Derivada vertical & ASA) esclareceram de maneira efetiva feições e estruturas do cristalino ocultadas pelo capeamento sedimentar e de corpos magnéticos em profundidade não reveladas pela geologia mapeada, os lineamentos dispostos em diagrama de rosetas foram fundamentais para definir as principais direções preferenciais das estruturas neotectônicas da área. As profundidades alcançadas pelas soluções de Euler delimitaram bem estruturas sub-verticais (fraturas) até 90 m de profundidade e contatos geológicos que são fundamentais para a infiltração e fluxo de água salina. Os resultados obtidos pela inversão Suscep & gradiente recuperaram modelos satisfatórios e aceitáveis geologicamente, definindo os corpos magnéticos da região e suas disposições.

Dos resultados AEM, o modelo 3D das CDI's obtido manteve a alta resolução até 100 m em profundidade definindo bem litotipos cristalinos e zonas de alteração. A inversão EM obteve maior alcance de investigação em profundidade (200 m) destacando grandes estruturas. Devido ao tamanho da célula de inversão (50 m) selecionada era esperado um modelo suave que definisse bem feições de grande extensão em profundidade. O resultado da inversão teve um maior alcance em profundidade, mas não teve alta resolução de alvos rasos.

Da integração dos dados MAG & FDEM os alvos com maior favorabilidade hidrogeológica foram definidos, trazendo informações do traço magnético do embasamento cristalino e os corpos condutivos associados a infiltração da água salina ficam bem evidentes em especificamente em três locais: 1º Aquífero Poroso: depósito aluvionar (MD-5 & CD-3); 2º Aquífero Fraturado: corpo bandado no complexo Presidente Juscelino e contatos/lineamentos entre os complexos Serra Caiada e Presidente Juscelino (MD-2,3 e 4 & CD-2); e 3º Aquífero Fraturado: falha do tipo *strike-slip* (riacho Açu-mirim). Para a síntese dos resultados foi elaborado a (Tabela 6. 3):

Tabela 6. 3: Síntese dos resultados obtidos MAG & EM.

Metodologia	resultados	Aquífero Fraturado	Aquífero Poroso
Magnetometria	Amplitude	Média - Alta	Média - Baixa
	Profundidade das Anomalias	Maior profundidade (200 m)	Menor profundidade (150 m)
	Direção	NNE/SSW	E-W
	Domínios	MD - 1,2,3 E 4	MD - 5
Eletromagnetometria	Amplitude	Média - Alta (CD-2) e Baixa (CD-1)	Alta
	Profundidade das Anomalias	Mais profundo (CD-2) Raso (CD-1)	Rasa a profunda
	Direção	NE/SW	E-W
	Domínios	CD - 1 e 2	CD - 3
Evidências de estruturas		Riacho-fenda	Calha

Conclusões

O presente estudo demonstra que levantamentos geofísicos aerotransportados (AEM) podem ser usados efetivamente em configurações geológicas complexas com alto grau de heterogeneidade, tal como identificar a arquitetura geológica dos terrenos pré-cambrianos fraturados e caracterizar os aquíferos cristalinos em dezenas de metros a centenas de metros de profundidade com uma boa resolução dos dados. Os levantamentos aéreos oferecem vantagens em relação a outras técnicas geofísicas permitindo uma rápida aquisição em larga escala.

A análise conjunta dos dados geofísicos AEM e seus produtos gerados integrados à dados geológicos e hidrogeológicos foram de fundamentais para o desempenho do estudo e interpretação de feições geológicas e estruturas condutivas associadas a águas subterrâneas em aquíferos cristalinos. A empregabilidade de técnicas geofísicas aos dados aéreos magnéticos e eletromagnéticos contribuiu no avanço da pesquisa hidrogeológica e hidrogeofísica da região, onde a detecção de zonas condutivas em terrenos cristalinos pela modelagem e inversão do dados FDEM (composição ternária – CMY, CDI's 3D & Voxi) pode ter relação direta com a presença de água salinizada, e a inversão e interpretação dos dados magnéticos (TMI; Derivada Vertical; ASA; Deconvolução de Euler; Susceptibilidade & Gradiente Magnético) foram fundamentais no mapeamento de corpos magnéticos associado a feições geológicas, como estruturas rúpteis (fraturas, contatos e falhas) em subsuperfície e com alto potencial a infiltração e armazenamento de água. A inversão dos dados geofísicos é uma importante parte da interpretação, pois isto permite a identificação e detalhamento tridimensional de feições que não podem ser resolvidas por mapas 2D ou perfis isoladamente.

Com a localização e seleção dos alvos e anomalias condutivas de interesse, os produtos obtidos corroboram para compreensão do aquífero e modelos de ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos, como estruturas tipo riacho-fenda, estimando a a condutividade da calha de sedimentos (regolitos) e a profundidade das zonas fraturadas. Além do reconhecimento das anomalias condutivas associadas a água salina e sua relação com estruturas magnéticas e feições geológicas (contatos, fraturas e falhas) responsáveis pelo fluxo e armazenamento da água.

O modelo de favorabilidade hidrogeológica 3D e sessões da condutividade pela profundidade 2D pode ser utilizada como guia para futuros projetos e locações de novos poços tubulares na região, reduzindo as chances de perfuração de poços secos e aumentando a assertividade de poços produtivos em novas perfurações. Além disso, os resultados obtidos irão contribuir para demais áreas do projeto Proasne e como referência para regiões semiáridas similares afetadas por secas sazonais.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, ao Instituto de Geociências e à própria Universidade de Brasília, a nossa profunda gratidão pelo apoio e colaboração ao longo de toda nossa jornada de pesquisa.

Referencias

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). A questão da água no Nordeste. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, DF: CGEE/ANA, p.45-122, 2012.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; JACOBSEN, L. H.; SORENSEN, K. I. 2008. A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of tem data. *Journal of Applied Geophysics*, v. 65, n. 1, p. 10–20. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985108000232>.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; KIRKEGAARD, C.; FIANDACA, G.; SCHAMPER, C.; BEHROOZMAND, A. A.; BINLEY, A.; NIELSEN, E.; EFFERSØ, F.; CHRISTENSEN, N. B.; SORENSEN, K.; FOGED, N.; VIGNOLI, G. 2015. An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data. *Exploration Geophysics*, Taylor Francis, v. 46, n. 3, p. 223–235. <https://doi.org/10.1071/EG13097>.

BRITO NEVES, B. B. 1983. O mapa geológico do Nordeste oriental do Brasil, escala 1/1.000. 000. Tese de Doutorado.

CORIOLOANO, A. C. F. 2002. Reavaliação de Critérios Estruturais na Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos, com Ênfase na Neotectônica e Sensoriamento Remoto. Tese de Doutorado, número 02 / PPGG. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COUTO JUNIOR, M. A. 2021. Gold deposits investigation in Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil, by the analysis of HTEM data. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.14.2021.tde-10082021-111900>.

CHRISTIANSEN, A. V. e AUKEN, E. 2012. A global measure for depth of investigation. *GEOPHYSICS*, v. 77, n. 4, p. WB171–WB177. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0393.1>.

DANTAS, E. L.; HACKSPACHER, P. C.; VAN SCHMUS, W. R. 1998. ARCHEAN ACCRETION IN THE SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE MASSIF, BORBOREMA PROVINCE, NORTHEAST BRAZIL. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 2.

DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACHER, P. C. 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: Remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, v. 130, n. 1–4, p. 1–25.

DELSMAN, J. R.; BAAREN, E. S. V.; SIEMON, B.; DABEKAUSSEN, W.; KARAOULIS, M. C.; PAUW, P. S.; VERMAAS, T.; BOOTSMA, H.; LOUW, P. G. B. de; GUNNINK, J. L.; DUBELAAR, C. W.; MENKOVIC, A.; STEUER, A.; MEYER, U.; REVIL, A.; ESSINK, G. H. P. O. 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in zeeland, the netherlands. *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, v. 13, n. 8, p. 084011. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aad19e>.

DENTITH, M. e MUDGE, S. T. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Victoria: Cambridge University Press, v. 50 p. 85-349.

ELLIS R.G. 1998. Inversion of airborne electromagnetic data, *Exploration Geophysics*, 29:1-2, 121-127, DOI: 10.1071/EG998121

ELLIS, R.G., DE WET, B.; MACLEOD, I. N. 2012. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources. *ASEG Extended Abstract*, v. 1, p. 1-4.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; DEMETRIO, J. G. A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM.

FLINCHUM, B.; PEETERS, L.; MUNDAY, T.; CAHILL, K. 2021. Improving the hydrogeologic conceptualization of a remote semiarid palaeovalley groundwater system using airborne electromagnetics, seismic refraction and reflection, and downhole nuclear magnetic resonance. *Geophysics*, v. 86, n. 5, p. WB149–WB168, 09. ISSN 0016-8033. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0614.1>.

FRASER, D. C. 1978. Resistivity mapping with an airborne multicoil electromagnetic system. *Geophysics*, v. 43, n. 1.

GALVÃO NETO, A. R. T.; PAULA, T. L. F. de; GALVÃO, M. J. d. T. G.; MONTEIRO, A.B.; DINIZ, J.A.O. 2022. Mapa hidrogeológico do estado do Rio Grande do Norte. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

GRANT, F. S. 1985. Aeromagnetism, geology and ore environments, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: An overview. *Geoexploration*, v. 23, n. 3, p. 303–333.

GUNNINK, J. L.; BOSCH, J. H. A.; SIEMON, B.; ROTH, B.; AUKEN, E. 2012. Combining ground-based and airborne electromagnetic data through artificial neural networks for modelling glacial till under saline groundwater conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 8, p. 3061–3074. <https://hess.copernicus.org/articles/16/3061/2012/>.

ISLES, D. J. e RANKIN, L. R. 2013. Geological interpretation of aeromagnetic data. *Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists*.

JARDIM DE SÁ, E.F; NASCIMENTO DA SILVA, C.C; CORIOLANO, A.C.F; MEDEIROS, W.E. 2008. Conceitos de Análise Estrutural Aplicados à Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos. In: Feitosa, Fernando A.C. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações/organização e coordenação científica/Fernando A.C. Feitosa et al – 3. ed. rev. e ampl – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID*, 812 p.

KELLER, G. V. 1988. 2. Rock and Mineral Properties. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*.

KNIGHT, R.; SMITH, R.; ASCH, T.; ABRAHAM, J.; CANNIA, J.; VIEZZOLI, A.; FOGG, G. 2018. Mapping aquifer systems with airborne electromagnetics in the central valley of California. *Groundwater*, v. 56, n. 6, p. 893–908. <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gwat.12656>.

KORUS, J. 2018. Combining hydraulic head analysis with airborne electromagnetics to detect and map impermeable aquifer boundaries. *Water*, v. 10, n. 8. ISSN 2073-4441. Disponível em: (<https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/975>).

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A e CPRM. 2001. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Eletromagnetométricos e Seleção das Anomalia Eletromagnetométricas. p. 1–81.

LEGAULT, J. M. 2015. Airborne electromagnetic systems—state of the art and future directions. *CSEG Recorder*, v. 40, n. 6, p. 38-49.

LIMA, M. G. 2002. Mapeamento geológico-estrutural na região de Serrinha (RN), para apoio à interpretação de dados aerogeofísicos na pesquisa hidrogeológica. Relatório de Graduação, UFRN/CCET/DG, p. 1–81.

MINSLEY, B. J.; FOKS, N. L.; BEDROSIAN, P. A. 2021. Quantifying model structural uncertainty using airborne electromagnetic data. *Geophysical Journal International*, v. 224, n. 1, p. 590–607, 08. ISSN 0956-540X. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa393>.

NASCIMENTO DA SILVA, C. C. 2001. Integração de dados estruturais, de sensores remotos e de geofísica na prospecção hidrogeológica em terrenos cristalinos: estudo de casos no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL PERF. POÇOS, 12; SIMPÓSIO HIDROGEOL. NORDESTE, 4, Olinda, 2001. p. 445-454.

NASCIMENTO DA SILVA C. S. 2004. Caracterização Geológica-Geofísica Do Meio Aquífero Fissural: Uma Contribuição Aos Modelos De Fluxo e Armazenamento de Água Subterrânea. Tese de Doutorado.

NASCIMENTO DA SILVA, C. C.; MEDEIROS, W. E. de; JARDIM DE SÁ, E. F.; LIMA, M. da G. 2023. O aquífero fissural no semiárido: análise de modelos com base em dados geológico-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestre. *Águas Subterrâneas*, v. 37, e–30197. <https://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30197>

OLDENBORGER, G.; LOGAN, C.; HINTON, M.; PUGIN, A.-M.; SAPIA, V.; SHARPE, D.; RUSSELL, H. 2016. Bedrock mapping of buried valley networks using seismic reflection and airborne electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, v. 128, p. 191–201. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116300581>.

QUEIROZ, M. C. S. de. 2021. Modelagem geofísica: uma contribuição para a hidrogeofísica aplicada em ambiente cristalino fraturado no ne brasileiro. 2021. 143 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

ROIG, H. L. e DANTAS, E. L. 2013. Carta geológica: folha são José do campestre - sb.25-y-a-i. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

REEVES, C. *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation*. Washington (DC): Geosoft, 2005.

RUTHERFORD, J.; IBRAHIMI, T.; MUNDAY, T.; MARKEY, A.; VIEZZOLI, A.; RAPITI, A.; PATERSON, R. 2021. An Assessment of Water Sources for Heritage Listed Organic Mound Springs in NW Australia Using Airborne Geophysical (Electromagnetics

and Magnetism) and Satellite Remote Sensing Methods. *Remote Sens.* 13, 1288. <https://doi.org/10.3390/rs13071288>

SIEMON, B.; BAAREN, E. VAN; DABEKAUSSEN, W.; DELSMAN, J.; DUBELAAR, W.; KARAOULIS, M.; STEUER, A. 2019. Automatic identification of fresh–saline groundwater interfaces from airborne electromagnetic data in zeeland, the netherlands. *Near Surface Geophysics*, v. 17, n. 1, p. 3–25. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nsg.12028>.

SIEMON, B.; STEUER, A.; ULLMANN, A.; VASTERLING, M.; VOB, W. 2011. Application of frequencydomain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 36, n. 16, p. 1373–1385. ISSN 1474-7065. *Urban Geophysics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706511000398>.

SIEMON, B.; CHRISTIANSEN, A. V.; AUKEN, E. 2009. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. *Near Surface Geophysics*, v. 7, n. 5-6, p. 629-646. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.3997/1873-0604.2009043>.

SILVA, J.A. da. 2000. Estruturas de acumulação de água em rochas cristalinas: Estudo geofísico e geológico de casos no estado do Rio Grande do Norte. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 92 p.

SIQUEIRA, L., 1967. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Rev. Água Subterrânea, Recife*, v. 2, p. 1-29.

SOUZA FILHO, O. A. de; RIBEIRO, J. A.; VERÍSSIMO, L. S.; OLIVEIRA, R. G. de; GOMES, F. E. M.; BRANDÃO, R. de L.; FRIZZO, S. J.; OLIVEIRA, J. F. de. 2002. Projeto Otimização de Metodologias para Prospecção de Águas Subterrâneas em Rochas Cristalinas. Relatório Integrado De Atividades 1999 – 2002 - Bases para avaliação do projeto. CPRM/REFO. Fortaleza. 160 p. il. Anexos.

SOUZA FILHO, O.A. 2008. Dados aerogeofísicos e geológicos aplicados à seleção de áreas favoráveis para água subterrânea no domínio cristalino do Ceará, Brasil. Tese de Doutorado, N. 400, Universidade de Campinas, São Paulo.

STEUER, A.; SIEMON, B.; AUKEN, E. 2009. A comparison of helicopter-borne electromagnetics in frequency and time-domain at the cuxhaven valley in northern germany. *Journal of Applied Geophysics*, v. 67, n. 3, p. 194–205, ISSN 0926-9851. *Airborne Geophysics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985107000717>

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. 1990. *Telford – Applied Geophysics* Book England Cambridge University Press, p. 62-134.

TIKHONOV, A. N.; ARSEININ V. Y. *Solutions of ill-posed problems*. Washington, D.C.: John Wiley & Sons, New York: V. H. Winston & Sons. 1977.

VIEZZOLI, A.; TOSI, L.; TEATINI, P.; SILVESTRI, S. 2010. Surface water–groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The venice lagoon example. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 1. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009GL041572>

DISCUSSÃO & CONCLUSÃO DA DISSERTAÇÃO

Artigo 1 – Avanços na Pesquisa em Geofísica Aplicada para Levantamentos AEM com Foco na Prospecção de Água Subterrânea: Uma Revisão

Este trabalho apresenta um histórico da aplicação da tecnologia dos levantamentos eletromagnéticos aerotransportados (AEM), com a intenção de conhecer os principais temas que a compõem, favorecendo a realização de trabalhos futuros. Além disso, essa pesquisa citou onde estão localizados os principais laboratórios de pesquisas, quem são os pesquisadores envolvidos com essa temática, quais são as principais linhas de pesquisa e quais são os artigos mais citados.

A Austrália e a Alemanha são os países que possuem o maior número de centros de pesquisas e que mais publicaram artigos sobre essa tecnologia. No entanto, países como Estados Unidos da América, Canadá, Itália e Países-Baixos também exercem um grande papel na contribuição de estudos sobre essa tecnologia.

A tecnologia AEM teve grande avanço nos últimos 20 anos apresentando um crescimento linear ao decorrer dos anos e com seu pico de publicações em 2021, no entanto houve um forte declínio em 2022 ambos dentro do período pandêmico mundial.

As principais abordagens encontradas nessa pesquisa relacionadas aos levantamentos eletromagnéticos aerotransportados (AEM) na investigação e caracterização das subsuperfícies foram definidas em: melhorar a resolução, acurácia e interpretação das propriedades geológicas e hidrogeológicas utilizadas na exploração de água subterrânea confinadas em aquíferos. Assim incluiu modelagem 3D de dados eletromagnéticos aerotransportados por meio de processos de inversão. Pesquisas em torno da caracterização da subsuperfície relacionadas a feições geomorfológicas com vales e eixos de drenagem, interações e troca de água fresca e salina entre superfície e subsuperfície em ambientes costeiros, avanços na melhoria de algoritmos tornando-os mais estáveis para modelagem direta e inversa de dados eletromagnéticos e elétricos, esses obtidos por diversas técnicas sendo elas levantamentos aéreos, de superfície e medidas direta de poços perfurados. Portanto, a aplicação de estudos geofísicos especificamente levantamentos AEM são de extrema relevância para prospecção de água subterrânea e gerenciamentos de recursos hídricos subterrâneos.

Entre os autores que mais contribuíram estão: Bernhard Siemon, estudando a comparação de dados AEM no domínio do tempo e da frequência, revelando vantagens e limitações desses métodos para investigação de água subterrânea; Auken E. , destaca investigações em vales e eixos de drenagem usando técnicas de inversão em dados AEM, revelando profundo entendimento das resolução e caracterização dessas feições geomorfológicas importantes para retenção de água subterrânea; Steuer A., contribuiu para o conhecimento sobre aplicação dos métodos AEM para prospecção de água subterrânea em áreas urbanas. Seu estudo mostra desafios e soluções na utilização desses métodos em ambiente urbano complexo; Viezzoli A. e Teatine P., conduz estudos

direcionados as trocas e interações de água fresca e salina em ambientes costeiros, como exemplo a Lagoa de Venezia na Itália.; Jorgensen F., seus estudos contribuem na investigação de vales e eixos de drenagem na Dinamarca, utilizando integração de diversos métodos e técnicas geofísicas, proporcionando entendimento da geometria e propriedades dessas feições geomorfológicas, impactando positivamente para o gerenciamento de aquíferos; Flinchum et al. (2021), no âmbito dessa pesquisa contribui generosamente na aplicação de múltiplas técnicas geofísicas em região remota semiárida para prospecção de água subterrânea;

Dessa forma, concluímos que o estudo e prospecção de água subterrânea envolve diversos tipos de técnicas para cada tipo de região envolvendo ambientes complexos e características distintas, tornando a pesquisa complexa para cada área. Portanto, levantamentos AEM são mais apropriados para regiões geomorfológicamente complexas devido a sua versatilidade de aquisição em larga escala.

Artigo 2 – Caracterização Aerogeofísica de Sistemas de Aquíferos Cristalinos Fraturados na Região Semiárida do Nordeste Brasileiro: Avanços no Conhecimento Hidrogeofísico para Áreas Sujeitas a Seca.

O objetivo desta pesquisa foi obter um produto final que caracterizasse uma região semiárida em termos geofísicos na busca de um modelo de favorabilidade hidrogeológica. Este trabalho apresenta a tecnologia dos levantamentos AEM especificamente no domínio da frequência e seus resultados como uma ferramenta fundamental na investigação e prospecção de água subterrânea em regiões semiáridas afetadas pela seca sazonal, tal como o semiárido nordestino brasileiro que se situa em uma configuração geológica (Rochas cristalinas pré-cambrianas fraturadas) complexa conhecido como o planalto da Borborema.

A análise conjunta dos dados geofísicos AEM e seus produtos gerados integrados à dados geológicos e hidrogeológicos foram de fundamentais para o desempenho do estudo e interpretação de descontinuidades e estruturas condutivas associadas a água subterrânea confinada em aquíferos cristalinos. A empregabilidade de técnicas geofísicas aos dados magnéticos e eletromagnéticos aerotransportados contribuiu no avanço da pesquisa hidrogeológica e hidrogeofísica da região, onde a detecção de zonas condutivas em terrenos cristalinos por meio da modelagem e inversão dos dados eletromagnéticos (composição ternária – CMY, CDI's 3D & Voxi) pode ter relação direta com a presença de água salinizada e a modelagem e inversão dos dados magnéticos (TMI; Derivada Vertical; ASA; Deconvolução de Euler; Voxi Susceptibilidade & Gradiente Magnético) foram fundamentais no mapeamento das descontinuidades e estruturas rúpteis (fraturas e contatos) em subsuperfície com alto potencial ao fluxo e armazenamento de água. A inversão dos dados geofísicos é de suma importância para interpretação, pois permite o detalhamento das análises tridimensionais e identificação de feições que não podem ser resolvidas por mapas 2D ou perfis isoladamente.

A integração dos dados MAG e FDEM resultou em alvos com maior favorabilidade hidrogeofísica, trazendo informações do traço magnético do embasamento cristalino, e os corpos condutivos associados ao acúmulo da água salina foram definidos especificamente em três locais: 1º) Aquífero Poroso: depósito aluvionar (MD-5 & CD-3); 2º) Aquífero Fraturado: corpo bandado no complexo Presidente

Juscelino com direção NE-SW e contatos/lineamentos N-S entre os complexos Serra Caiada e Presidente Juscelino (MD-2,3 e 4 & CD-2); e 3°) Aquífero Fraturado: falha do tipo *strike-slip* (riacho Açu-mirim). Os alvos selecionados estabelecem boa correlação com corpos condutivos e magnéticos modelados.

Com a localização e seleção dos alvos e anomalias condutivas de interesse, os produtos obtidos corroboram para compreensão do aquífero e modelos de ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos, como estruturas tipo riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar, delineando a geometria da calha de sedimentos e a geometria de zonas fraturadas. Além do reconhecimento da extensão lateral das anomalias condutivas associadas a água salina e sua relação com estruturas magnéticas associado a feições geológicas (fraturas e falhas) responsáveis pelo fluxo e armazenamento da água.

O modelo de favorabilidade hidrogeológica (visão 3D) e sessões da condutividade pela profundidade 2D pode ser utilizada como guia para futuros projetos e locações de novos poços tubulares na região, reduzindo as chances de perfuração de poços secos e aumentando a eficácia e efetividade em novas perfurações. Além disso, os resultados obtidos irão contribuir para demais áreas do projeto Proasne e como guia para regiões semiáridas similares afetadas por secas sazonais.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). A questão da água no Nordeste. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, DF: CGEE/ANA, p.45-122, 2012.

ALMEIDA, F. F. M.; FUCK, R. A.; HASUI, Y. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Science Reviews*, v. 17, n. 1–2, p. 1–29.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; JACOBSEN, L. H.; SORENSEN, K. I. 2008. A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of tem data. *Journal of Applied Geophysics*, v. 65, n. 1, p. 10–20. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985108000232>.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; KIRKEGAARD, C.; FIANDACA, G.; SCHAMPER, C.; BEHROOZMAND, A. A.; BINLEY, A.; NIELSEN, E.; EFFERSO, F.; CHRISTENSEN, N. B.; SORENSEN, K.; FOGED, N.; VIGNOLI, G. 2015. An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data. *Exploration Geophysics*, Taylor Francis, v. 46, n. 3, p. 223–235. <https://doi.org/10.1071/EG13097>.

AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; WESTERGAARD, J. H.; KIRKEGAARD, C.; FOGED, N.; VIEZZOLI, A. 2009. An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the skytem system. *Exploration Geophysics*, Taylor Francis, v. 40, n. 2, p. 184–192. <https://doi.org/10.1071/EG08128>.

AUKEN, E.; FOGED, N.; LARSEN, J. J.; LASSEN, K. V. T.; MAURYA, P. K.; DATH, S. M.; EISKJAER, T. T. 2019. ttem — a towed transient electromagnetic system for

detailed 3d imaging of the top 70 m of the subsurface. **GEOPHYSICS**, v. 84, n. 1, p. E13–E22. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0355.1>.

AZEVEDO, N. C. C. de. 2022. Análise dos dados de campos potenciais na transição continente-oceano da Bacia de Barreirinhas, MA-Brasil. Monografia. Universidade Federal Fluminense.

BEDROSIAN, P. A.; SCHAMPER, C.; AUKEN, E. 2016. A comparison of helicopter-borne electromagnetic systems for hydrogeologic studies. **Geophysical Prospecting**, v. 64, n. 1, p. 192–215. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2478.12262>.

BLAKELY, R. J. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. London: Cambridge University Press, 1995.

BOAGA, J. 2017. The use of fdem in hydrogeophysics: A review. *Journal of Applied Geophysics*, v. 139, p. 36–46. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985117301507>.

BRITO NEVES, B. B. O mapa geológico do Nordeste oriental do Brasil, escala 1/1.000.000. Tese de Doutorado, out. 1983.

BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M. 2014. The Brasiliano collage in South America: A review. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 3.

BRITO NEVES, B. B.; DA SILVA FILHO, A. F. 2019. The Pernambuco-Alagoas superterrane of the Borborema province: An essay for geotectonic regionalization. *Geologia USP - Serie Científica*, v. 19, n. 2.

CALAZANS, A. T. S.; MARIANO A. M.; PALDÊS, R. A. 2015. A systematic review of the literature on functional software size metrics using metaanalytic approach. **ADMPG**, scielo, v. 55, p. 335 – 342, 09. ISSN 1983-6791.

CASTRO, K. C. P. L. e CUNHA, L. S. 2021. Forensic investigations with the identification of human remains with ground penetrating radar (gpr): A review. **Estudos Geológicos**, v. 31, p64-86, 02. [10.18190/1980-8208/estudos-geologicos](https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudos-geologicos).

CHRISTIANSEN, A. V. e AUKEN, E. 2012. A global measure for depth of investigation. **GEOPHYSICS**, v. 77, n. 4, p. WB171–WB177. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0393.1>.

COSTA, W. D. e SILVA, A. D. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. In: *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 2. ed. Fortaleza: CPRM, 1997.

COSTABEL, S.; SIEMON, B.; HOUBEN, G.; GUNTHER, T. 2017. Geophysical investigation of a freshwater lens on the island of Langeoog, Germany – insights from combined hem, tem and mrs data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 136, p. 231–245. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116304980>.

CORIOLOANO, A. C. F. 2002. Reavaliação de Critérios Estruturais na Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos, com Ênfase na Neotectônica e Sensoriamento Remoto. Tese de

Doutorado, número 02 / PPGG. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COOPER, G.R.J. e COWAN, D.R. 2004. Filtering using variable order vertical derivatives: *Computers & Geosciences*, 30, 455–459.

COUTO JUNIOR, M. A. 2021. Gold deposits investigation in Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil, by the analysis of HTEM data. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.14.2021.tde-10082021-111900>

COLLINSON, D. W. *Methods in rock magnetism and palaeomagnetism: techniques and instrumentation*. Netherlands: Springer, 1983.

SIAGAS. 2011. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

DELSMAN, J. R.; BAAREN, E. S. VAN; SIEMON, B.; DABEKAUSSEN, W.; KARAOULIS, M. C.; PAUW, P. S.; VERMAAS, T.; BOOTSMA, H.; LOUW, P. G. B.; GUNNINK, J. L.; DUBELAAR, C. W.; MENKOVIC, A.; STEUER, A.; MEYER, U.; REVIL, A.; ESSINK, G. H. P. O. 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in zeeland, the netherlands. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 13, n. 8, p. 084011. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aad19e>.

DENTITH, M. e MUDGE, S. T. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Victoria: Cambridge University Press, v. 50 p. 85-349.

DANTAS, E. L.; HACKSPACHER, P. C.; VAN SCHMUS, W. R. 1998. ARCHEAN ACCRETION IN THE SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE MASSIF, BORBOREMA PROVINCE, NORTHEAST BRAZIL. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 2.

DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACHER, P. C. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: Remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, v. 130, n. 1–4, p. 1–25, 2004.

DRAGONE, G. N. 2018. A litosfera das Bacias do Chaco-Paraná e Paraná integrando gravimetria e sondagens magnetotéluricas: Novos vínculos à tectônica do Gondwana Sul-Occidental. <https://doi.org/10.11606/T.14.2019.tde-28012019-215255>

ELLIS R.G. 1998. Inversion of airborne electromagnetic data, *Exploration Geophysics*, 29:1-2, 121-127, DOI: 10.1071/EG998121

ELLIS, R.G., DE WET, B., ; MACLEOD, I. N. 2012. Inversion of Magnetic Data from Remanet and Induced Sources. *ASEG Extended Abstract*, v. 1, p. 1-4.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; DEMETRIO, J. G. A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM.

FLINCHUM, B.; PEETERS, L.; MUNDAY, T.; CAHILL, K. 2021. Improving the hydrogeologic conceptualization of a remote semiarid palaeovalley groundwater system using airborne electromagnetics, seismic refraction and reflection, and downhole nuclear

magnetic resonance. **Geophysics**, v. 86, n. 5, p. WB149– WB168, 09. ISSN 0016-8033. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0614.1>.

FRASER, D. C. 1978. Resistivity mapping with an airborne multicoil electromagnetic system. **Geophysics**, v. 43, n. 1.

GABRIEL, G.; KIRSCH, R.; SIEMON, B.; WIEDERHOLD, H. 2003. Geophysical investigation of buried pleistocene subglacial valleys in northern germany. **Journal of Applied Geophysics**, v. 53, n. 4, p. 159–180. ISSN 0926-9851. Geophysical Investigations of Buried Quaternary Valleys in the Formerly Glaciated NW European Lowland: Significance for Groundwater Exploration. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985103000594>.

GALVÃO T.F., P. T. e HARRAD, D. 2015. Principais itens para relatar revisões sistemáticas e metaanálises: A recomendação prisma. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, scielo, v. 24, p. 335 – 342, 06. ISSN 1679.

GALVÃO NETO, A. R. T.; PAULA, T. L. F. de; GALVÃO, M. J. d. T. G.; MONTEIRO, A.B.; DINIZ, J.A.O. 2022. Mapa hidrogeológico do estado do Rio Grande do Norte. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

GRANT, F. S. 1985. Aeromagnetism, geology and ore environments, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: An overview. **Geoexploration**, v. 23, n. 3, p. 303–333.

GUNNINK, J. L.; BOSCH, J. H. A.; SIEMON, B.; ROTH, B.; AUKEN, E. 2012. Combining ground-based and airborne electromagnetic data through artificial neural networks for modelling glacial till under saline groundwater conditions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 8, p. 3061–3074. <https://hess.copernicus.org/articles/16/3061/2012/>.

HASUI, Y. 2010. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 141–147.

HINZE, W. J. e LANGEL, R. A. The magnetic field of the Earth's lithosphere: the satellite perspective. England: Cambridge University Press, 1998.

HINZE, W. J.; VON FRESE, R. R. B.; SAAD, A. H. Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications. England: Cambridge University Press, p. 213–411, 2013.

ISLES, D. J. e RANKIN, L. R. 2013. Geological interpretation of aeromagnetic data. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists.

JORGENSEN, F.; LYKKE-ANDERSEN, H.; SANDERSEN, P. B.; AUKEN, E.; NORMARK, E. 2003. Geophysical investigations of buried quaternary valleys in denmark: an integrated application of transient electromagnetic soundings, reflection seismic surveys and exploratory drillings. **Journal of Applied Geophysics**, v. 53, n. 4, p. 215–28. ISSN 0926-9851. Geophysical Investigations of Buried Quaternary Valleys in

the Formerly Glaciated NW European Lowland: Significance for **Groundwater Exploration**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985103000624>.

JORGENSEN, F.; SCHEER, W.; THOMSEN, S.; SONNENBORG, T. O.; HINSBY, K.; WIEDERHOLD, H.; SCHAMPER, C.; BURSCHIL, T.; ROTH, B.; KIRSCH, R.; AUKEN, E. 2012. Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 7, p. 1845–1862. <https://hess.copernicus.org/articles/16/1845/2012/>.

KELLER, G. V. 1988. 2. Rock and Mineral Properties. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*.

KIRKEGAARD, C.; SONNENBORG, T. O.; AUKEN, E.; JORGENSEN, F. 2011. Salinity Distribution in Heterogeneous Coastal Aquifers Mapped by Airborne Electromagnetics. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 1, p. 125–135, 02 2011. ISSN 1539-1663. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0038>.

KNIGHT, R.; SMITH, R.; ASCH, T.; ABRAHAM, J.; CANNIA, J.; VIEZZOLI, A.; FOGG, G. 2018. Mapping aquifer systems with airborne electromagnetics in the central valley of california. **Groundwater**, v. 56, n. 6, p. 893–908. <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gwat.12656>.

KORUS, J. 2018. Combining hydraulic head analysis with airborne electromagnetics to detect and map impermeable aquifer boundaries. **Water**, v. 10, n. 8. ISSN 2073-4441. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/975>.

KRETSCHMER, H. 2004. Author productivity and geodesic distance in bibliographic co-authorship networks, and visibility on the web. p. 409–420.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A e CPRM. 2001. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Eletromagnetométricos e Seleção das Anomalia Eletromagnetométricas. p. 1–81.

LEGAULT, J. M. 2015. Airborne electromagnetic systems—state of the art and future directions. *CSEG Recorder*, v. 40, n. 6, p. 38-49.

LILLEY, F. E. M. 1982. Geomagnetic field fluctuations over Australia in relation to magnetic surveys. *Exploration Geophysics*, v. 13, n. 3.

LIMA, M. G. 2002. Mapeamento geológico-estrutural na região de Serrinha (RN), para apoio à interpretação de dados aerogeofísicos na pesquisa hidrogeológica. Relatório de Graduação, UFRN/CCET/DG, p. 1–81.

CAXITO, F. e LIRA SANTOS, L. C. M. 2021. Accretionary models for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province: Advances and open questions. *Brazilian Journal of Geology*, v. 51, n. 2.

MANOEL FILHO, J., 1996, Modelo de dimensão Fractal para Avaliação de Parâmetros Hidráulicos em Meio Fissural. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 197 p.

MINSLEY, B. J.; FOKS, N. L.; BEDROSIAN, P. A. 2021. Quantifying model structural uncertainty using airborne electromagnetic data. **Geophysical Journal International**, v. 224, n. 1, p. 590–607, 08. ISSN 0956-540X. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa393>.

NABIGHIAN, M. N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, n. 3.

NABIGHIAN, M. N. 1974. ADDITIONAL COMMENTS ON THE ANALYTIC SIGNAL OF TWO-DIMENSIONAL MAGNETIC BODIES WITH POLYGONAL CROSS-SECTION. *GEOPHYSICS*, v. 39, n. 1.

NABIGHIAN, M. N. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, v. 70, n. 6.

NASCIMENTO DA SILVA, C. C. 2001. Integração de dados estruturais, de sensores remotos e de geofísica na prospecção hidrogeológica em terrenos cristalinos: estudo de casos no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL PERF. POÇOS, 12; SIMPÓSIO HIDROGEOL. NORDESTE, 4, Olinda, 2001. p. 445-454.

NASCIMENTO DA SILVA C. S. 2004. Caracterização Geológica-Geofísica Do Meio Aquífero Fissural: Uma Contribuição Aos Modelos De Fluxo e Armazenamento de Água Subterrânea. Tese de Doutorado.

NASCIMENTO DA SILVA, C. C.; MEDEIROS, W. E. de; JARDIM DE SÁ, E. F.; LIMA, M. da G. 2023. O aquífero fissural no semiárido: análise de modelos com base em dados geológico-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestre. *Águas Subterrâneas*, v. 37, e–30197. <https://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30197>

NERI, L. B.; BARROS. L.; FONTENELE, D. 2021. Evolution of research in infrasound technology using consolidated meta-analytic approach theory. **Modern Sciences Journal**, v. 31.

NEVES, M. A. 2005. Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiáí. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 200 p. e apêndices

OLDENBORGER, G. A.; PUGIN, A. J.-M.; PULLAN, S. E. 2013. Airborne time-domain electromagnetics, electrical resistivity and seismic reflection for regional three-dimensional mapping and characterization of the spiritwood valley aquifer, manitoba, canada. **Near Surface Geophysics**, v. 11, n. 1, p. 63–74. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.3997/1873-0604.2012023>.

OLDENBORGER, G.; LOGAN, C.; HINTON, M.; PUGIN, A.-M.; SAPIA, V.; SHARPE, D.; RUSSELL, H. 2016. Bedrock mapping of buried valley networks using seismic reflection and airborne electromagnetic data. **Journal of Applied Geophysics**,

v. 128, p. 191–201. ISSN 0926-9851.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116300581>.

PORRITT, K.; GOMERSALL, J.; LOCKWOOD, C. 2014. Jbi's systematic reviews: Study selection and critical appraisal. **The American Journal of Nursing**, v. 114, n. 6, p. 47–52. <http://dx.doi.org/10.1097/01.NAJ.0000450430.97383.64>.

QUEIROZ, M. C. S. de. 2021. Modelagem geofísica: uma contribuição para a hidrogeofísica aplicada em ambiente cristalino fraturado no ne brasileiro. 2021. 143 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

REEVES, C. Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation. Washington (DC): Geosoft, 2005.

REID, A. B.; ALLSOP, J. M.; GRANSER, H.; MILLET, A. T.; SOMERTON, I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. **GEOPHYSICS**, v. 55, n. 1. p. 80-91.

REYNOLDS, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. 1st. ed. New Jersey: Wiley–Blackwell, p. 83-123, 1997.

REYNOLDS J. M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics . 2nd. ed. New Jersey: Wiley-BlackWell, p. 431-441, 2011.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **GEOPHYSICS**, v. 57, n. 1.

ROIG, H. L. e DANTAS, E. L. 2013. Carta geológica: folha são José do campestre - sb.25-y-a-i. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

RUTHERFORD, J.; IBRAHIMI, T.; MUNDAY, T.; MARKEY, A.; VIEZZOLI, A.; RAPITI, A.; PATERSON, R. 2021. An Assessment of Water Sources for Heritage Listed Organic Mound Springs in NW Australia Using Airborne Geophysical (Electromagnetics and Magnetics) and Satellite Remote Sensing Methods. **Remote Sens.** 13, 1288. <https://doi.org/10.3390/rs13071288>

SENGPIEL, K. e SIEMON, B. 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. **GEOPHYSICS**, v. 65, n. 6, p. 1983–1992. <https://doi.org/10.1190/1.1444882>.

SIEMON, B. 2001. Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 46, n. 1, p. 65–76. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985100000409>.

SIEMON, B.; CHRISTIANSEN, A. V.; AUKEN, E. 2009. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. **Near Surface Geophysics**, v. 7, n. 5-6, p. 629–646. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.3997/1873-0604.2009043>.

SIEMON, B.; STEUER, A.; ULLMANN, A.; VASTERLING, M.; VOS, W. 2011. Application of frequency domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater

exploration in urban areas. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 36, n. 16, p. 1373–1385. ISSN 1474-7065. **Urban Geophysics**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706511000398>.

SIEMON, B.; BAAREN, E. VAN; DABEKAUSSEN, W.; DELSMAN, J.; DUBELAAR, W.; KARAOULIS, M.; STEUER, A. 2019. Automatic identification of fresh–saline groundwater interfaces from airborne electromagnetic data in zeeland, the netherlands. **Near Surface Geophysics**, v. 17, n. 1, p. 3–25. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nsg.12028>.

SILVA, J.A. da. 2000. Estruturas de acumulação de água em rochas cristalinas: Estudo geofísico e geológico de casos no estado do Rio Grande do Norte. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 92 p.

SIQUEIRA, L., 1967. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Rev. Água Subterrânea, Recife*, v. 2, p. 1-29.

SOUZA FILHO, O. A. de; RIBEIRO, J. A.; VERÍSSIMO, L. S.; OLIVEIRA, R. G. de; GOMES, F. E. M.; BRANDÃO, R. de L.; FRIZZO, S. J.; OLIVEIRA, J. F. de, 2002, Projeto Otimização de Metodologias para Prospecção de Águas Subterrâneas em Rochas Cristalinas. Relatório Integrado De Atividades 1999 – 2002 - Bases para avaliação do projeto. CPRM/REFO. Fortaleza. 160 p. il. Anexos.

SOUZA FILHO, O.A. 2008. Dados aerogeofísicos e geológicos aplicados à seleção de áreas favoráveis para água subterrânea no domínio cristalino do Ceará, Brasil. Tese de Doutorado, N. 400, Universidade de Campinas, São Paulo.

SORENSEN, K. I. e AUKEN, E. 2004. Skytem – a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, Taylor Francis, v. 35, n. 3, p. 194–202. <https://doi.org/10.1071/EG04194>.

STEINMETZ, D.; WINSEMANN, J.; BRANDES, C.; SIEMON, B.; ULLMANN, A.; WIEDERHOLD, H.; MEYER, U. 2015. Towards an improved geological interpretation of airborne electromagnetic data: a case study from the cuxhaven tunnel valley and its neogene host sediments (northwest germany). **Netherlands Journal of Geosciences**, Cambridge University Press, v. 94, n. 2, p. 201–227.

STEUER, A.; SIEMON, B.; AUKEN, E. 2009. A comparison of helicopter-borne electromagnetics in frequency and time-domain at the cuxhaven valley in northern germany. **Journal of Applied Geophysics**, v. 67, n. 3, p. 194–205. ISSN 0926-9851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985107000717>.

TEATINI, P.; TOSI, L.; VIEZZOLI, A.; BARADELLO, L.; ZECCHIN, M.; SILVESTRI, S. 2011. Understanding the hydrogeology of the venice lagoon subsurface with airborne electromagnetics. **Journal of Hydrology**, v. 411, n. 3, p. 342–354. ISSN 0022-1694. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411007281>.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Telford – Applied Geophysics Book England Cambridge University Press, p. 62-134. 1990.

- TIKHONOV, A. N.; ARSEININ V. Y. Solutions of ill-posed problems. Washington, D.C.: John Wiley & Sons, New York: V. H. Winston & Sons. 1977.
- VAN SCHMUS, W. R.; OLIVEIRA, E. P.; DA SILVA FILHO, A. F. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African fold belt. Geological Society Special Publication, v. 294.
- VIEZZOLI, A.; CHRISTIANSEN, A. V.; AUKEN, E.; SoRENSEN, K. 2008. Quasi-3D modeling of airborne tem data by spatially constrained inversion. **GEOPHYSICS**, v. 73, n. 3, p. F105–F113. <https://doi.org/10.1190/1.2895521>.
- VIEZZOLI, A.; TOSI, L.; TEATINI, P.; SILVESTRI, S. 2010. Surface water–groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The venice lagoon example. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 1. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009GL041572>.
- VON HUELSEN, M. G. 2007. Interpretação de dados de Eletromagnetometria aerotransportada (AEM) do sistema Geotem (Domínio do Tempo). Universidade de Brasília - UnB, Distrito Federal, Brasília.: Tese de Doutorado.
- WARD, S. H. e HOHMANN, G. W. 4. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: SEG - Society Exploration Geophysicist, 1988.
- ZHANG, C.; MUSHAYANDEBVU, M. F.; REID, A. B.; FAIRHEAD, J. D.; ODEGARD, M. E. 2000. Euler deconvolution of gravity tensor gradient data. **GEOPHYSICS**, v. 65, n. 2. p. 512-520.
- ZUPIC, I. e CATER, T. 2015. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.



Advancements in Applied Geophysics Research for AEM Surveys with a focus on Groundwater prospecting: A Review

1 **Costa G.L.¹ and Von Huelsen M.G.²**

2 ¹ Seismological Observatory of University of Brasilia, University of Brasilia, Brasilia, Brazil.

3 **Correspondence:** glgeo.costa@gmail.com; monisis@unb.br

4 **Keywords:** Airborne Electromagnetics (AEM), Groundwater, Hydrogeology,
5 Hydrogeophysical investigations, Aquifers and aquifer Systems.

6

7 **Abstract**

8 Research in the field of applied geophysics, specifically airborne electromagnetic (AEM) surveys, with
9 a focus on groundwater prospecting, has contributed to the advancement of non-destructive techniques
10 for exploring underground water resources. This research provides valuable information for the
11 sustainable management of aquifers and proper water supply planning. These studies play a crucial
12 role in ensuring the availability of drinking water, a vital resource for society. One example of this
13 scenario is the Brazilian Northeast semi-arid region, which is recognized as an area with seasonal
14 droughts that exacerbate various existing problems such as limited access to clean water for drinking
15 and sanitation. Lack of clean water for personal hygiene, leading to poor health and increased
16 vulnerability to diseases. Reduced agricultural productivity, impact on industries dependent on water,
17 and increased costs for accessing alternative water sources such as drilling deeper wells, as well as
18 scarcity of surface water resources. Due to these environmental concerns, the need for groundwater
19 extraction arose. The question posed here was how AEM surveys can assist in protecting underground
20 water resources, making decisions for aquifer management, and where research in this field is heading.
21 The search terms “Airborne Electromagnetics” and “Groundwater” were defined as the search strings,
22 using the Web of Science as the database. Data collection revealed a significant increase in the number
23 of citations on this topic in the last 20 years, reaching a milestone of 259 articles.

24

25

26



Study of Electromagnetic Data Applied to Hydrogeology, in the region of Serrinha RN

Gustavo Lopes Costa (Obsis / IG - UnB); Mônica Giannoccaro Von Huelsen (Obsis / IG - UnB); Marcos César Soares de Queiroz (Obsis / IG - UnB) & Ana Luiza Chaves (Obsis / IG - UnB) – Observatório Sismológico (Obsis), Instituto de Geociência (IG), Universidade de Brasília (UNB) - gustavolpcosta@gmail.com; monisis@unb.br; marcosoaresgeof@gmail.com; luizaanac@gmail.com

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 August 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The long and intense droughts that occur in the Northeast of Brazil aggravates socio-economic problems in the region. The lack of water affects not only the local subsistence but the large-scale plantation economy. The difficulty in exploiting water resources brought the necessity to find an arbitrary way to obtain it, such as underground water wells. The PROASNE-Brasil project aims to improve living conditions in the northeastern region of Brazil, by providing sustainable solutions to the problems caused by drought. Among the technologies that offer better perspectives, aerial geophysics stands out. More specifically, electromagnetic methods in the frequency domain, which can potentially be a valuable tool for mapping the distribution of groundwater resources in crystalline basement environments. That extends across approximately 80% of the millions of square kilometres in northeastern Brazil that are affected by drought.

Introduction

The aim of the Groundwater Project in the Northeast (PROASNE-Brazil), developed jointly with specialists from different areas and technical institutions such as the Geological Survey of Brazil (CPRM) and the Geological Survey of Canada (GSC), endeavoured to develop sustainable solutions for the needs caused by drought. Among several technologies, aerial geophysics offered a better perspective of the case, accurately the electromagnetic methods in the frequency domain, a tool of great potential in the study and mapping of the distribution of underground water resources in environments of a crystalline basement that make up the majority of northeast Brazil affected by drought.

As part of this project, where electro magnetometry data were acquired, the Serrinha region, which is located in the Serrinha county, Rio Grande do Norte, delimited by the coordinates UTM: 209000E - 222000E / 9305000N - 9313000N and is limited geographically by São José do Campestre, Lagoa de Pedras, Santo Antônio and Lagoa Salgada, the survey area is 104 km² (PROASNE) and it is located in the southeastern portion of RN.

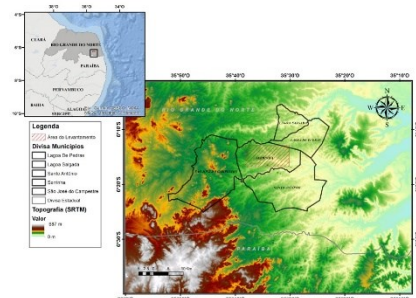


Figure 1: Location and topography map of the study area, Serrinha / RN.

The rainfall is irregular over the year, presenting seven dry months, June to December (Nimer et al., 1979), and the average annual rainfall in Custodia is 708.8 mm (Morais et al., 1999). There are no surpluses in the water reserves of the soil during March, April, and May, because those are used. The average annual temperature is 23.5°C.

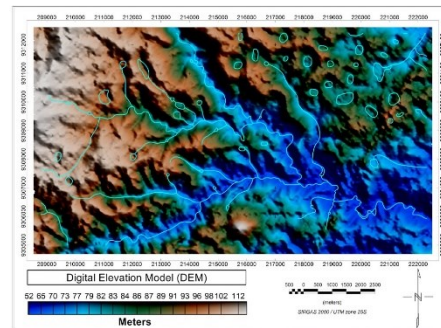


Figure 2: Digital elevation and hydrography model of the survey area

ANEXO B – PROCESSOS COMPUTACIONAIS DE INVERSÃO

INVERSÃO VOXI 3D – SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

Susceptibility_serrinha_z300.geosoft_voxi

Profundidade de investigação e redução da malha em -200 m

IRI focus = 2 positivo

```
[15-Feb-2024 01:02:22] Job 90175632 created
[15-Feb-2024 01:03:02] Initializing job resources
[15-Feb-2024 01:03:03] Assigning resources, which may take up to 20 minutes
[15-Feb-2024 01:03:26] Lost connection to the service, attempting to
reconnect...
[15-Feb-2024 01:08:30] Parameters ...
[15-Feb-2024 01:08:30] nx      ny      nz      nx*ny*nz  ndata      nproc      mtype
dtype
[15-Feb-2024 01:08:30] 290    169    19     931190    44080     96         Susc
Mag
[15-Feb-2024 01:08:30] Looking for system matrix cache ...
[15-Feb-2024 01:08:30] Building the system matrix ...
[15-Feb-2024 01:11:01] Storing system matrix ...
[15-Feb-2024 01:11:01] System matrix ready ...
[15-Feb-2024 01:11:01] Solving the matrix system ...
[15-Feb-2024 01:11:01]      Iter  RegScal      DataFit      ModelNorm      Time
[15-Feb-2024 01:11:01]          0  4.0009e+02  4.0009e+02  0.0000e+00  0.00
[15-Feb-2024 01:11:01]          1  1.4011e+06  2.1064e+01  7.9403e-02  18.11
[15-Feb-2024 01:12:30]          2  1.7514e+05  9.7678e+00  2.0430e-01  86.88
[15-Feb-2024 01:14:01]          3  4.3785e+04  5.9143e+00  4.2558e-01  181.46
[15-Feb-2024 01:17:00]          4  1.0946e+04  3.5771e+00  9.7599e-01  358.50
[15-Feb-2024 01:22:00]          5  2.7366e+03  2.1373e+00  2.4291e+00  677.20
[15-Feb-2024 01:29:01]          6  6.8415e+02  1.2726e+00  6.1309e+00  1077.57
[15-Feb-2024 01:36:00]          7  4.8377e+02  1.1191e+00  7.6774e+00  1503.53
[15-Feb-2024 01:40:01]          8  4.0680e+02  1.0497e+00  8.5777e+00  1727.95
[15-Feb-2024 01:40:01] Updating the IterReWeighting ...
[15-Feb-2024 01:40:30]          9  4.0680e+02  8.8555e+00  7.7856e+00  1757.79
[15-Feb-2024 01:41:31]         10  1.0170e+02  4.6745e+00  2.3901e+01  1834.32
[15-Feb-2024 01:44:01]         11  2.5425e+01  2.5004e+00  5.7036e+01  1989.04
[15-Feb-2024 01:49:00]         12  6.3562e+00  1.4593e+00  1.1587e+02  2265.09
[15-Feb-2024 01:55:00]         13  3.1781e+00  1.1668e+00  1.6185e+02  2634.06
[15-Feb-2024 02:01:01]         14  2.6725e+00  1.1079e+00  1.7598e+02  3007.83
[15-Feb-2024 02:08:00]         15  2.2473e+00  1.0533e+00  1.9142e+02  3420.15
[15-Feb-2024 02:13:30]         16  1.8897e+00  1.0026e+00  2.0834e+02  3736.73
[15-Feb-2024 02:13:30] Updating the IterReWeighting ...
[15-Feb-2024 02:16:12]         17  1.8897e+00  1.6969e+00  1.4072e+02  3898.94
[15-Feb-2024 02:21:00]         18  9.4486e-01  1.3242e+00  1.6649e+02  4180.85
[15-Feb-2024 02:26:06]         19  6.6811e-01  1.1815e+00  1.8103e+02  4497.04
[15-Feb-2024 02:33:00]         20  5.6181e-01  1.1184e+00  1.8896e+02  4913.04
[15-Feb-2024 02:39:30]         21  4.7243e-01  1.0599e+00  1.9742e+02  5281.03
[15-Feb-2024 02:47:30]         22  3.9726e-01  1.0056e+00  2.0647e+02  5772.98
[15-Feb-2024 02:47:30]
*****
[15-Feb-2024 02:47:30] INVERSION STATUS: SUCCESS
[15-Feb-2024 02:47:30]
*****
[15-Feb-2024 02:48:43] Job 90175632 closed
```

INVERSÃO VOXI 3D – GRADIENTE MAGNÉTICO

Susceptibility_serrinha_z300.geosoft_voxi

Profundidade de investigação e redução da malha em -200 m

IRI focus = 2 positivo

EW = 1

NS = 1

Vertical = 1

```
[24-Oct-2023 13:36:35] Job 89933219 created
[24-Oct-2023 13:36:59] Initializing job resources
[24-Oct-2023 13:37:00] Assigning resources, which may take up to 20 minutes
[24-Oct-2023 13:40:30] Parameters ...
[24-Oct-2023 13:40:30] nx      ny      nz      nx*ny*nz  ndata      nproc      mtype
dtype
[24-Oct-2023 13:40:30] 290    169    19     931190    44080     128       VMag
Mag
[24-Oct-2023 13:40:30] Looking for system matrix cache ...
[24-Oct-2023 13:40:30] Building the system matrix ...
[24-Oct-2023 13:44:01] Storing system matrix ...
[24-Oct-2023 13:44:01] System matrix ready ...
[24-Oct-2023 13:44:01] Solving the matrix system ...
[24-Oct-2023 13:44:01]      Iter  RegScal      DataFit      ModelNorm      Time
[24-Oct-2023 13:44:01]          0      1.6060e+03  4.0009e+02  0.0000e+00  0.00
[24-Oct-2023 13:44:30]          1  1.3829e+06  1.4752e+01  2.7976e-02  26.65
[24-Oct-2023 13:45:30]          2  1.7286e+05  6.7549e+00  8.1643e-02  95.30
[24-Oct-2023 13:48:01]          3  4.3215e+04  3.9565e+00  1.8161e-01  230.37
[24-Oct-2023 13:51:02]          4  1.0804e+04  2.2689e+00  4.3337e-01  413.09
[24-Oct-2023 13:56:30]          5  2.7009e+03  1.2751e+00  1.0487e+00  741.48
[24-Oct-2023 14:02:30]          6  1.9098e+03  1.1027e+00  1.3011e+00  1113.93
[24-Oct-2023 14:06:02]          7  1.6060e+03  1.0256e+00  1.4473e+00  1315.90
[24-Oct-2023 14:06:02] Updating the IterReWeighting ...
[24-Oct-2023 14:07:00]          8  1.6060e+03  6.2031e+00  1.2962e+00  1354.69
[24-Oct-2023 14:08:30]          9  4.0149e+02  3.1722e+00  3.1742e+00  1444.35
[24-Oct-2023 14:11:30]         10  1.0037e+02  1.6885e+00  7.0441e+00  1626.96
[24-Oct-2023 14:16:00]         11  5.0187e+01  1.2578e+00  1.0309e+01  1910.14
[24-Oct-2023 14:19:30]         12  3.5487e+01  1.0916e+00  1.2496e+01  2117.38
[24-Oct-2023 14:26:30]         13  2.9841e+01  1.0183e+00  1.3773e+01  2529.47
[24-Oct-2023 14:26:30] Updating the IterReWeighting ...
[24-Oct-2023 14:28:02]         14  2.9841e+01  2.5147e+00  2.6602e+01  2635.11
[24-Oct-2023 14:34:02]         15  7.4603e+00  1.3770e+00  5.1150e+01  2987.36
[24-Oct-2023 14:41:30]         16  5.2752e+00  1.1960e+00  6.0508e+01  3425.74
[24-Oct-2023 14:50:00]         17  3.7302e+00  1.0425e+00  7.2033e+01  3947.51
[24-Oct-2023 14:50:00]
*****
[24-Oct-2023 14:50:00] INVERSION STATUS: SUCCESS
[24-Oct-2023 14:50:00]
*****
[24-Oct-2023 14:52:27] Job 89933219 closed
```

INVERSÃO 3D - FDEM

Cond_Modelo3C_CDIS_peso 0001_01

Parameter weigh = 0.001

EW=0.1

NS=0.1

vertical =0.5

IRIS focus 3. Ambas as propriedades positivas e negativas

```
[25-Jan-2023 17:24:35] An error occurred while uploading a file, retrying...
[25-Jan-2023 17:24:30] Job 4890e726 created
[25-Jan-2023 17:25:08] Initializing job resources
[25-Jan-2023 17:25:09] Assigning resources, which may take up to 20 minutes
[25-Jan-2023 17:31:33] PARASOL V4.0 180511
[25-Jan-2023 17:31:33] (C) Copyright 2014 Geosoft Inc.
[25-Jan-2023 17:31:33] All Rights Reserved
[25-Jan-2023 17:31:33] *****
[25-Jan-2023 17:31:33] *
[25-Jan-2023 17:31:33] *          GEOSOFTE VOXI v180511          *
[25-Jan-2023 17:31:33] *
[25-Jan-2023 17:31:33] *****
[25-Jan-2023 17:31:33] PARASOL V4.0 180511 started on 01/25/2023 20:31:25.68
[25-Jan-2023 17:31:33] Executing rank 0 on a72b3069100000S: NumProc = 64
[25-Jan-2023 17:32:02] Preparing the model ...
[25-Jan-2023 17:32:31] Parameters ...
[25-Jan-2023 17:32:31] nx  ny  nz  nx*ny*nz  ndata  nproc  dtype  mtype
ver
[25-Jan-2023 17:32:31] 281 160  84  3776640 138648  64      EM   Cond
180511
[25-Jan-2023 17:32:31] Processor          1      2      3      4      5
6      7      8      9     10     11     12     13     14     15     16     17
18     19     20     21     22     23     24     25     26     27     28
29     30     31     32     33     34     35     36     37     38     39
40     41     42     43     44     45     46     47     48     49     50
51     52     53     54     55     56     57     58     59     60     61
62     63     64
[25-Jan-2023 17:32:31] Data/Processor    138648 138648 138648 138648 138648
138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648
138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648
138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648 138648
138648 138648 138648 138648
[25-Jan-2023 17:32:31] Sources/Processor  28919 38489 28288 37169 27500
36141 35545 26395 34837 34353 33813 33165 24734 32833 32571 32672
32269 39889 31774 31095 30853 30969 31005 38216 30238 29634 36361
28932 36055 28757 36015 28952 36180 28910 36398 29241 36186 28784
35905 28445 34928 34291 34027 27036 33947 33873 33399 33517 33666
27010 34252 33920 33323 33490 33715 26459 32948 33128 32968 33210
33124 32616 32672 32105
[25-Jan-2023 17:32:31] Planes/Processor          3      4      3      4      3
4      4      3      4      4      4      4      3      4      4      4      4
5      4      4      4      4      4      5      4      4      5      4      5
4      5      4      5      4      5      4      5      4      5      4      5
5      5      4      5      5      5      5      5      4      5      5      5
5      5      4      5      5      5      5      5      5      5      5      5
[25-Jan-2023 17:32:31] Estimated Total Memory Requirement 34493.6 MB
[25-Jan-2023 17:32:31] Generate Cell Ordering ...
[25-Jan-2023 17:32:31] Initializing x and b ...
[25-Jan-2023 17:32:31] Creating Starting Model ...
[25-Jan-2023 17:32:31] Computing EM Sensitivities ...
[25-Jan-2023 17:39:31] Formatting output ...
[25-Jan-2023 17:39:31] Building the system matrix ...
[25-Jan-2023 17:41:31] System matrix ready ...
[25-Jan-2023 17:45:02] Compression factor 1.4742E+05
```

```

[25-Jan-2023 17:45:02] Storing System Matrix ...
[25-Jan-2023 17:45:31] Weighting Max 0.10000E+01
[25-Jan-2023 17:45:31] Weighting Min 0.10000E+01
[25-Jan-2023 17:45:31] Generating the Model Weighting ...
[25-Jan-2023 17:45:31] Building A ...
[25-Jan-2023 17:45:31] WARNING: For EM inversion, the parameter reference
model conductivity must be positive.
[25-Jan-2023 17:45:31] The minimum value is -0.14046E+02
[25-Jan-2023 17:45:31] Resetting the parameter reference model to 1.E-8
[25-Jan-2023 17:45:31] Generating the IterReWeighting ...
[25-Jan-2023 17:45:31] Initializing ...
[25-Jan-2023 17:45:31] Initializing Regularization Scale ...
[25-Jan-2023 17:45:31] Initial RegScale -1.00000E+32
[25-Jan-2023 17:45:31] Initial RegScale 1.00000E+00
[25-Jan-2023 17:47:31] Beginning Iteration 0
[25-Jan-2023 17:47:31]
Starting Model Statistics ...
[25-Jan-2023 17:47:31] PredD MSE 1.91641E+02
[25-Jan-2023 17:47:31] SModel Norm 1.24564E+10
[25-Jan-2023 17:47:31] EModel Norm 3.89535E+05
[25-Jan-2023 17:47:31] NModel Norm 3.72577E+05
[25-Jan-2023 17:47:31] ZModel Norm 6.57503E+08
[25-Jan-2023 17:47:31] Sum Norm 1.24737E+10
[25-Jan-2023 17:47:31] Model Norm 6.09358E+08
[25-Jan-2023 17:47:31] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 17:47:31] Solving the system ...
[25-Jan-2023 17:51:02] Beginning Iteration 1
[25-Jan-2023 17:51:02]
Tradeoff 1.00000E+00
[25-Jan-2023 17:51:02] PredD MSE 5.24991E+01
[25-Jan-2023 17:51:02] SModel Norm 5.41548E+05
[25-Jan-2023 17:51:02] EModel Norm 2.01109E+02
[25-Jan-2023 17:51:02] NModel Norm 2.07855E+02
[25-Jan-2023 17:51:02] ZModel Norm 1.18554E+04
[25-Jan-2023 17:51:02] Sum Norm 5.41677E+05
[25-Jan-2023 17:51:02] Model Norm 1.90672E+04
[25-Jan-2023 17:51:02] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 17:51:02] Solving the system ...
[25-Jan-2023 17:56:02] Beginning Iteration 2
[25-Jan-2023 17:56:02]
Tradeoff 6.25000E-02
[25-Jan-2023 17:56:02] PredD MSE 5.24365E+01
[25-Jan-2023 17:56:02] SModel Norm 1.65381E+07
[25-Jan-2023 17:56:02] EModel Norm 8.98595E+03
[25-Jan-2023 17:56:02] NModel Norm 1.23192E+04
[25-Jan-2023 17:56:02] ZModel Norm 1.43319E+05
[25-Jan-2023 17:56:02] Sum Norm 1.65387E+07
[25-Jan-2023 17:56:02] Model Norm 5.32731E+05
[25-Jan-2023 17:56:02] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 17:56:02] Solving the system ...
[25-Jan-2023 18:03:02] Beginning Iteration 3
[25-Jan-2023 18:03:02]
Tradeoff 3.90625E-03
[25-Jan-2023 18:03:02] PredD MSE 5.24269E+01
[25-Jan-2023 18:03:02] SModel Norm 2.77159E+07
[25-Jan-2023 18:03:02] EModel Norm 1.50867E+04
[25-Jan-2023 18:03:02] NModel Norm 1.89358E+04
[25-Jan-2023 18:03:02] ZModel Norm 2.07763E+05
[25-Jan-2023 18:03:02] Sum Norm 2.77167E+07
[25-Jan-2023 18:03:02] Model Norm 8.88713E+05
[25-Jan-2023 18:03:02] Terminated: Plateauing.
[25-Jan-2023 18:03:02] Updating the IterReWeighting ...
[25-Jan-2023 18:03:31] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 18:03:31] Solving the system ...
[25-Jan-2023 18:10:01] Beginning Iteration 4
[25-Jan-2023 18:10:01]
Tradeoff 3.90625E-03
[25-Jan-2023 18:10:01] PredD MSE 5.24269E+01

```

```

[25-Jan-2023 18:10:01] SModel Norm 2.74933E+07
[25-Jan-2023 18:10:01] EModel Norm 1.49448E+04
[25-Jan-2023 18:10:01] NModel Norm 2.03123E+04
[25-Jan-2023 18:10:01] ZModel Norm 2.04892E+05
[25-Jan-2023 18:10:01] Sum Norm 2.74941E+07
[25-Jan-2023 18:10:01] Model Norm 8.81439E+05
[25-Jan-2023 18:10:01] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 18:10:01] Solving the system ...
[25-Jan-2023 18:17:35] Beginning Iteration 5
[25-Jan-2023 18:17:35]
-----
[25-Jan-2023 18:17:35] Tradeoff 2.44141E-04
[25-Jan-2023 18:17:35] PredD MSE 5.24248E+01
[25-Jan-2023 18:17:35] SModel Norm 3.45142E+07
[25-Jan-2023 18:17:35] EModel Norm 1.81355E+04
[25-Jan-2023 18:17:35] NModel Norm 2.18026E+04
[25-Jan-2023 18:17:35] ZModel Norm 2.24025E+05
[25-Jan-2023 18:17:35] Sum Norm 3.45150E+07
[25-Jan-2023 18:17:35] Model Norm 1.10291E+06
[25-Jan-2023 18:17:35] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 18:17:35] Solving the system ...
[25-Jan-2023 18:28:31] Beginning Iteration 6
[25-Jan-2023 18:28:31]
-----
[25-Jan-2023 18:28:31] Tradeoff 1.52588E-05
[25-Jan-2023 18:28:31] PredD MSE 5.24235E+01
[25-Jan-2023 18:28:31] SModel Norm 4.40209E+07
[25-Jan-2023 18:28:31] EModel Norm 2.10919E+04
[25-Jan-2023 18:28:31] NModel Norm 2.73058E+04
[25-Jan-2023 18:28:31] ZModel Norm 1.17164E+06
[25-Jan-2023 18:28:31] Sum Norm 4.40365E+07
[25-Jan-2023 18:28:31] Model Norm 1.61998E+06
[25-Jan-2023 18:28:31] Terminated: Plateauing.
[25-Jan-2023 18:28:31] Updating the IterReWeighting ...
[25-Jan-2023 18:28:31] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 18:28:31] Solving the system ...
[25-Jan-2023 18:39:15] Beginning Iteration 7
[25-Jan-2023 18:39:15]
-----
[25-Jan-2023 18:39:15] Tradeoff 1.52588E-05
[25-Jan-2023 18:39:15] PredD MSE 5.24235E+01
[25-Jan-2023 18:39:15] SModel Norm 4.33471E+07
[25-Jan-2023 18:39:15] EModel Norm 2.05433E+04
[25-Jan-2023 18:39:15] NModel Norm 2.67021E+04
[25-Jan-2023 18:39:15] ZModel Norm 1.01706E+06
[25-Jan-2023 18:39:15] Sum Norm 4.33590E+07
[25-Jan-2023 18:39:15] Model Norm 1.54800E+06
[25-Jan-2023 18:39:15] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 18:39:15] Solving the system ...
[25-Jan-2023 18:50:01] Beginning Iteration 8
[25-Jan-2023 18:50:01]
-----
[25-Jan-2023 18:50:01] Tradeoff 9.53674E-07
[25-Jan-2023 18:50:01] PredD MSE 5.24234E+01
[25-Jan-2023 18:50:01] SModel Norm 6.08857E+07
[25-Jan-2023 18:50:01] EModel Norm 2.98217E+04
[25-Jan-2023 18:50:01] NModel Norm 3.65440E+04
[25-Jan-2023 18:50:01] ZModel Norm 1.19572E+06
[25-Jan-2023 18:50:01] Sum Norm 6.08974E+07
[25-Jan-2023 18:50:01] Model Norm 2.10289E+06
[25-Jan-2023 18:50:01] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 18:50:01] Solving the system ...
[25-Jan-2023 19:01:01] Beginning Iteration 9
[25-Jan-2023 19:01:01]
-----
[25-Jan-2023 19:01:01] Tradeoff 5.96046E-08
[25-Jan-2023 19:01:01] PredD MSE 5.24234E+01
[25-Jan-2023 19:01:01] SModel Norm 6.18570E+07
[25-Jan-2023 19:01:01] EModel Norm 3.03960E+04
[25-Jan-2023 19:01:01] NModel Norm 3.75476E+04
[25-Jan-2023 19:01:01] ZModel Norm 1.19654E+06
[25-Jan-2023 19:01:01] Sum Norm 6.18686E+07
[25-Jan-2023 19:01:01] Model Norm 2.13129E+06

```

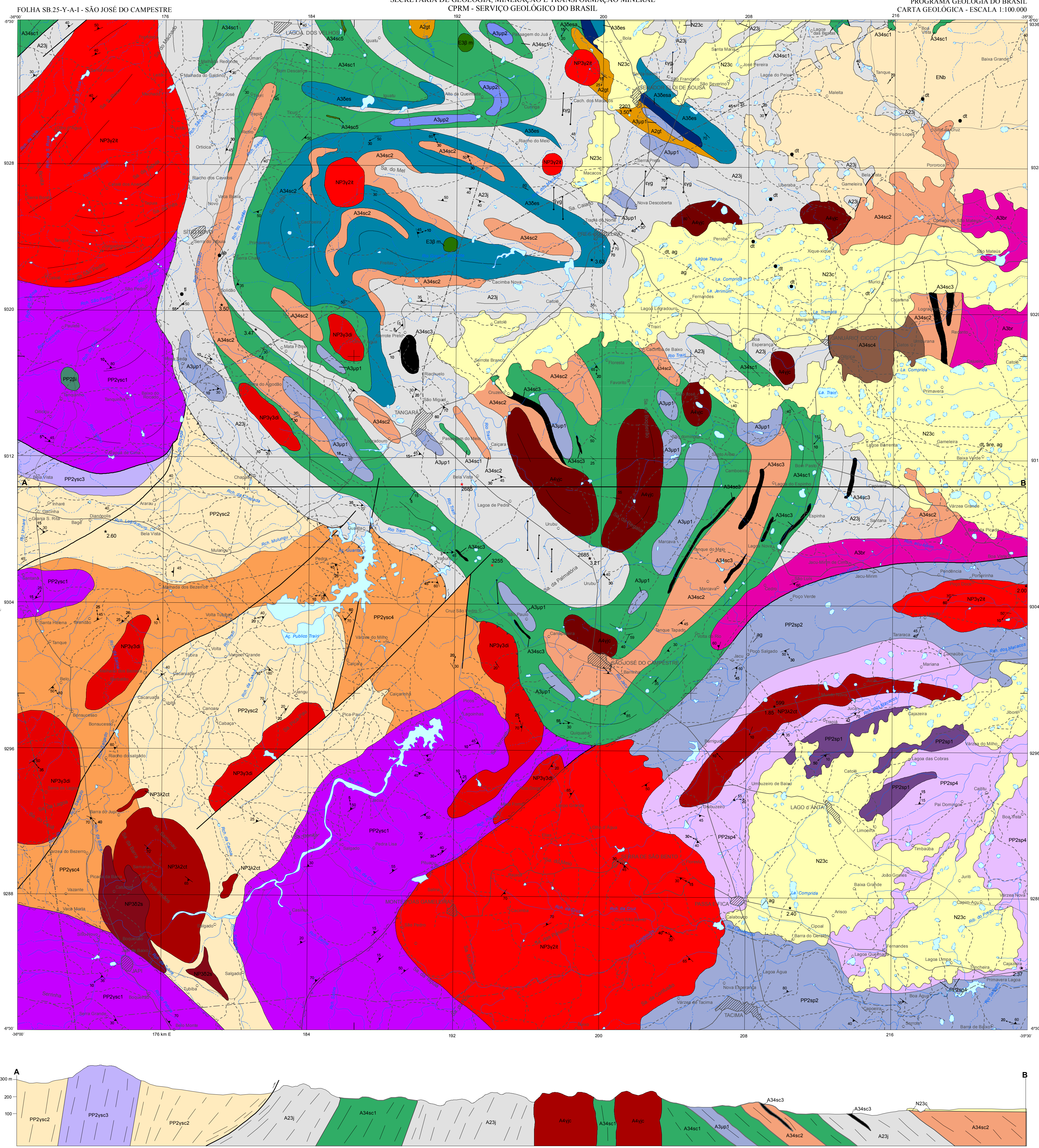


```

[25-Jan-2023 19:01:01] Terminated: Plateauing.
[25-Jan-2023 19:01:01] Updating the IterReWeighting ...
[25-Jan-2023 19:01:01] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 19:01:01] Solving the system ...
[25-Jan-2023 19:12:02] Beginning Iteration 10
[25-Jan-2023 19:12:02]
[25-Jan-2023 19:12:02] Tradeoff      5.96046E-08
[25-Jan-2023 19:12:02] PredD MSE    5.24233E+01
[25-Jan-2023 19:12:02] SModel Norm  6.27778E+07
[25-Jan-2023 19:12:02] EModel Norm  3.21729E+04
[25-Jan-2023 19:12:02] NModel Norm  3.67553E+04
[25-Jan-2023 19:12:02] ZModel Norm  1.19677E+06
[25-Jan-2023 19:12:02] Sum Norm     6.27892E+07
[25-Jan-2023 19:12:02] Model Norm   2.15811E+06
[25-Jan-2023 19:12:02] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 19:12:02] Solving the system ...
[25-Jan-2023 19:23:31] Beginning Iteration 11
[25-Jan-2023 19:23:31]
[25-Jan-2023 19:23:31] Tradeoff      3.72529E-09
[25-Jan-2023 19:23:31] PredD MSE    5.24234E+01
[25-Jan-2023 19:23:31] SModel Norm  6.14273E+07
[25-Jan-2023 19:23:31] EModel Norm  3.04888E+04
[25-Jan-2023 19:23:31] NModel Norm  3.70973E+04
[25-Jan-2023 19:23:31] ZModel Norm  1.19633E+06
[25-Jan-2023 19:23:31] Sum Norm     6.14390E+07
[25-Jan-2023 19:23:31] Model Norm   2.11876E+06
[25-Jan-2023 19:23:31] Building ADiag ...
[25-Jan-2023 19:23:31] Solving the system ...
[25-Jan-2023 19:35:02] Beginning Iteration 12
[25-Jan-2023 19:35:02]
[25-Jan-2023 19:35:02] Tradeoff      2.32831E-10
[25-Jan-2023 19:35:02] PredD MSE    5.24233E+01
[25-Jan-2023 19:35:02] SModel Norm  6.14006E+07
[25-Jan-2023 19:35:02] EModel Norm  3.04526E+04
[25-Jan-2023 19:35:02] NModel Norm  3.70854E+04
[25-Jan-2023 19:35:02] ZModel Norm  1.19653E+06
[25-Jan-2023 19:35:02] Sum Norm     6.14122E+07
[25-Jan-2023 19:35:02] Model Norm   2.11804E+06
[25-Jan-2023 19:35:02] Terminated: Plateauing.
[25-Jan-2023 19:35:02] *****
[25-Jan-2023 19:35:02] *
[25-Jan-2023 19:35:02] *           INVERSION STATUS: CHECK RESULT           *
[25-Jan-2023 19:35:02] *
[25-Jan-2023 19:35:02] *****
[25-Jan-2023 19:35:02] WARNING: Stopped iterating due to lack of improvement.
[25-Jan-2023 19:35:02] PARASOL complete at 01/25/2023 22:34:38.69
[25-Jan-2023 19:35:11] Downloading session results...
[25-Jan-2023 19:36:07] Job 4890e726 closed

```

ANEXO C – CARTA GEOLÓGICA MACIÇO SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE



RELAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS			
ERA	PERÍODO	IDADE (Ma)	
FANEROZOICO	CENOZOICO	23	N23c Depósitos colúvio-éluviais
		65-542	E33m Basalto Macau
			Enb Grupo Barreiras
NEOPROTEROZOICO	Estreano	2050	NY3d Suite Intrusiva Dona Inês
			NY3c Suite Intrusiva São João do Sabugi
			NY3b Suite Intrusiva Catingueira
			NY3a Suite Intrusiva Itaporanga
PRE-CAMBRIANO	PALEOPROTEROZOICO	2500	PP2b Suite Inharré
		2300	PP2yc1-3 Complexo Santa Cruz
			PP2yp1-2 Complexo Serra Pinheiro Velho
NEO ARQUEANO	MESO ARQUEANO	2800	A34c Granitoite São José do Campestre
		2800	A34e Complexo Serra Caiada
			A34p1-2 Complexo Riacho das Telhas
		A34s Complexo Senador Eloi de Souza	
PALEO ARQUEANO	PALEO ARQUEANO	3200	A33m Complexo Brejinho
		A23 Complexo Presidente Juscelino	
		3600	A2p Gnaiss Teixeira

- UNIDADES GEOLOGICAS CENOZOICO**
- N23c Depósito colúvio-éluvial: seixões, areias, argilas e conglomerados, inconsolidados
 - E33m Derames, diques plugs e necks de olivina basalto com afinidade alcalina
 - Enb Avenidas e conglomerados, intercalações de silte e argilas
- NEO PROTEROZOICO (NP)**
- NY3 Diques de rochas graníticas
 - Suite Intrusiva Dona Inês: Hornblenda e/ou biotita granitos, leucogranitos de granulação fina a média, possuindo facies com muscovita, granada e fósforos migmáticos, de afinidade calcioalcalina de alto K
 - Suite Intrusiva São João do Sabugi: Gabros, gabronoritos, dioritos, monzo a quartzo dioritos, quartzo monzonitos, granulação fina a média de afinidade subalcalina-sienotonalica
 - Suite Intrusiva Catingueira: Granitos e quartzo sienitos, com biotita, aegirina-augita e anfólio, de afinidade alcalina e peralcalina
 - Suite Intrusiva Itaporanga: Hornblenda e/ou biotita monzonitos, granodioritos e quartzo monzonitos, com granulação grossa a porfirica, de afinidade calcioalcalina de alto K, associado a diorito com fases intermedias de mistura magmática Formação Seridó
- PALEOPROTEROZOICO (PP)**
- Suite Inharré: Hornblenditos e anfólios
 - Complexo Santa Cruz: Augen gnáisses graníticos, leucognáisses quartzo monzoníticos a graníticos com idade entre 2.230 - 2.069 Ma (U-Pb)
 - PP2yc4: Ortognáisses de composição granítica, contendo biotita, com textura grossa equigranular. Tendência calcioalcalina de alto K e idades entre 2.200 - 2.150 Ma (U-Pb)
 - PP2yc2: Ortognáisses de composição granodiorítica, com biotita + hornblenda e textura grossa
 - PP2yc1: Ortognáisses de composição tonalítica, com hornblenda + biotita, textura grossa e com enclaves rochas máficas
 - Complexo Serra Pinheiro - Pedro Velho: Biotita leucortognáisses granodioríticos a graníticos, peraluminosos, migmatizados
 - PP2yp2: Biotita hornblenda migmatitos com mesossomas tonalíticos a granodioríticos e leucossomas graníticos, com interações de anfólios
 - PP2yp1: Biotita ortognáisses trondhjemíticos, parcialmente migmatizados
- NEOARQUEANO (A)**
- A34c: Granitoite São José do Campestre, hornblenda ortognáisses e sieno-monzoníticos e ortognáisses equigranulares com textura média a grossa, e com hornblenda e biotita. 2.683-2.655 Ma (U-Pb)
 - Complexo Serra Caiada: Anfólios dominantes, bandados com biotita e/ou hornblenda-gnáisses, com níveis dioríticos e gabróicos
 - A34e: Magnetita leucogranitos contendo granadas
 - A34s: Formações feríferas bandadas, associadas a anfólios e rochas metabásicas e metatubálicas. Intercalações de níveis de rochas calcioalcalinas com sheilas, mármores e quartzitos micáceos
 - A34c3: Granada gnáisses e leucognáisses quartzo telopálicos, biotita gnáisses bandados emigmatizados, contendo lentes de anfólios
 - A34c2: Migmatitos com palcosomas de hornblenda-ortognáisses tonalíticos e neossomas de composição quartzo telopálica, localmente dialexitos e diques de anfólios
 - A34c1: Migmatitos com palcosomas de hornblenda-ortognáisses tonalíticos e neossomas de composição quartzo telopálica, localmente dialexitos e diques de anfólios
- MESOPALEOARQUEANO (A3)**
- Complexo Riacho das Telhas: A34p2: Talco-sepiantina clorita xistos, talco xistos e tremolita xistos; A34p1: Piroxênitos, tremolita piroxênitos, magnetita-cromita-piroxênitos, olivina piroxênitos, gabros e gabronoritos
 - Complexo Senador Eloi de Souza: A34s: Ortognáisses granulíticos máficos e félsicos, com rochas calcioalcalinas associadas e hornblenda-piroxênio gnáisses félsicos
 - A34e: Hidrotérmica-oligoclásio ortognáisses, metagabros, metaleucoritos e metanoritos, metaluminosos
 - Complexo Brejinho: A33m: Ortognáisses granodioríticos a graníticos predominantes, incluindo metatonalitos metatondhjemitos com variados estágios de migmatização, peraluminosos
- MESOPALEOARQUEANO (A2/A3)**
- Complexo Presidente Juscelino: A23: Migmatitos estromatolíticos, bandados a nebulíticos, com mesossoma tonalíticos a granodioríticos biotita ortognáisses de composição TTG e leucossomas granodioríticos, contendo granada. 3.256 Ma (U-Pb)
 - Gnaiss Teixeira: A2p: Granada silimanita gnáisses e granada-cordierita-biotita paragnáisses



CARTA GEOLOGICA
 ESCALA 1:100.000

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Origem da quadragem UTM: equador e Meridiano Central 329°W
 arredondadas às constantes: 10.000km e 500km, respectivamente.
 Datum horizontal: WGS84
 Declinação magnética do centro da folha: 19°54', cresce anualmente 8.8"

2013

CPRM - Serviço Geológico do Brasil
 Ministério de Minas e Energia

