

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

GUSTAVO HENRIQUE PEREIRA NIELSEN

**INVESTIGAÇÃO BASEADA EM GIS E CALCULADORA AHP PARA
IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS POTENCIAIS PARA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
NO RIO ARAGUARI**

Monte Carmelo – MG

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

GUSTAVO HENRIQUE PEREIRA NIELSEN

**INVESTIGAÇÃO BASEADA EM GIS E CALCULADORA AHP PARA
IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS POTENCIAIS PARA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
NO RIO ARAGUARI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
ao curso de graduação em Geologia da
Universidade Federal de Uberlândia – Campus
Monte Carmelo, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Breno Souza Martins
Coorientadora: Prof. Dra. Juliana Pertille

Monte Carmelo – MG

2024

RESUMO

O gradativo aumento da demanda por recursos hídricos na atualidade é recorrente em indústrias, agroindústrias e abastecimento urbano, desse modo a locação de poços tubulares atende a demanda hídrica existente em regiões urbanas e rurais. Mas nem sempre é uma tarefa fácil, caso não tenha um conhecimento das condicionantes geológicas e hidrogeológicas locais. Em situações em que se trata de aquíferos fraturados, a análise de locais com maiores ocorrências de águas subterrâneas pode se tornar ainda mais complexa. Este trabalho tem como objetivo fornecer um mapa de favorabilidade hídrica subterrânea para minimizar incertezas, em que o mapa poderá auxiliar trabalhos futuros de prospecção de águas subterrâneas, contribuindo para redução de tempo e recursos financeiros empregados na atividade. A área alvo do estudo inclui a baixa e média vertente do Rio Araguari, nos municípios de Araguari e Uberlândia – MG. Nessa pesquisa, utilizando-se de dados geográficos e sendo retrabalhados em ambiente SIG, obteve-se quatro mapas principais, cujas características são fundamentais para a ocorrência de reservas de água subterrânea: (1) litológico, (2) HAND, (3) aquíferos e (4) densidade de lineamentos estruturais (morfoestrutural, gamaespectrométricos e magnetométricos), em que todos esses foram integrados através do método, *Analytic Hierarchy Process* (AHP), em que se pode delimitar áreas de maiores e menores potenciais de ocorrência de águas subterrâneas. A metodologia de Análise de Multicritério auxiliou na determinação de áreas favoráveis para a perfuração de poços, resultando em um mapa final probabilístico de potencial hidrogeológico. O mapa temático de potencial hidrográfico foi validado através de poços encontrados na área, por meio da capacidade específica destes.

PALAVRAS-CHAVE: Águas subterrâneas, Sensoriamento Remoto, Processo Analítico Hierárquico, Rio Araguari.

ABSTRACT

The gradual increase in demand for water resources today is common in industries, agro-industries, and urban water supply. Therefore, the placement of tubular wells meets the existing water needs in urban and rural regions. However, this task is not always easy, especially without knowledge of local geological and hydrogeological conditions. In areas with fractured aquifers, assessing locations with higher occurrences of groundwater can become even more complex. Addressing this issue, this thesis aims to provide a final output: a groundwater favorability map, helping to reduce uncertainties and potentially assisting in future groundwater prospecting efforts for well location, saving time and financial resources. The targeted area covers the lower and middle reaches of the Araguari River in the municipalities of Araguari and Uberlândia, Minas Gerais. This study utilized geographic data, reprocessed within a GIS environment, resulting in four main maps, each essential for identifying groundwater reserves: (1) lithological, (2) structural lineament density (morphostructural, gamma-ray spectrometric, and magnetometric), (3) HAND, and (4) aquifer maps. These were integrated using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, allowing the delineation of areas with higher and lower groundwater potential. The Multi-Criteria Analysis methodology helped determine favorable zones for well drilling, leading to a probabilistic final map of hydrogeological potential. The thematic map of hydrographic potential was validated using existing wells in the area, based on their specific capacity.

KEYWORDS: Groundwater, Remote Sensing, Analytic Hierarchy Process, Araguari River.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Jaires e Regina, que são os pilares da minha vida e meu maior exemplo de determinação. Vocês sempre acreditaram em mim, me apoiaram incondicionalmente e me mostraram o valor transformador da educação.

À minha tia Esmeraldina e à minha avó Marlene, pela constante preocupação com meu bem-estar e pelo carinho que sempre me dedicaram.

Ao meu irmão Felipe, cujas palavras de incentivo foram fundamentais para me dar força nos momentos de fraqueza e renovar minha confiança.

Aos amigos que a vida me presenteou durante essa jornada, Samuel e Kaio, por tornarem esse percurso mais leve, enriquecedor e cheio de boas lembranças.

Ao geólogo Ennus Zaccarelli, pelos conselhos valiosos e pelas conversas que ampliaram minha compreensão sobre o tema deste trabalho.

Ao meu orientador, Breno Souza Martins, pela paciência, orientação precisa e pela forma como lapidou as ideias apresentadas, garantindo que o desenvolvimento deste TCC se alinhasse com os objetivos propostos.

Por fim, à minha querida companheira Nathalia, que nunca duvidou da minha capacidade e sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e motivação constante. Sua presença foi essencial para a realização deste sonho.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho
é no dicionário”

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS.....	11
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	11
3.	JUSTIFICATIVA	12
4.	LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	12
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	13
5.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	14
5.2	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOGRÁFICOS.....	15
5.2.1	AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOGRÁFICOS	15
5.2.2	PROCESSAMENTO DE DADOS GEOGRÁFICOS	16
5.2.3	MAPA HAND.....	17
5.3	ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS E INTERPRETAÇÃO	18
5.4	PONDERAÇÃO E APLICAÇÃO DA CALCULADORA AHP	19
5.5	RESULTADOS.....	20
6.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
6.1	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	20
6.1.1	FAIXA DE DOBRAMENTOS BRASÍLIA	20
6.1.2	BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ	21
6.2	CONTEXTO ESTRUTURAL	22
6.3	ESTRATIGRAFIA	23
6.3.1	COMPLEXO MARATÁ	24
6.3.2	GRUPO ARAXÁ B.....	25
6.3.3	GRUPO SÃO BENTO (FORMAÇÃO SERRA GERAL).....	25
6.3.4	GRUPO BAURU (FORMAÇÃO MARÍLIA).....	26
6.3.5	COBERTURAS DETRÍTICO-LATERÍTICAS	26

6.4	CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO.....	27
6.5	CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	28
6.6	AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS).....	29
6.7	MÉTODO AHP EM AMBIENTE SIG.....	31
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
7.1	MAPA LITOLÓGICO	32
7.2	MAPA HAND.....	34
7.3	MAPA DE AQUÍFEROS	36
7.4	MAPA DE DENSIDADE DE LINEAMENTOS	39
7.4.1	LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS	39
7.4.2	LINEAMENTOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	40
7.4.3	LINEAMENTOS MAGNETOMÉTRICOS	42
7.4.4	MAPA DE DENSIDADE DE LINEAMENTOS	44
7.5	MAPA DE FAVORABILIDADE HÍDRICA.....	48
8.	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIA.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de acesso	13
Figura 2 - Fluxograma do trabalho	14
Figura 3 - Procedimento para o cálculo do algoritmo HAND. Os quadrados de coloração cinza, em destaque, representam os pontos da grade pertencentes à rede de drenagem. Além disso, apenas as setas pretas são representantes da direção do fluxo de drenagem.	18
Figura 4 - Estratigrafia da área de estudo	24
Figura 5 - Estrutura Hierárquica do Método AHP	29
Figura 6 - Escala de importância relativa de Saaty	30
Figura 7 - Exemplo de matriz de comparação (Saaty 1987).....	30
Figura 8 - Cálculo aproximado do vetor de Eigen (λ) (Vargas 2010).	31
Figura 9 -Representação de como funciona a formação de um resultado pela AHP em ambiente SIG	32
Figura 10 - Mapa Litológico da área de estudo	34
Figura 11 - Mapa Modelo HAND	35
Figura 12 - Gráfico de dispersão aplicado para as classes HAND e as capacidades específicas dos poços. No gráfico é evidente que as maiores capacidades específicas encontram na classe de 0-7m.....	36
Figura 13 - Mapa de Domínios Hidrogeológicos	37
Figura 14 - Gráfico de dispersão comparando os aquíferos existentes na área com a capacidade específica dos poços.....	38
Figura 15 - Mapa de lineamentos morfoestruturais e roseta de suas direções.....	40
Figura 16 - Mapa gamaespectrométrico – RGB (A) e mapa de lineamentos RGB (B).....	41
Figura 17 - Mapa gamaespectrométrico do equivalente tório (A) e mapa de lineamentos do equivalente tório (B)	42
Figura 18 - Mapa magnetométrico – ASA da área de estudo (A) e mapa de lineamentos ASA (B).....	43
Figura 19 - Mapa magnetométrico Primeira Derivada (A) e mapa de lineamentos 1° Derivada.....	44
Figura 20 - Mapa e roseta de todos os lineamentos estruturais	45
Figura 21 - Estereogramas associados as classes de capacidade específica, A (0-1 m ³ /h/m), B (1-2 m ³ /h/m)	46

Figura 22 - Estereogramas associados as classes de capacidade específica, A (2-4 m ³ /h/m), B (4-10 m ³ /h/m) e C (10-69 m ³ /h/m).	47
Figura 23 - A Mapa de lineamentos mais produtivos em relação a águas subterrâneas em e B Mapa de densidade de lineamentos preferenciais.....	48
Figura 24 - Mapa de favorabilidade hídrica subterrânea do médio-baixo curso do Rio Araguari nos municípios de Araguari e Uberlândia, exibindo as zonas de maior potencial	49
Figura 25 - Gráfico de dispersão correlacionando com a capacidade específica dos 1442 poços com as classes de favorabilidade hídrica. Destaca-se que os poços mais produtivos estão localizados em áreas de potencial máximo de águas subterrâneas.	50

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água é um desafio global, agravado por fatores como crescimento populacional, desenvolvimento agrícola e industrial, urbanização acelerada, mudanças climáticas e má gestão dos recursos hídricos. No Brasil, a situação é acentuada pela distribuição desigual dos recursos, além de secas e queimadas. De forma semelhante, em Minas Gerais, a pressão sobre os recursos hídricos aumenta devido ao crescimento populacional, atividades industriais e agrícolas, além das mudanças climáticas. Isso resulta na degradação dos mananciais e na diminuição da disponibilidade hídrica durante os períodos de estiagem, (ANA, 2017).

Na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, o uso intensivo da água na agricultura e o crescimento urbano desordenado agravam a situação, exigindo medidas urgentes de gestão e conservação (IGAM, 2018). Nesta região, entre os municípios de Uberlândia – MG e Araguari – MG, as condicionantes geológicas e geotectônicas, oferecem oportunidades para enfrentar esses desafios, visto que esses municípios estão inseridos em dois contextos geotectônicos, as rochas da Faixa Móvel Brasília e da Bacia Sedimentar do Paraná.

A área de estudo contém aquíferos porosos significativos da Bacia Sedimentar do Paraná e aquíferos fraturados associados aos basaltos da Serra Geral (OLIVEIRA e RIBEIRO, 2000), que no contexto de litologia ígnea, se manifestam em estruturas tectônicas, como fraturas e falhas, que podem estar interligadas ou separadas por grandes lineamentos presentes na área em análise. Sendo assim, o movimento da água subterrânea é influenciado por essas estruturas. (MACHADO e FREITAS, 2005).

A utilização de imagens aéreas e orbitais para a localização de pontos de captação de água subterrânea é a abordagem mais acessível e, portanto, a mais amplamente adotada devido à sua relação custo-benefício vantajoso (LISBÔA et al., 2022). O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta de grande valor nos estudos hidrogeológicos, ampliando as oportunidades de identificar estruturas que possam armazenar e conduzir água subterrânea. A introdução de novas tecnologias, como a extração automática de lineamentos, pode potencializar a eficácia na identificação dessas estruturas (BARREIRO e BARBOSA, 2021).

Por meio desta pesquisa foram realizados estudos hidrogeológicos nos municípios de Araguari – MG e Uberlândia – MG para determinar áreas de alto

potencial hídrico, em que se fez uso de técnicas de análise de dados, sensoriamento remoto e geoprocessamento, aliado com o uso da ferramenta Calculadora AHP.

A Calculadora AHP (Analytic Hierarchy Process) é uma ferramenta desenvolvida por (SAATY 1987, 1990), utilizada para a tomada de decisão em situações em que múltiplos critérios precisam ser considerados. No contexto de prospecção hídrica subterrânea em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a Calculadora AHP é empregada para avaliar e classificar a adequação de diferentes locais para a localização de aquíferos produtivos (MURTHY e MAMO 2009, SHEKHAR e PANDEY 2015, BRITO 2018, KUMAR e KRISHNA 2018, OLIVEIRA et al., 2020).

Desse modo, esta pesquisa visa mapear zonas com potencial para ocorrências de águas subterrâneas, na porção na média e baixa vertente do Rio Araguari, nos municípios de Araguari e Uberlândia, utilizando dados geográficos em que serão adaptados para a área de estudo em ambiente SIG.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal deste trabalho é mapear as zonas com potencial para ocorrência de águas subterrâneas na baixa e média vertente do Rio Araguari, nos municípios de Araguari - MG e Uberlândia – MG.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir mapas temáticos em ambiente SIG na escala 1:100.000, sendo eles: litológico, HAND, de aquíferos e lineamentos (morfoestrutural, composição ternária, equivalente tório, amplitude do sinal analítico e primeira derivada vertical);
- Avaliar os aspectos dos mapas com base na teoria e na potencialidade hídrica dos poços. Cada elemento dos mapas foi analisado individualmente, utilizando o software ioGAS;
- Padronizar as ponderações dos mapas utilizando o método AHP, visando categorizar as áreas com potencial para ocorrência de águas subterrâneas. Essa categorização será representada através de um mapa de favorabilidade hidrogeológica;

- Validar a eficácia do método utilizando os dados físicos dos poços tubulares já presentes na região em análise.

3. JUSTIFICATIVA

Os recursos hídricos são essenciais para o desenvolvimento humano, industrial e agrícola, e muitas vezes são obtidos por meio de poços tubulares profundos. Portanto, é necessário a utilização de novas ferramentas que sejam acessíveis e práticas para a localização e obtenção de águas subterrâneas.

Nesta pesquisa, o método AHP foi aplicado, mostrando-se eficaz na distinção de zonas com potencial hídrico, conforme comprovado em trabalhos anteriores (MENEZES et al., 2011; FASHAE, 2014; BRITO, 2018; OLIVEIRA et al., 2020).

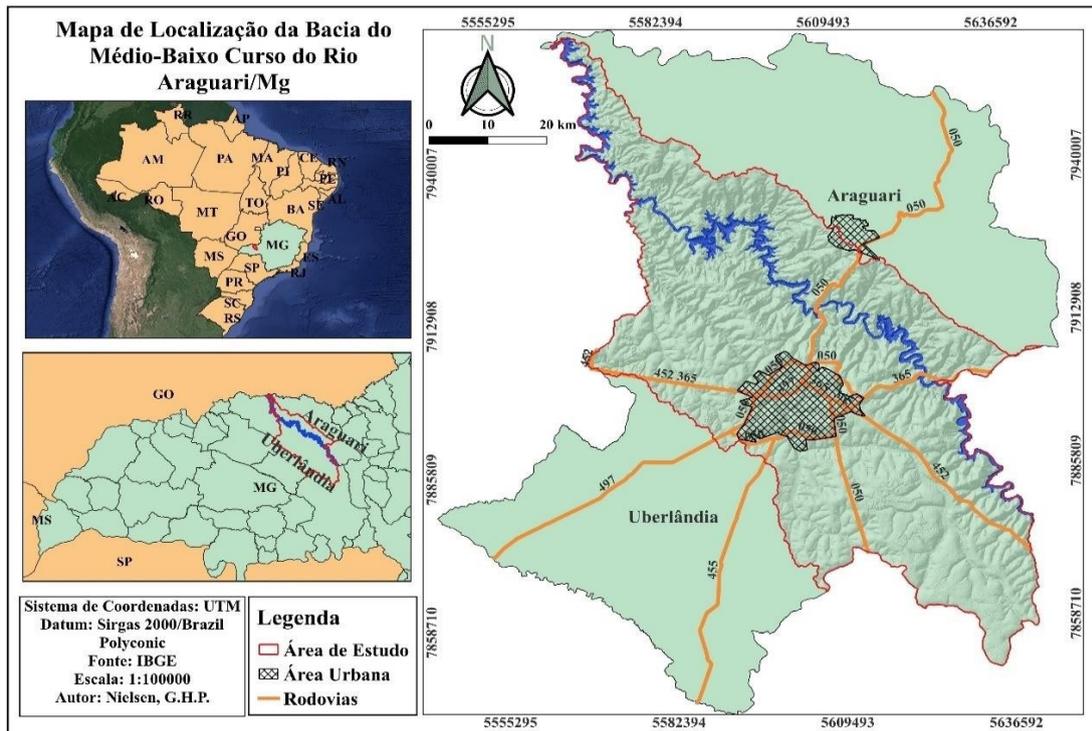
Portanto, o desenvolvimento deste trabalho é significativo devido à escassez de investigações hidrogeológicas realizadas em ambiente SIG. Sendo assim, este estudo contribuirá para a seleção de áreas para locação de poços tubulares na média e baixa vertente do Rio Araguari.

4. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está situada na média e baixa vertente da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, entre os municípios de Araguari e Uberlândia, na região no Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais, conforme ilustrado na Figura 1.

A área pode ser acessada pelas seguintes rodovias: BR-050 que permite a chegada aos municípios de Araguari e Uberlândia, e BR-365 e BR-452, que conectam Uberlândia.

Figura 1 - Mapa de vias de acesso à área de estudo



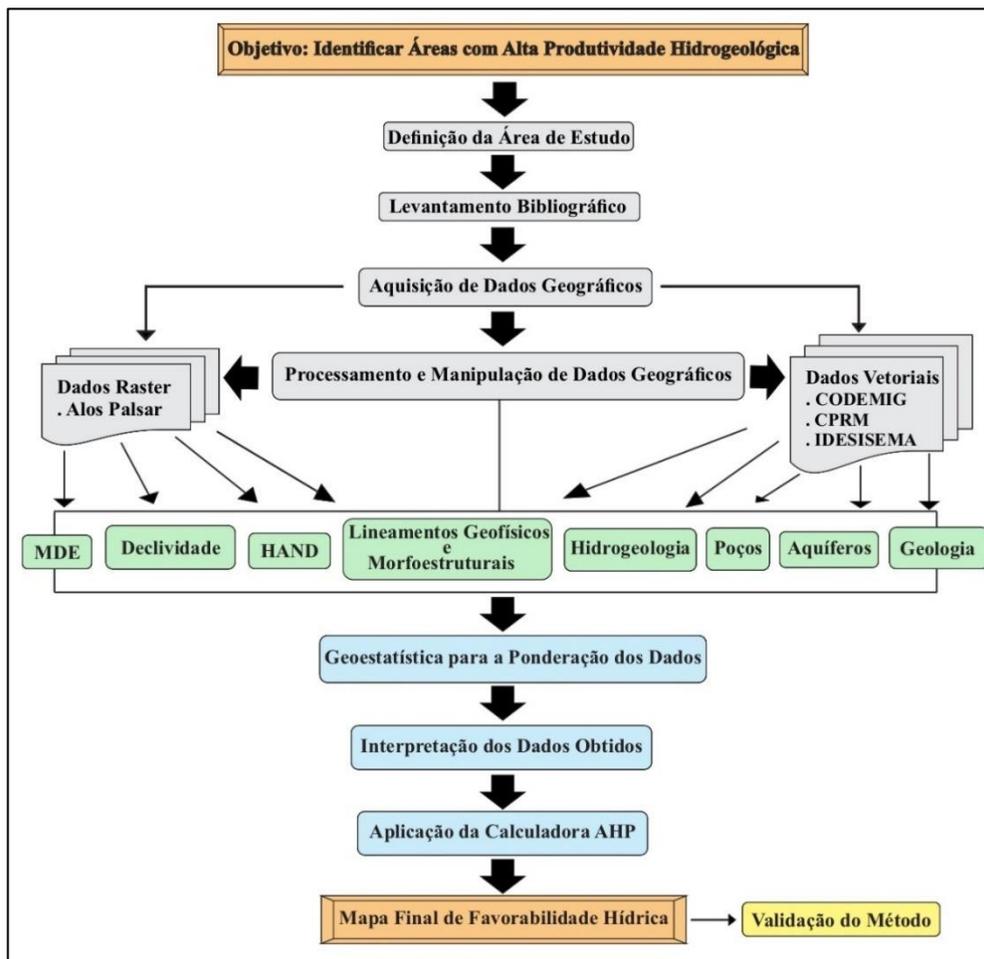
Elaborado pelo autor.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia descreve as técnicas que serão aplicadas para o desenvolvimento da pesquisa, visando alcançar os objetivos definidos. Para uma melhor organização dos métodos, foi elaborado um fluxograma que ilustra cada etapa a ser cumprida, conforme Figura 2, sendo elas:

- i. Levantamento Bibliográfica;
- ii. Aquisição e Processamento de Dados Geográficos;
- iii. Elaboração de Mapas Temáticos e Interpretação;
- iv. Ponderação dos Mapas e Aplicação da Calculadora AHP;
- v. Resultados.

Figura 2 - Fluxograma do trabalho



Elaborado pelo autor.

5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

O levantamento bibliográfico consiste na coleta de informações sobre o tema, baseando-se em pesquisas anteriores para destacar a evolução científica do assunto e priorizar os estudos mais relevantes (OLIVEIRA, SÍGOLO et al. 2005). Sendo assim, este estudo utilizou como base bibliográfica os trabalhos realizados na região do Alto Paranaíba em ênfase nos municípios de Araguari e Uberlândia para a compreensão de sua geologia, litoestratigrafia, geomorfologia, geofísica e hidrogeologia.

Também foram amplamente utilizados como base de interpretação dos dados o mapeamento geológico realizado pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, 2017), mapeamentos geomorfológicos (BACCARO 1991, 2001, 2004) e o livro elaborado pela CPRM (FEITOSA, 2008) no âmbito da hidrogeologia.

5.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOGRÁFICOS

5.2.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOGRÁFICOS

Os dados geográficos foram obtidos por meio de plataformas oficiais de acesso público, gerando um banco de dados composto por shapes, imagens de alta resolução, mapas geológicos e modelo digital do terreno. O geoprocessamento dos dados foi realizado no software QGIS Desktop 3.34, incluindo a técnicas de fotointerpretação dos elementos coletados.

5.2.1.1 DADOS RASTER

Os dados geomorfológicos, como curvas de nível, declividade e hipsometria, foram extraídos do Modelo de Elevação (MDE) obtido pelo satélite Alos Palsar. Este sistema de aquisição gratuito, com resolução espacial de 12,5 metros, fornece uma base de dados cartográfica refinada, disponibilizada pelo site AFS-Alaska Satellite Facility.

Os mapas geofísicos utilizados para a interpretação de lineamentos em subsuperfície foram gerados a partir do Levantamento Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais, conduzido pela CODEMIG no ano de 2005. Este levantamento foi realizado com uma altitude de voo de 100 metros e um espaçamento de 1000 metros entre as trajetórias de mapeamento.

5.2.1.2 DADOS VETORIAIS

Os dados vetoriais foram coletados em diferentes websites, formando um banco de dados com informações geológicas, domínios de aquíferos e recursos hídricos.

A premissa inicial da geologia, estratigrafia e estruturas da área de estudo foram adquiridos através do site do Portal da Geologia, disponibilizado pela CODEMIG no ano de 2017 e do Repositório Institucional de Geociências (RIGEO).

Os dados hídricos e os aspectos fisiográficos foram adquiridas através do site da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-Sisema), que disponibiliza shapefiles e informações

técnicas sobre os poços outorgados na região, além de noções geomorfológicas e pedológicas.

5.2.2 PROCESSAMENTO DE DADOS GEOGRÁFICOS

O processamento dos dados ocorreu em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), que pode ser definido como um conjunto computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados com ênfase a análises espaciais e modelagens superficiais (ARONOFF, 1989).

Para BUCHI et al., 2018, o SIG é uma ferramenta essencial e indispensável para a aquisição, planejamento e interpretação de dados, sendo possível aplicá-lo em todas as etapas constituintes do mapeamento geológico, pré-campo, campo e pós-campo; o autor ainda ressalta que os ambientes computacionais impulsionados pelo SIG estão possibilitando uma integração mais precisa de dados tornando as análises mais apuradas em diversos parâmetros.

5.2.2.1 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE LINEAMENTOS

Embora o processamento de imagens digitais tenha avançado rapidamente, o método manual de extração de lineamentos estruturais continua a ser amplamente utilizado. Esse método, no entanto, costuma ser menos preciso e consome mais tempo, especialmente ao tratar dados azimutais e ao criar diagramas de rosetas.

Nesse cenário, a extração automática de lineamentos se apresenta como uma alternativa inovadora e eficaz, oferecendo maior precisão e reduzindo a subjetividade na identificação das anisotropias geológicas (MALLAST et al., 2011, VAZ et al., 2012; LOBATSKAYA e STRELCHENKO, 2016).

Esta técnica consiste na identificação e vetorização de feições lineares a partir de produtos de sensoriamento remoto pré processadas, através do algoritmo Line do software PCI Geomatica.

Após adquirir os modelos de elevação do satélite Alos Palsar, foram produzidas imagens de relevo sombreado a partir do *Software* QGIS 3.28. Essa técnica cria uma visualização tridimensional da superfície terrestre, destacando a rugosidade do terreno com base na iluminação solar, onde o relevo sombreado depende diretamente da fonte de

iluminação e que as suas características podem ser melhoradas ou suprimidas pela manipulação da direção da iluminação (BONHAM-CARTER *et al.* 1994).

Com isso, foram gerados padrões de imagem de oito azimutes distintos (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°), utilizando como parâmetro 10 ângulos verticais de altitude de iluminação (10°, 20°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80° e 90°) em que será aplicado para cada azimute como finalidade a obtenção de imagens com diferentes fontes de iluminação. Resultando em 80 imagens distintas.

Por se tratar de uma ampla série de documentos TIFFs, optou-se por utilizar a interface de processamento desses dados em lote, onde é permitido executar em um só algoritmo um conjunto de diferentes valores de entrada. Dessa forma, não será necessário realizar repetidamente diferentes entradas para os diferentes valores de azimutes e altitudes.

Assim, a partir dos dados obtidos, os azimutes cujas angulações são iguais tiveram uma sobreposição a partir da álgebra de soma no QGIS 3.34, originando uma única imagem para todas as angulações equivalentes, onde, ao final foram produzidas 10 imagens de relevo sombreado com multidireções de iluminação.

Com isso, as 10 imagens geradas foram utilizadas para a extração automática de lineamentos através do algoritmo Line do software PCI Geomatica, onde foram atribuídos valores de 8, 50, 20, 3, 15 e 10 respectivamente. Após a geração das 10 imagens, foi realizado a mesclagem no QGIS, resultando em uma soma vetorial final de todos os lineamentos.

Para os lineamentos geofísicos, foram utilizados mapas e polígonos em formato Raster, sem necessidade adicional de manipulação de dados e pré processamento, onde para cada Raster geofísico, o algoritmo Line do software PCI Geomatics, apresentou três diferentes tipos de comportamento ao fazer a extração automatizada.

Dessa forma, a distinção existente entre as estruturas ocorreu pela persistência e tamanho das linhas, ou seja, a classe um forneceu as maiores estruturas e a menor quantidade, a segunda foi intermediária e a terceira foram as que apresentaram maior número de dispersão e menores distâncias. Após essa distinção, foi realizado a mesclagem desses vetores, resultando em um único arquivo shapefile de linhas.

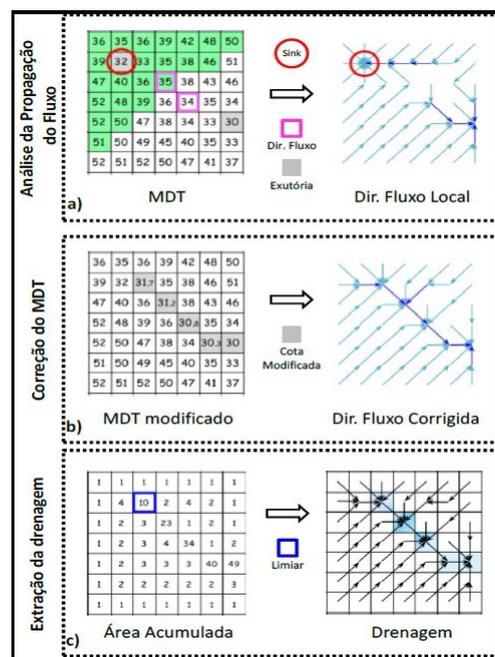
5.2.3 MAPA HAND

O modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), desenvolvido inicialmente por (RENNÓ et al., 2008), reclassifica o Modelo Digital de Terreno (MDE) com base na diferença entre a altitude do terreno e a altitude da rede de drenagem mais próxima. Esse modelo é gerado a partir de uma rede de drenagem extraída de dados topográficos, no caso o Modelo Digital de Elevação (MDE) Alos Palsar.

A partir do MDE são feitos cálculos para definir as direções de fluxo e as áreas de drenagem acumuladas. O HAND é obtido medindo a diferença de elevação entre cada célula do MDE e o ponto mais próximo da rede de drenagem, conforme ilustrado na Figura 3, alterando o nível de referência para torná-lo relativo à drenagem mais próxima, em vez de ser o nível do mar.

O mapa HAND foi gerado por meio do software Hand Model, desenvolvido por (NOBRE et al. 2011) e que posteriormente foi reclassificado no QGIS.

Figura 3 - Procedimento para o cálculo do algoritmo HAND. Os quadrados de coloração cinza, em destaque, representam os pontos da grade pertencentes à rede de drenagem. Além disso, apenas as setas pretas são representantes da direção do fluxo de drenagem.



Modificado Rennó et al., 2008.

5.3 ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS E INTERPRETAÇÃO

Foram gerados quatro mapas temáticos na escala 1:100.000, sendo eles: mapa geológico, mapa HAND, mapa de aquíferos e mapa de densidade de lineamentos, em que cada um será utilizado na caracterização e prospecção de água subterrânea.

A interpretação foi feita através da utilização de dados qualitativos e quantitativos. Sendo assim, cada mapa temático teve uma forma diferente de análise, onde se associa a produtividade hídrica dos dados hidrológicos e hidrogeológicos.

Para a utilização dos dados qualitativos, foram extraídas informações que permitiram uma análise dos componentes espaciais da área de estudo, incluindo rochas, aquíferos, declividade, hipsometria, pedologia, geomorfologia e hidrologia. E, associando esses elementos com as propriedades hídricas subterrâneas, é possível distinguir os melhores e piores dados descritivos.

Os dados quantitativos foram reavaliados no software ioGAS para aplicar os conceitos da geoestatística, que analisa a dependência espacial entre pontos de amostragem, avaliando como os valores de uma variável estão correlacionados em função da distância entre os pontos. Dessa forma, quanto mais próximos dois pontos estão, maior tende a ser a semelhança entre seus valores, permitindo modelar padrões e fazer previsões sobre áreas não amostrada (ISAAKS, E. H., e SRIVASTAVA, R. M. 1989).

5.4 PONDERAÇÃO E APLICAÇÃO DA CALCULADORA AHP

Após a geração dos mapas, cada critério foi analisado individualmente e foram definidos pesos hierárquicos para os critérios que influenciam a potencialidade de ocorrência de águas subterrâneas, classificando em 5 classes de produtividade (1-péssimo, 2-ruim, 3-regular, 4-bom e 5-excelente).

A ponderação foi definida pelos fatores adotados para a análise do potencial hídrico, que consiste na seleção de dados do meio físico natural representativos dos fenômenos ou evidências que permitem os processos de armazenamento e circulação da água. Esta etapa foi realizada através do software ioGAS.

Sucessivamente, utilizou-se a técnica de análise de Processo Hierárquico Analítico (AHP), desenvolvida por SAATY, 1992, para identificar o grau de importância de cada mapa para a prospecção hídrica. Para isso, foram aplicados valores para os respectivos mapas temáticos e, após isso, foi possível realizar a integralização dos mesmos através da Calculadora Raster no QGIS, que originou o mapa final de favorabilidade hídrica.

5.5 RESULTADOS

Nas etapas anteriores, realizou-se uma pesquisa quantitativa e qualitativa de todos os dados coletados e gerados. E, a partir da análise de multicritérios em ambiente SIG, foi possível identificar quais os fatores proporcionarão uma produtividade hídrica eficiente, resultando na elaboração de um mapa final de favorabilidade hídrica.

Além disso, houve a validação do mapa final de potencial hídrico, a qual se baseou nos dados de capacidade específica de poços encontrados na área de estudo. Para isso, recorreu-se ao uso de diagramas de dispersão, os quais foram empregados na representação visual desses dados. Essa etapa de validação proporcionou ao mapa final sua precisão e confiabilidade.

6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A região de pesquisa está situada em dois contextos geotectônicos: a Faixa de Dobramentos Brasília e Bacia Sedimentar do Paraná.

6.1.1 FAIXA DE DOBRAMENTOS BRASÍLIA

A Faixa de Dobramentos Brasília situa-se na Província Tocantins, um sistema orogênico neoproterozóico (Brasiliano/Pan-Africano). O cenário inicial da Província Tocantins sugere um oceano aberto que teria se formado há 900 Ma por uma etapa de rifteamento, entre os crátons Amazônico, São Francisco e Paranapanema, etapa na qual recebeu o nome de Tafrogênese Toniana (BRITO NEVES et al., 1996; ALMEIDA et al., 2000).

A Faixa Brasília abrange um cinturão de dobramentos de idade neoproterozoica situado na margem ocidental do Cráton do São Francisco, abrangendo partes dos estados de Tocantins, Goiás e Minas Gerais. Esta faixa possui cerca de 1200 km de extensão e 300 km de largura. A Faixa Brasília pode ser dividida em três domínios tectonoestratigráficos distintos, com grau metamórfico crescendo de leste a oeste (PIMENTEL et al., 2000; DARDENNE, 2000).

O Domínio do Cráton do São Francisco corresponde à zona de antepaís do Cráton do São Francisco. Neste domínio se encontra pelitos e carbonatos plataformais do Grupo Bambuí e Paranoá e rochas do embasamento (DARDENNE, 1981). Trata-se de um domínio autóctone, em que o limite é indicado por falhas de empurrão de baixo a médio ângulo.

O Domínio Externo, é marcado por um conjunto de escamas de empurrão de baixo grau metamórfico, que recobre o Domínio Cratônico. Nesse domínio encontram-se estruturas dobradas e falhas de empurrão. Esse domínio é composto por unidades metassedimentares do Mesoproterozóico, sendo elas Canastra, Ibiá, Vazante e porções mais superiores do Grupo Paranoá (DARDENNE, 2000).

O Domínio Interno, inclui unidades alóctones, sendo representada por Nappes. Essa unidade apresenta grau metamórfico de médio a alto, com intensa deformação dúctil, sendo representada pelos grupos Araxá, rochas graníticas, associação metavulcanossedimentar e terrenos Granulíticos com Ortognaisses (DARDENNE, 2000);

6.1.2 BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ

A Bacia Sedimentar do Paraná se localiza no continente sul-americano, abrangendo o Paraguai, Brasil, Argentina e Uruguai, totalizando uma área aproximada de 1,5 milhão de quilômetros quadrados. Ela possui uma sequência de sedimentos e rochas magmáticas de até 7 mil metros de espessura, tendo um formato ovalado com eixo maior N-S, com idade entre o Ordoviciano e Cretáceo, caracterizada como sendo do tipo intracratônica, em que é inclusa na placa sul-americana instituída no Continente Gondwana. O embasamento é composto por rochas ígneas e metamórficas de idades de 700 a 450 Ma, que está relacionado ao Ciclo Brasileiro (GABAGLIA e MILANI, 1991).

Para MILANI, 1997, o registro estratigráfico da Bacia do Paraná possui seis superseqüências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo).

As três primeiras superseqüências são representadas por sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivo-regressivos ligados a oscilações do nível relativo do mar no Paleozóico, já em relação as demais representam a pacotes de sedimentos continentais com rochas ígneas associadas (MILANI, 2004).

O Grupo Ivaí, representa o final da Orogenia Oclóyica (500 a 425 Ma), em que foi depositado os primeiros sedimentos na bacia, durante o neo-ordoviciano. Em que essa unidade se faz discordância, sobre os sedimentos fluviais da Unidade Paraná (QUINTAS et al., 1997). Após um hiato de 50 Ma, houve a deposição de uma sequência transgressiva-regressiva, formando a Supersequência Gondwana I. No Jurássico, com a ausência de influência marinha, houve a deposição dos sistemas eólico-fluvial, formando a Sequência Gondwana II. Em seguida, com influência tectônica distensiva, houve um grande derrame de basaltos, resultando no Gondwana III. Por fim, sedimentos continentais, depositaram sobre as lavas basálticas, formando a Supersequência Bauru (MILANI., 2004).

6.2 CONTEXTO ESTRUTURAL

Os autores (VALERIANO et al., 2004 e UHLEIN et al., 2012), classificam a Faixa Brasília em dois segmentos com orientações distintas e estilos metamórfico-deformacionais contrastantes: a Faixa Brasília Setentrional, com orientação NE, e a Faixa Brasília Meridional, com orientação NW.

A Faixa Brasília Setentrional é limitada a leste com o Arco Magmático de Goiás e com o Maciço Goiano, através do Sistema de Falhas Rio Maranhão. O limite sul se fez pela denominada Megaflexura dos Pirineus, trends estruturais (NNW ao sul e NNE ao norte) em que são infletidos para a direção E-W (VALERIANO et al.2004; UHLEIN et al., 2012; FUCK, 1994).

A Faixa Meridional é definida pelo empilhamento das nappes de cavalgamento sub-horizontais formadas pelas rochas da margem passiva sanfranciscana, empurradas em direção ao Cráton do São Francisco. Nos seus estádios mais tardios, a deformação passa por dobramentos mais abertos associados a falhas transcorrentes sinistrais de direção NW-SE (VALERIANO et al.2004; UHLEIN et al., 2012; FUCK, 1994).

A deformação da FDB, ocorre em três fases, Dp-1, Dp e Dp+1. A primeira fase Dp-1 em que foi identificada inicialmente por (SIMÕES e FUCK 1984 apud UHLEIN et al., 2012), sendo representada pela foliação Sp-1 subparalela ao acamamento principal So, e transporte pela lineação de estiramento W-E.

A segunda fase da deformação, Dp, sendo considerada a principal fase. Nesse evento deformacional, ocorre a formação da foliação de xistosidade S2, com direção NW-SE. Nessa fase se tem um regime dúctil-rúptil, que responsável por gerar dobras assimétricas relacionados a eventos de lineações minerais paralelas às lineações de

estiramento, com orientação E-W a ENE-WNW e falhas de empurrão e reversas. (SEER, 1999; SANTOS, 2019).

Já a terceira fase, Dp+1, ocorre em uma fase mais tardia, com o desenvolvimento da foliação S3, com formação de dobras abertas e clivagem de crenulação (UHLEIN et al., 2012).

A Bacia Sedimentar do Paraná relaciona-se com os estágios finais do Ciclo Brasileiro (ZÁLAN et al. 1991). Em que se desenvolveu as faixas móveis aos arredores da bacia, que perdurou até o Neo-Ordoviciano. Dessa maneira, a evolução tectono-estratigráfica da bacia foi herdada em grande parte do embasamento. O arranjo do embasamento esclarece, o arcabouço estrutural da bacia. Este é dominado por grandes lineamentos tectônicos, agrupados em três direções principais: NW-SE, NE-SW e E-W (GABAGLIA; MILANI, 1991).

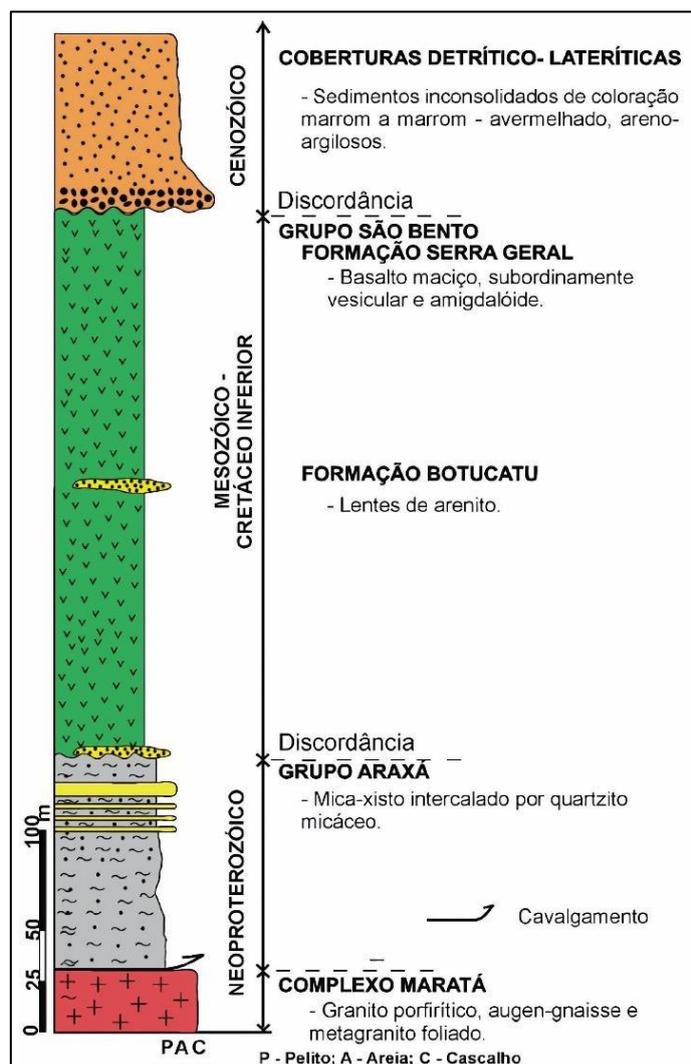
As estruturas NW-SE foram extensas zonas de falhas as quais, durante a reativação tectônica que iniciou a quebra do Gondwana, condicionando corpos ígneos intrusivos (diques e soleiras). Os lineamentos NE-SW, se tem um predomínio de movimentações transcorrente, em que se tem associações com o arcabouço tectônico das faixas Ribeira e Dom Feliciano. As estruturas de direção E-W são as menos compreendidas, o seu desenvolvimento iniciou no Triássico, e apresentam paralelismo com as zonas de fraturas oceânicas do Atlântico Sul (ZÁLAN et al. 1991).

6.3 ESTRATIGRAFIA

A área estudada é caracterizada por uma topografia levemente ondulada dissecada pelos cursos d'água. Ao longo do Rio Araguari, predominam afloramentos de granitos, metagranitos, augen-gnaiss do Complexo Maratá e rochas metassedimentares do Grupo Araxá. Estas duas unidades geológicas compõem o embasamento cristalino da área, datado do Neoproterozoico, sendo pertencentes a Faixa de Dobramentos Brasília.

Acima dessas unidades se encontram rochas do Cretáceo Inferior, basaltos do Grupo São Bento e arenitos do Grupo Bauru, ambas unidades pertencentes a Bacia Sedimentar do Paraná, e por fim temos as coberturas detrítico-lateríticas do Cenozoico recobrando os basaltos.

Figura 4 - Estratigrafia da área de estudo



Adaptado CODEMIG, 2017.

6.3.1 COMPLEXO MARATÁ

As rochas desse complexo compreendem granitos porfiríticos, metagranitos foliados e augen-gnaisses (CODEMIG, 2017). (LACERDA FILHO et al., 1995 e PIMENTEL et al., 1995), interpretaram que os metandesitos e metariolitos compreendem corpos graníticos sintectônicos milonitizados em diversos estágios de deformação e intrudem os metassedimentos do Grupo Araxá.

(PIMENTEL et al., 1995), efetuou estudos petroquímicos que apontam para dacitos e riolitos subalcalinos peralunosos como prováveis protólitos das rochas metavulcânicas. Datação U-Pb realizada por esses mesmos autores, em zircão de granito alojado na Sequência Maratá e forneceram idade de 794 Ma.

Entre Uberlândia e Araguari, no sudoeste de Minas Gerais, os autores SEER e MORAES 2017 Apud NUNES, 2020, analisaram a ocorrência dos granitos milonitizados, metagranitos e augengnaisses, descrevendo-os como gnaisses miloníticos de biotita-muscovit e os correlacionando com a Sequência Maratá de Goiás. No entanto, os autores denominaram o Complexo Maratá em Minas Gerais.

6.3.2 GRUPO ARAXÁ B

Para (BARBOSA, 1955), a unidade foi inicialmente denominada de Formação Araxá nas proximidades da cidade homônima em Minas Gerais. Porém, devido a extensão e variedades litológicas, ele elevou a Formação Araxá para a denominação de Grupo Araxá, que foi dividido em A e B. Para delimitar suas diferenças, o autor descreveu que a unidade A é composta por quartzitos, micaxistos granadíferos e xistos feldspáticos, podendo conter turmalina e cordierita, e a unidade B apresenta lentes de mármore intercaladas com quartzitos.

Segundo (PIMENTEL et al., 2001), no Grupo Araxá ocorre a presença de rochas metamáficas e meta-ultramáficas que representa uma melange ofiolítica. A deposição dos metassedimentos do Grupo Araxá se deu entre 0,9 e 0,7 Ga em uma bacia de retroarco com sedimentos psamíticos, psamo-pelíticos e pelíticos, enquanto o metamorfismo da fácies xisto verde a anfíbolito ocorrem em torno de 630 Ma.

6.3.3 GRUPO SÃO BENTO (FORMAÇÃO SERRA GERAL)

O denominado Grupo São Bento é datado do Mesozoico, constituído pelas formações Pirambóia na parte basal, Botucatu e Serra Geral na superior.

O surgimento da Formação Serra Geral aconteceu durante o processo de abertura do Oceano Atlântico, onde as rochas vulcânicas se dispõem sobre os arenitos de origem eólica da Formação Botucatu (SEER; MORAES, 2017). Além disso, as rochas magmáticas são cobertas por rochas arenoargilosas, as quais estão relacionadas com depósitos de influência aluvio-fluvial do Grupo Bauru, isso ocorreu devido ao peso dos derrames basálticos causando uma subsidência, gerando espaço para os depósitos da Supersequência Bauru (SEER; MORAES, 2017).

A unidade Serra Geral possui várias associações de litofácies, sendo a que chama mais atenção as pillow lavas. Brechas basálticas de matriz sedimentar e lavas pahoehoe

simples e espessas ocorrem em níveis estratigráficos superiores (FAMELLI, 2021). A colocação de fluxos de lava em sedimentos mal consolidados durante o vulcanismo pode levar a uma ampla gama de processos de interação lava-sedimento. A idade da fase principal da atividade vulcânica está concentrada em 134 a 132 Ma, (THIEDE E VASCONCELOS 2010, apud MORAES 2018)

Uma das características desta formação é a presença de aproximadamente 90% de basaltos e andesibasaltos toleíticos, e os outros 10% se dividem entre riolito e riolacito, onde os basaltos apresentam coloração variando entre cinza escuros a pretos tendendo a roxo ou cinza médio quando passados por processos de intemperismo, com caráter toleítico, e sua mineralogia consiste principalmente em plagioclásio, augita, pigeonita, magnetita, ilmenita, apatita e olivinas (SEER; MORAES, 2017).

6.3.4 GRUPO BAURU (FORMAÇÃO MARÍLIA)

Segundo (BATEZELLI, 2003), as formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe e Marília estão presentes no Grupo Bauru, localizado no Triângulo Mineiro. A Formação Marília foi formalmente descrita por (SOARES, 1980), e posteriormente subdividida por BARCELOS, 1984 em três membros, sendo eles da base para o topo, Serra da Galga, Ponte Alta e Echaporã, podendo ser encontrada principalmente na porção leste do Triângulo Mineiro, além do estado de São Paulo.

Na área estudada, a Formação Marília apresenta um contato inferior abrupto com os basaltos da Formação Serra Geral. Já o contato superior se dá com os depósitos neógenos, caracterizando uma transição significativa (CODEMIG, 2017).

A deposição da Formação Marília é datada do Cretáceo Superior e para (BARCELOS, 1984), os depósitos da Formação Marília resultaram de um regime torrencial de leques aluviais em um clima semiárido, onde essa sedimentação ocorreu devido à reativação tectônica de faixas marginais durante o soergimento do Alto Paranaíba. Essa unidade é descrita como uma sucessão composta principalmente por arenitos grossos e conglomeráticos, apresentando grãos angulosos e mal selecionados, com presença de minerais pesados e uma variada matriz, com ocorrências de silte.

6.3.5 COBERTURAS DETRÍTICO-LATERÍTICAS

Esta unidade ocorre onde a topografia se encontra mais elevada, sendo representada por sedimentos inconsolidados de granulometria cascalho, areia e silte. Sua origem em sua maioria, correspondem a sedimentos inconsolidados de origem coluvionar e clástico-terrígena (CODEMIG, 2017)

Entre o Paleoceno e o Oligoceno houve uma peneplanização na região referente ao Triângulo Mineiro, no momento de formação da Superfície Sul-Americana. A partir disso houve um soerguimento e dissecação desta área, o que fez com que surgissem chapadas e planaltos, que em conjunto com o clima árido, são responsáveis pela laterização dessas coberturas, sendo um fator importante no processo de manutenção do relevo (SEER; MORAES, 2017) e desenvolvimento de solo, devido ao aplainamento e o menor aporte de água (principal agente de modificação do relevo). Esta camada pode superar 30 metros de espessura e possui idade Paleógeno/Neógeno (CHAVES; DIAS, 2017).

Essa compreende detritos quartzo-silto-arenosos avermelhados a amarelados, com granulação fina a média, sedimentos arredondados a angulosos, sem orientação e mal classificados, e ainda com grãos de óxidos dispersos. Espessas carapaças ferruginosas, de até 2 metros, aparecem associadas a esses depósitos (CODEMIG, 2017).

6.4 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

Na região do Triângulo Mineiro, com base nos estudos de Baccaro et al. (2004) e Silva (2010), foram identificadas duas unidades morfoestruturais: o Complexo Granito-Gnáissico e Metassedimentar e a Bacia Sedimentar do Paraná.

O Complexo Granito-Gnáissico e Metassedimentar, localizado no nordeste do Triângulo Mineiro, ao longo do vale do rio Paranaíba, entre as usinas de Itumbiara e Emborcação. Esta unidade é formada por rochas granito-gnáissicas do Complexo Maratá e metassedimentos do Grupo Araxá, sendo altamente dissecada, conforme a classificação de Ross (1992) como "Planalto Dissecado do Paranaíba".

O Canyon do Rio Araguari, nessa unidade, possui relevo acentuado, com vertentes íngremes, corredeiras e cachoeiras. As altitudes variam de 500 metros nas áreas mais baixas a 900 metros nas bordas das chapadas. A região apresenta alta densidade de drenagem, grande suscetibilidade à erosão e solos hidromórficos, como o Argissolo vermelho-amarelo, comuns próximos aos canais fluviais.

A Bacia Sedimentar do Paraná: Situada a oeste do Triângulo Mineiro, composta por rochas sedimentares e vulcânicas, subdivide-se em duas unidades morfoesculturais: o Planalto Tabular e o Planalto Dissecado. O Planalto Tabular, localizado entre Uberlândia e Araguari, está em altitudes de 950 a 1050 metros, com topos amplos e planos, baixa densidade de drenagem e vertentes de baixa declividade (3-5°), sustentadas por arenito da Formação Marília. Os vales são largos, com fundos úmidos e drenagem anastomosada.

Os solos predominantes são Latossolos Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo, de textura argilosa. O Planalto Dissecado, com altitudes entre 700 e 900 metros e declividades de 5 a 12°, apresenta maior rugosidade, resultado da erosão causada pelas drenagens regionais. Nesta unidade, encontram-se Latossolos Vermelho Distrófico e Eutrófico, além de Cambissolos Háplicos.

6.5 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A hidrografia da Bacia do Rio Araguari, localizada na região de estudo, tem origem no município de São Roque de Minas e se estende por cerca de 475 km, integrando a Bacia Hidrográfica do Paranaíba (FERREIRA, 2005). O Rio Araguari é um dos principais afluentes da margem esquerda do Rio Paranaíba, desempenhando um papel vital na regulação hídrica das regiões sul e sudeste, contribuindo com cerca de 43% da demanda de água dessas áreas. Sua vazão média é de 300 m³/s, sendo a segunda maior da região (BERTOL, 2007).

A maior parte da área estudada está na Província Hidrogeológica do Paraná, uma das regiões de maior produtividade aquífera no Brasil. Os aquíferos de destaque são o Serra Geral e o Bauru.

O Aquífero Serra Geral, composto principalmente por basaltos, é semiconfinado pela Formação Marília e apresenta características de aquífero fissural (OLIVEIRA, 2002). Já o Aquífero Bauru, localizado sobre os basaltos da Formação Serra Geral, é não confinado e está associado a camadas areno-argilosas e areno-conglomeráticas (OLIVEIRA, 2012), sendo responsável por mais de 90% dos poços de abastecimento de água em Araguari (OLIVEIRA, 2002).

As regiões inseridas em uma superfície mais plana, recoberta por solos e coberturas quaternárias de permeabilidade elevada. Nessas condições a maior parte das precipitações se infiltra através do solo e migra diretamente até o aquífero Marília e Serra

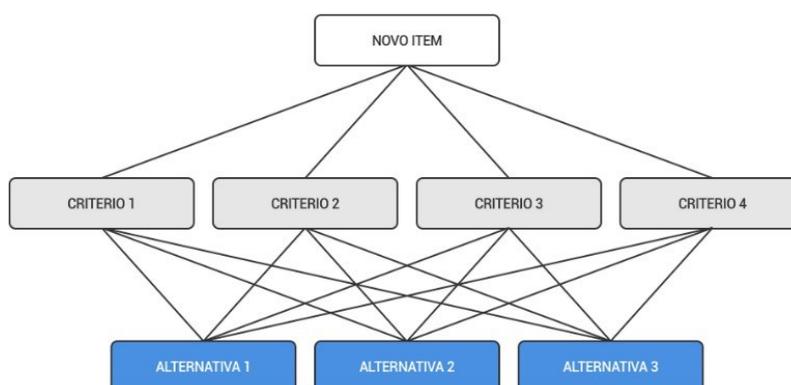
Geral, alimentando sua zona saturada e provendo uma vazão elevada de água (OLIVEIRA, 2012).

6.6 AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS)

A tomada de decisão considerando muitas variáveis é uma realidade quando se tem uma ampla gama de dados disponíveis. Esses problemas geralmente exigem a avaliação de critérios espaciais que garantam uma decisão mais adequada à realidade local (DROBNE; LISEC, 2009). A análise multicritérios com abordagem espacial têm sido comumente utilizada para planejamento do desenvolvimento, ocupação e uso da terra, no estudo e seleção de áreas aptas a diferentes usos (COLLINS; STEINER; RUSHMAN, 2001).

Um dos métodos mais difundidos de análise em multicritério é o método AHP. Essa metodologia analisa matematicamente comparações pareadas entre fatores em conjunto aos julgamentos e pesos para avaliar critérios qualitativos. Assim, são identificados fatores ou atributos que, quando selecionados, são organizados hierarquicamente, de modo que o objetivo ou solução para o(os) problema(as) seja alcançado (SAATY, 1990).

Figura 5 - Estrutura Hierárquica do Método AHP



Adaptado Saaty, 1990.

Após a definição da estrutura hierárquica do problema, que segue uma lógica na atribuição de pesos, em que estes pesos são determinados a partir da análise feita por especialistas e dados estatísticos.

Figura 6 - Escala de importância relativa de Saaty.

Escala numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos elemento são de igual importância.	Ambos elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões.
Incremento 0.1	Valores intermediários na graduação mais fina de 0.1.	Usados para graduações mais finas das opiniões.

Fonte: ROCHE, 2004.

Tem-se, portanto, a construção de uma matriz comparativa onde os critérios podem ser avaliados, comparando-os dois a dois, seguindo as definições da escala de importância proposta por Saaty.

Figura 7 - Exemplo de matriz de comparação (Saaty 1987).

	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	$1/\Sigma_1$	$a_{1,2}/\Sigma_2$	$a_{1,n}/\Sigma_3$
Critério 2	$a_{2,1}/\Sigma_1$	$1/\Sigma_2$	$a_{2,n}/\Sigma_3$
Critério 3	$a_{n,1}/\Sigma_1$	$a_{n,2}/\Sigma_2$	$1/\Sigma_3$

O vetor de Eigen (ou vetor de prioridade) é o parâmetro para determinar a contribuição de cada critério na formação do resultado, apresentando os pesos relativos entre os critérios. Esse vetor pode ser obtido pela média aritmética dos valores normalizados de cada um dos critérios e subcritérios definidos.

Figura 8 - Cálculo aproximado do vetor de Eigen (λ) (Vargas 2010).

Vetor aproximado de Eigen (λ)	
Critério 1	$\lambda_1 = (1/\Sigma_1 + a_{2,1}/\Sigma_1 + a_{n,1}/\Sigma_1)/n$
Critério 2	$\lambda_2 = (a_{1,2}/\Sigma_2 + 1/\Sigma_2 + a_{n,2}/\Sigma_2)/n$
Critério 3	$\lambda_3 = (a_{1,n}/\Sigma_3 + a_{2,n}/\Sigma_3 + 1/\Sigma_3)/n$
Total (Σ)	1

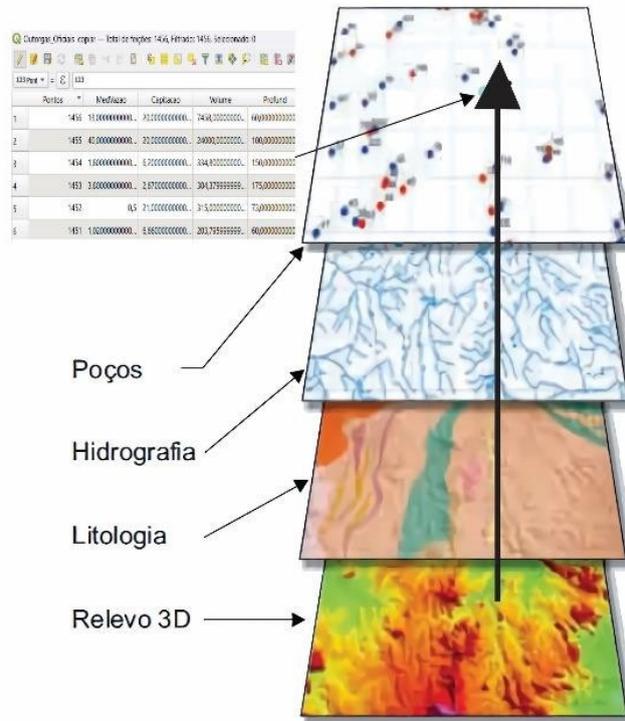
6.7 MÉTODO AHP EM AMBIENTE SIG

O método AHP em combinação com o ambiente SIG, quando analisados em conjunto, cada uma dessas camadas, ou mapas temáticos, representam um nível específico de informação sobre diferentes aspectos ou propriedades de um objeto ou fenômeno real.

Essas camadas são organizadas em um banco de dados geográficos, sendo possível que as informações sejam analisadas, relacionadas e combinadas, como se tivessem sobrepostas. (GOMES apud FEITOSA, 2008).

Ao utilizar a Calculadora Raster no QGIS, que é uma ferramenta que realiza operações matemáticas em cada célula, que foi utilizada para integrar todos os mapas temáticos. Ao ocorrer sobreposição das camadas, há um relacionamento 1:1 entre os elementos gráficos e seus atributos. Como os mapas temáticos estão hierarquizados, as informações sobrepostas terão valores que influenciarão no resultado final da pesquisa.

Figura 9 - Representação de como funciona a formação de um resultado pela AHP em ambiente SIG.



Adaptado Feitosa et al., 2008.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 MAPA LITOLÓGICO

A litologia desempenha um papel importante na determinação da qualidade e quantidade das águas subterrâneas em uma determinada região. Isso ocorre porque a composição das rochas influencia diretamente na capacidade de infiltração e armazenamento da água, levando em conta a porosidade e permeabilidade da rocha, bem como os constituintes químicos presentes em sua composição mineralógica (FEITOSA et al., 2008).

Na área de estudo foram encontradas cinco variedades de rochas, em que as sedimentares vão ser as mais significativas no quesito de favorabilidade hídrica. As rochas ígneas e metamórficas terão uma importância menor dentro da litologia em relação

a disponibilidade de água subterrânea, com tudo esse tipo de rocha contará com a porosidade secundária através do regolito e dos sistemas de fraturas representados pelos lineamentos estruturais.

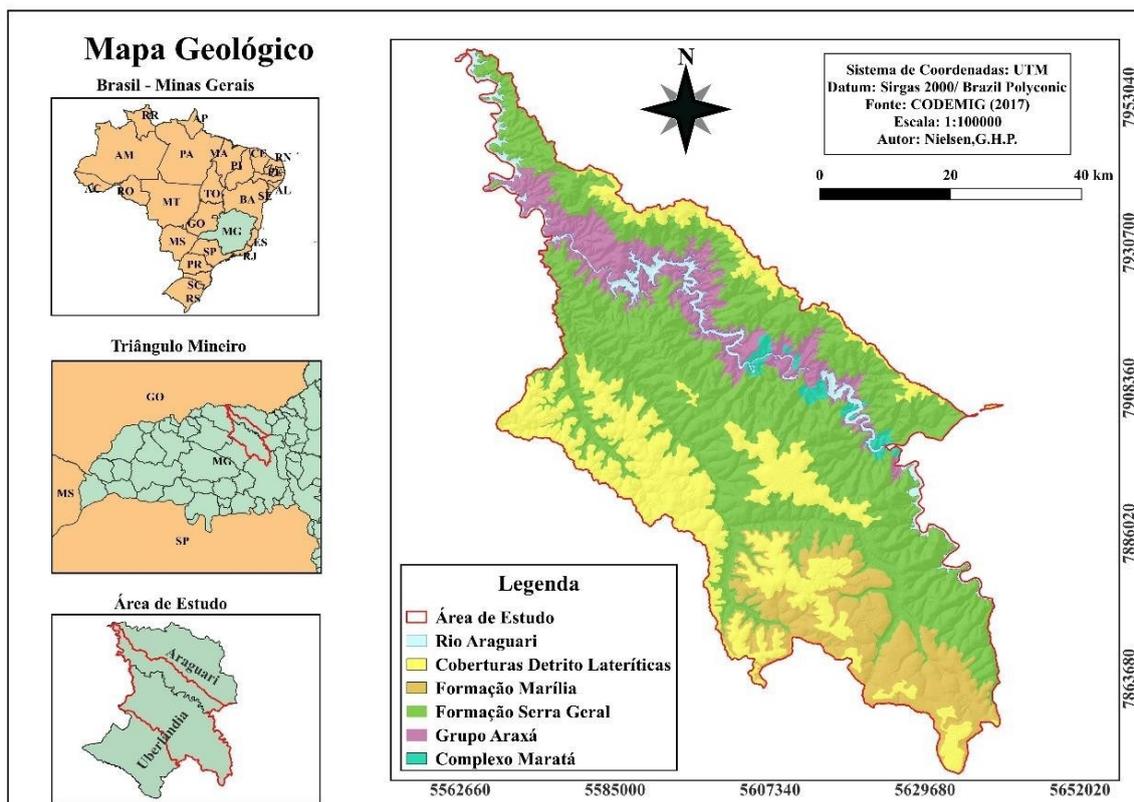
O mapa litológico foi gerado a partir de um mapeamento realizado na escala de 1:100.000 na região do Triângulo Mineiro, abrangendo os municípios de Uberlândia, Araguari e Indianópolis. Para que a apresentação do mapa fosse mais condizente com a área de estudo, o mapa litológico foi adaptado do mapeamento realizado pela CODEMIG no ano de 2017 e apresentou cinco domínios litológicos, sendo eles, Complexo Maratá, Grupo Araxá B, Serra Geral, Arenito Marília e Coberturas Detrito - Lateríticas.

No domínio Complexo Maratá, foi observado a presença de granitos porfíricos, metagranitos foliados, augen-gnaisses. Para o Grupo Araxá B, foram constatados xistos. Ambas as unidades são pertencentes a Faixa de Dobramentos Brasília e compõem o embasamento cristalino da área de estudo. Essas rochas se localizam em porções nordeste na Bacia do Rio Araguari, com altitudes de 500 a 650 metros, e em regiões com alta dissecação sendo estabelecida no Canyon do Rio Araguari.

No domínio Serra Geral, foram observados basaltos (Grupo São Bento) e arenitos da Formação Marília (Grupo Bauru), que são rochas pertinentes da Bacia Sedimentar do Paraná. A Formação Serra Geral aflora por uma extensa área, sendo a litologia melhor representada na área de estudo, não sendo localizada no canal principal do Rio Araguari e em porções sudeste e sudoeste.

Essa unidade se encontra nas cotas de 650 a 850 metros ocupando áreas com média dissecação e fazem contato em porção superior com o arenito Marília, onde as coberturas lateríticas se localizam nas cotas mais altas, de 900 metros, em que se desenvolveu sobre o Grupo São Bento e Bauru. Já as coberturas Detrito - Lateríticas são consideradas coberturas quaternárias.

Figura 10 - Mapa Litológico da área de estudo.



Adaptado CODEMIG, 2017.

Dessa forma, seguindo os estudos de FEITOSA et al., 2008, em ordem de maior para menor potencial hídrico subterrâneo, o arenito Marília foi considerado como o litotipo de maior significância, seguido pelas coberturas, basaltos, xistos e gnaisses, respectivamente.

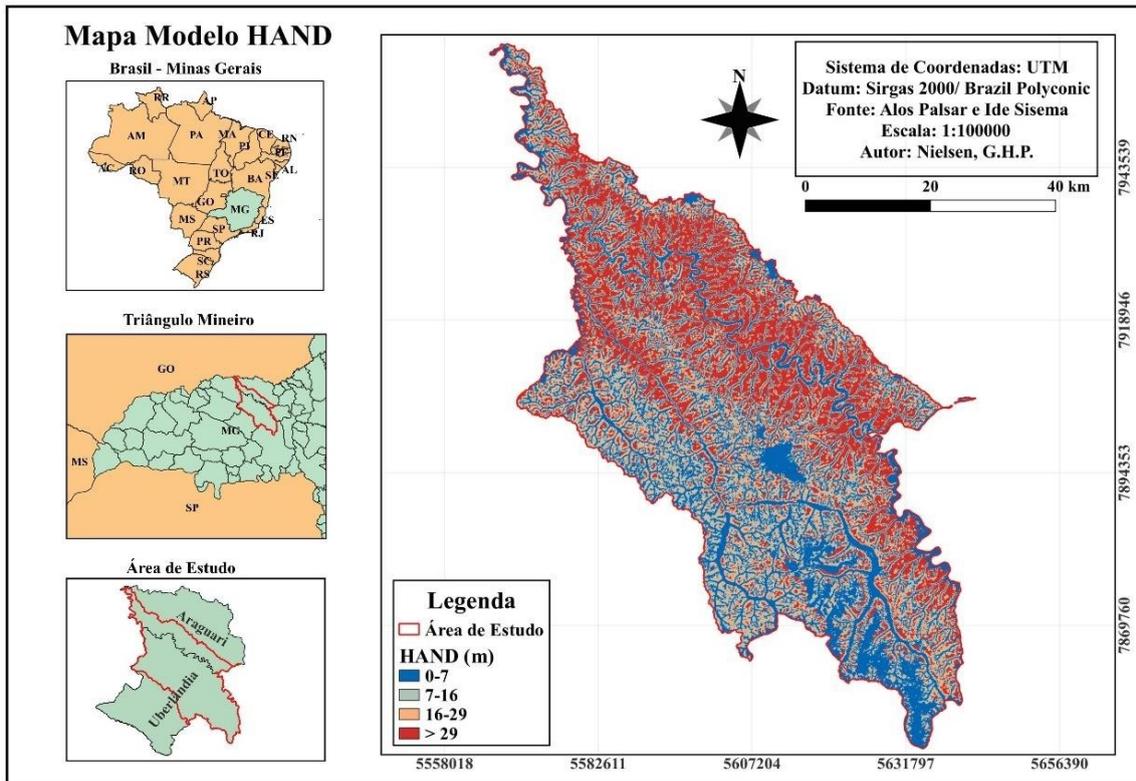
7.2 MAPA HAND

O método HAND é um parâmetro útil para estimar a profundidade da água, especialmente em aquíferos fraturados devido à topografia variada. Isso permite calcular as altitudes relativas em relação à topografia do terreno e, conseqüentemente, a profundidade do lençol freático (NOBRE *et al.* 2011).

O HAND é empregado em estudos referentes a riscos geológicos, mais especificamente áreas suscetíveis a inundação (GHARARI *et al.* 2011). Esse modelo hidrogeológico está intimamente ligado à profundidade do lençol freático, sendo também útil para estudos de prospecção hidrogeológica, como na determinação de áreas mais favoráveis para a produtividade de aquíferos (BRITO., 2018).

Para classificar o mapa HAND elaborado, foi empregado o método de quebras naturais (Jenks) para realizar um ajuste melhor na distribuição dos dados, considerando as características específicas da região. Esse tipo de classificação permite a formação de agrupamentos naturais que refletem as variações presentes nos dados.

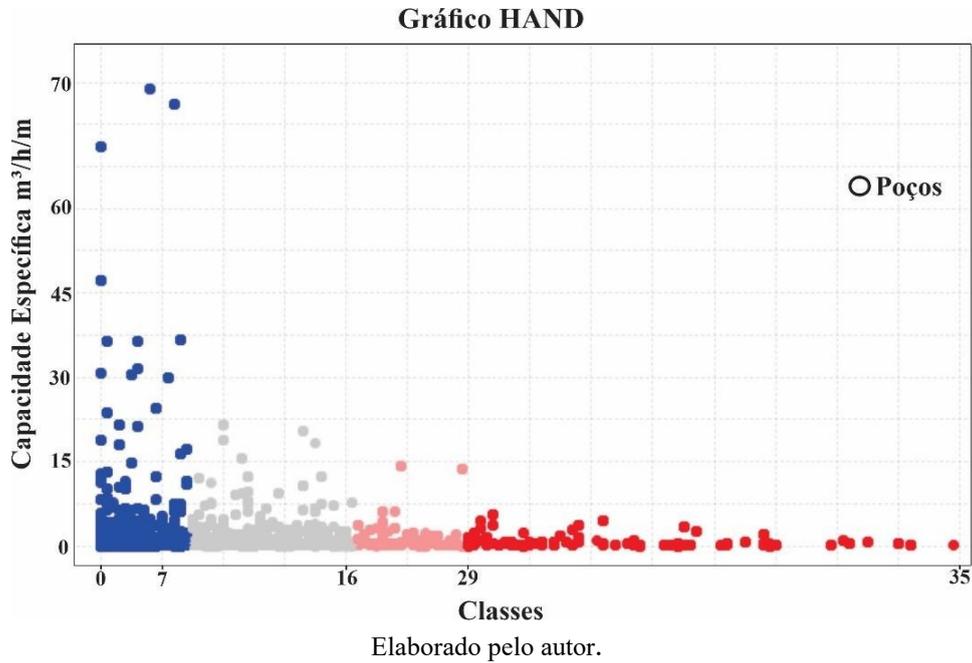
Figura 11 - Mapa Modelo HAND.



Elaborado pelo autor.

Neste mapa, Figura 11, foram atribuídas quatro classes, 0–7 m, 7–16 m, 16–29 m e >29 m. Utilizando o software ioGAS, e comparando as classes determinadas com a capacidade específica dos poços, percebe-se pelo gráfico de dispersão que a classe de 0 a 7 metros de fato é a mais eficaz para obtenção de água subterrânea, seguida pelas demais classes.

Figura 12 - Gráfico de dispersão aplicado para as classes HAND e as capacidades específicas dos poços. No gráfico é evidente que as maiores capacidades específicas encontram na classe de 0-7m.

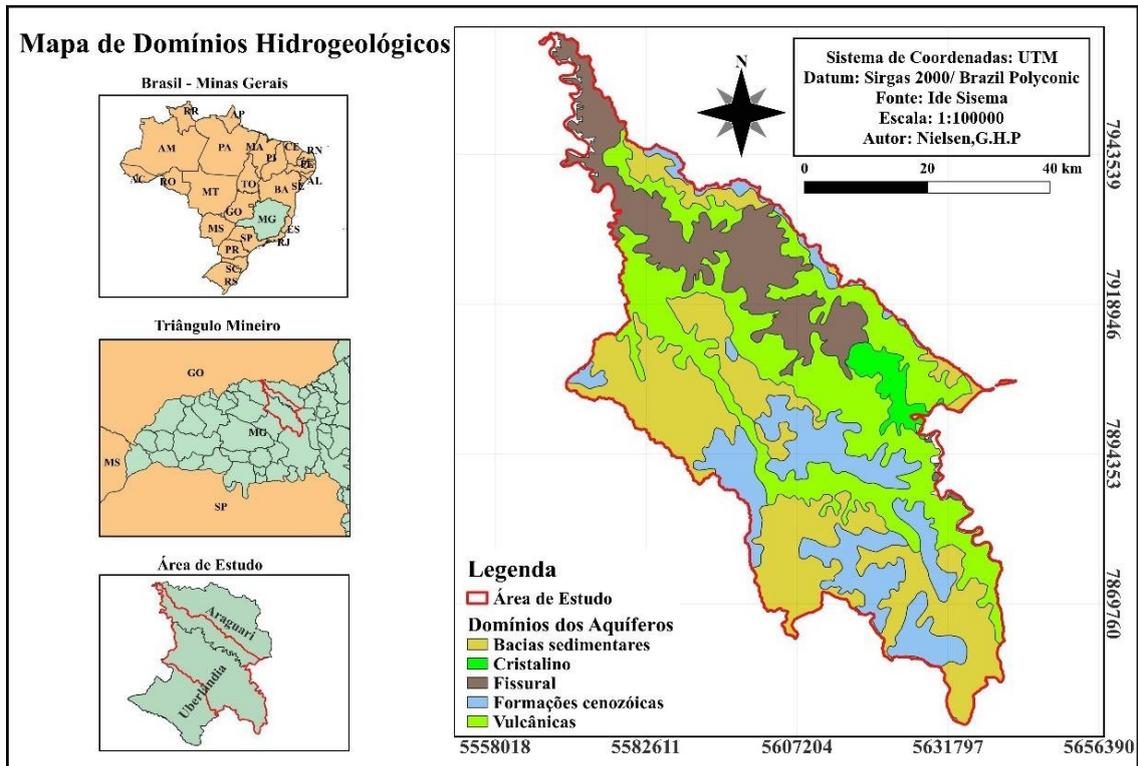


7.3 MAPA DE AQUÍFEROS

Os aquíferos são as unidades geológicas que controlam a movimentação das águas subterrâneas. Tais unidade desempenham um papel fundamental na hidrologia subterrânea, uma vez que são responsáveis pelo armazenamento e fluxo de água subterrânea (FEITOSA et al., 2008).

Segundo (BOMFIN, et al., 2010), na área de estudo são identificados cinco domínios hidrogeológicos: Formações Cenozóicas, Domínio das Bacias Sedimentares, Domínio Fissural, Domínio das Vulcânicas e Domínio Cristalino, conforme Figura 13.

Figura 13 - Mapa de Domínios Hidrogeológicos.



Adaptado Bomfin, 2010.

Os aquíferos das formações Cenozoicas, constituídos por rochas sedimentares de alta porosidade primária, possuem elevado potencial de permeabilidade. Eles estão associados a depósitos do Quaternário e Terciário, como aluviões, coluviões, depósitos eólicos e areias litorâneas, entre outros (BOMFIN, 2010).

O domínio das Bacias Sedimentares inclui sequências de rochas sedimentares, às vezes associadas a vulcanismo, com alta porosidade e permeabilidade, formando aquíferos porosos com grandes reservatórios de água subterrânea e vazões significativas (BOMFIM, 2010).

Os aquíferos de rochas vulcânicas e metavulcânicas de baixo grau metamórfico possuem comportamento fissural, com anisotropia e estruturação que favorecem a porosidade secundária. Em algumas, há porosidade primária devido a estruturas vesiculares, conferindo-lhes um potencial hidrogeológico superior ao dos metassedimentos e metavulcânicas (BOMFIM, 2010).

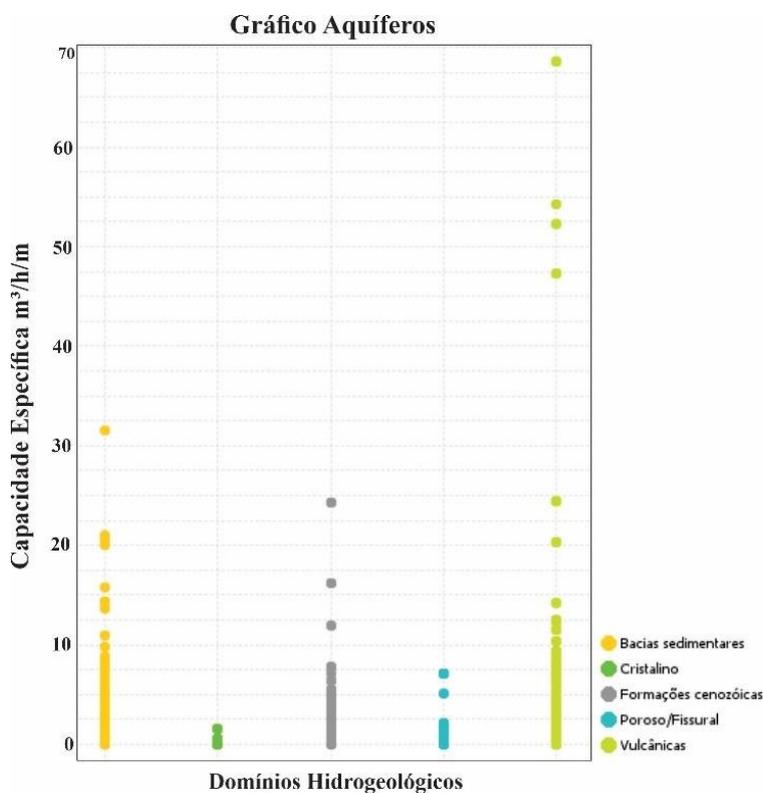
Os aquíferos dos domínios de Metassedimentos e Metavulcânicas incluem rochas como xistos, filitos e quartzitos, formando aquíferos fissurais com porosidade secundária em fraturas e fendas, o que gera reservatórios aleatórios. Apesar de serem

semelhantes ao Cristalino tradicional, seu comportamento reológico distinto aumenta seu potencial hidrogeológico (BOMFIM, 2010).

No Cristalino, com predominância de granitóides e gnaisses, os aquíferos fissurais apresentam baixa porosidade primária e dependem de fraturas para armazenar água, resultando em reservatórios pequenos e descontínuos. Os poços, assim, produzem vazões baixas e água frequentemente salinizada, tornando este domínio o de menor potencial hidrogeológico entre os aquíferos fissurais (BOMFIM, 2010).

Os poços da área de estudo foram classificados com base nos diferentes domínios hidrogeológicos. Observa-se no gráfico, Figura 14, que os aquíferos do domínio das rochas vulcânicas apresentam as maiores capacidades específicas, seguidos pelos aquíferos das bacias sedimentares. Logo após, destacam-se os aquíferos das formações Cenozoicas, enquanto as menores capacidades específicas foram observadas nos aquíferos porosos ou fissurais e por último, nos aquíferos do domínio cristalino. Essa análise considerou tanto a quantidade de poços em cada classe quanto a constância da variação dos dados.

Figura 14 - Gráfico de dispersão comparando os aquíferos existentes na área com a capacidade específica dos poços.



Elaborado pelo autor.

7.4 MAPA DE DENSIDADE DE LINEAMENTOS

Manifestações lineares, conhecidas como lineamentos, podem ser identificados através de técnicas de sensoriamento remoto (FASHAE et al., 2014). Esses lineamentos e seus pontos de interseção, desempenham um papel significativo na distribuição e movimentação das águas subterrâneas, especialmente em áreas onde predominam rochas cristalinas (FERNANDES, 2008).

De acordo com (FASHAE et al., 2014), os lineamentos estruturais funcionam como condutos que facilitam o movimento das águas subterrâneas, o que pode resultar no aumento da porosidade secundária das rochas locais, tornando-se assim um fator importante na identificação de zonas potenciais para recursos hídricos subterrâneos.

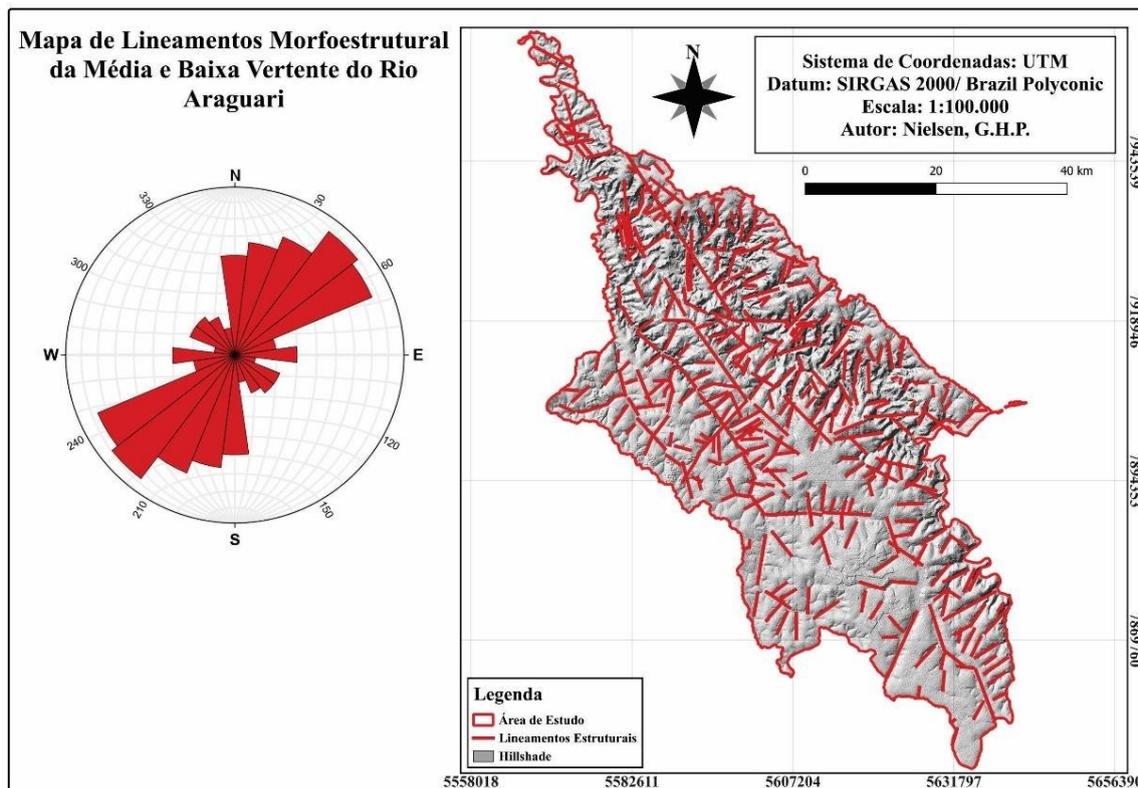
Foram elaboradas cinco abordagens para a obtenção dos lineamentos, em que foram divididos em morfoestruturais e geofísicos superficiais e de profundidade. Os lineamentos morfoestruturais e geofísicos foram interpretados de forma integrada, assim sendo relacionados com os poços encontrados na área, levando em consideração os lineamentos que cortam os poços. Os lineamentos que passam pelos poços de maior produtividade, foram as feições lineares que controlam as maiores eficiências hídricas.

7.4.1 LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS

O hillshade (relevo sombreado) foi utilizado com a finalidade de compreender as variações do relevo e identificar a ocorrência de lineamentos morfoestruturais. De acordo com (RIBEIRO et al., 2011), as imagens de relevo sombreado são as mais apropriadas para a identificação de lineamentos por não apresentarem feições superficiais da cobertura vegetal e estradas, que podem influenciar na interpretação.

O acréscimo do diagrama de roseta, proporcionou uma visualização clara da preferência da direção desses lineamentos. Foram interpretados 370 lineamentos, conforme Figura 15, e foram constatadas quatro famílias de lineamentos que se destacaram.

Figura 15 - Mapa de lineamentos morfoestruturais e roseta de suas direções



Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no mapa, os lineamentos com direção NE-SW de azimutes 25° a 60° são maioria, compondo a primeira classe com 118 lineamentos. Já as direções que tendem a N-S, mais especificamente NNE-SSW 0° - 25° , compõem a segunda classe de maior destaque, com cerca de 43 lineamentos, logo seguida por NNW-SSE 350° - 360° com 38 lineamentos.

A terceira classe é definida por lineamentos de direção NW-SW de azimute 300° - 350° com 53 estruturas, em que se destaca os lineamentos de maior distância. A classe com menor quantidade de lineamentos foi a de direção ENE-WSW de azimute 60° - 80° , com 40 lineamentos catalogados.

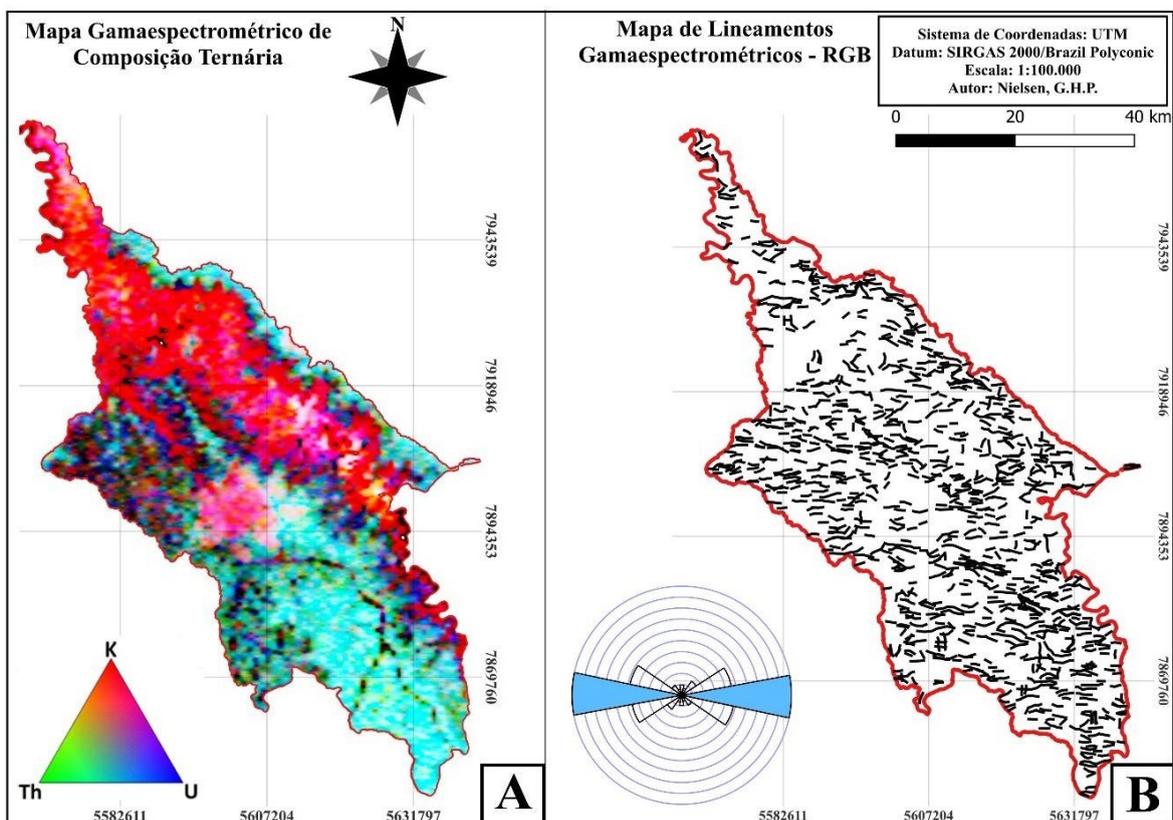
7.4.2 LINEAMENTOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Para a interpretação dos padrões gamaespectrométricos foi utilizado o mapa de composição ternária K-Th-U, Figura 16 A, e mapa de canal de tório (Th), Figura 17 A.

No mapa ternário, os dados apresentaram dois padrões distintos. Na porção norte, nordeste e a faixa que vai de noroeste a sudeste, foi apresentado alto teor de potássio (cor vermelha) corresponde às áreas em que ocorrem afloramentos rochosos. Na porção sul, sudeste, extremo norte e nordeste da área de estudo, ocorre um alto teor de urânio e tório (cor azul-esverdeado), que corresponde às áreas com predomínio de cobertura sedimentar.

Sendo assim, foram obtidos 976 lineamentos para o mapa ternário, através da extração automática de feições lineares do programa PCI Geomatica, com direção dominante para E-W e azimutes de 80 a 100° e 260 a 280°, tendo 408 lineamentos nesse quadrante, conforme Figura 16 B.

Figura 16 - Mapa gamaespectrométrico – RGB (A) e mapa de lineamentos RGB (B).



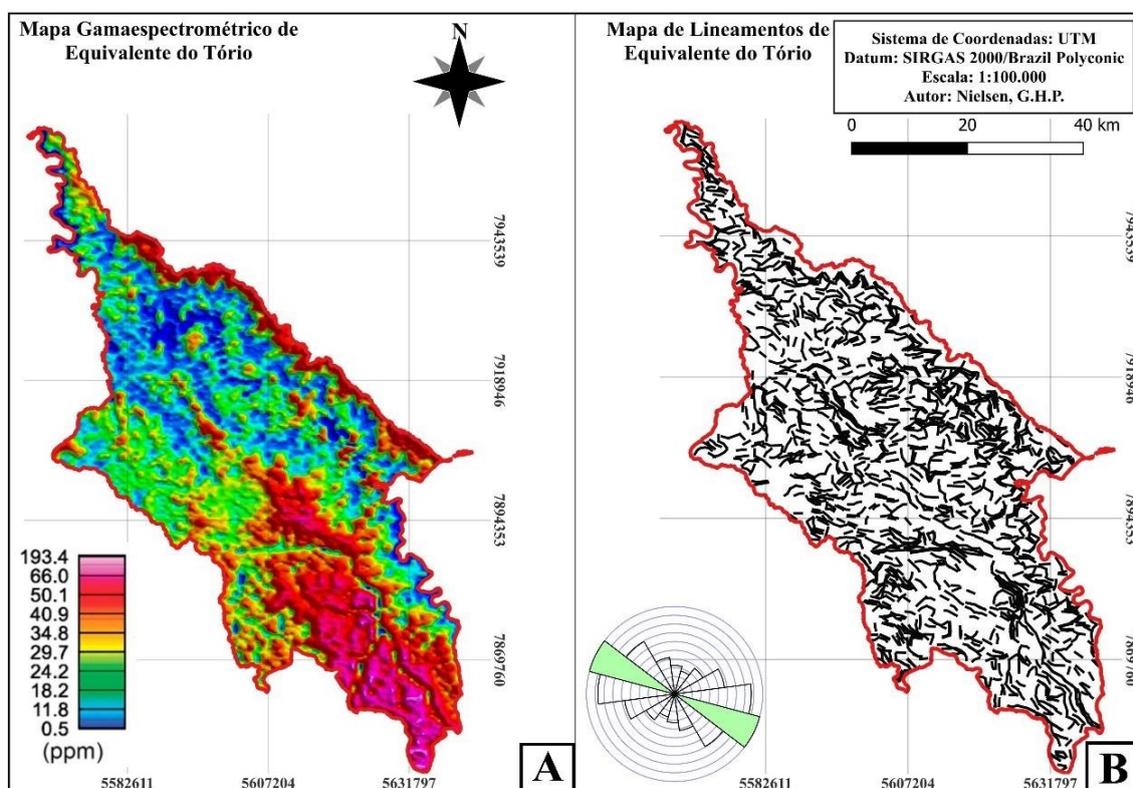
Elaborado pelo autor.

O mapa do canal de tório foi utilizado por apresentar energia maior que os demais elementos, potássio (K) e de urânio (U), permitindo melhor detecção dos lineamentos (BRITO, 2018). Os minerais enriquecidos em tório são geralmente resistatos e possuem mobilidade reduzida ao intemperismo, concentrando-se assim nos sedimentos residuais em regiões de clima tropical, ou em areias (ATLAS, 2021).

A área mais ao norte e partes sul e sudeste, exibem altas concentrações de tório, conforme indicado pelas cores vermelhas e rosas no mapa. Regiões mais ao norte, leste, oeste e noroeste apresentam concentrações moderadas a baixas de tório, refletidas pelas cores verdes e azuis.

As feições lineares do tipo Th, foram traçados com auxílio do software PCI Geomatica, resultando em 1461 lineamentos na área de estudo, Figura 17 B. O diagrama de rosetas indicou a direção preferencial de WNW-ESSE e azimute 100 – 140° e 280 a 320°, constituindo 511 linhas.

Figura 17 - Mapa gamaespectrométrico do equivalente tório (A) e mapa de lineamentos do equivalente tório (B).



Elaborado pelo autor.

7.4.3 LINEAMENTOS MAGNETOMÉTRICOS

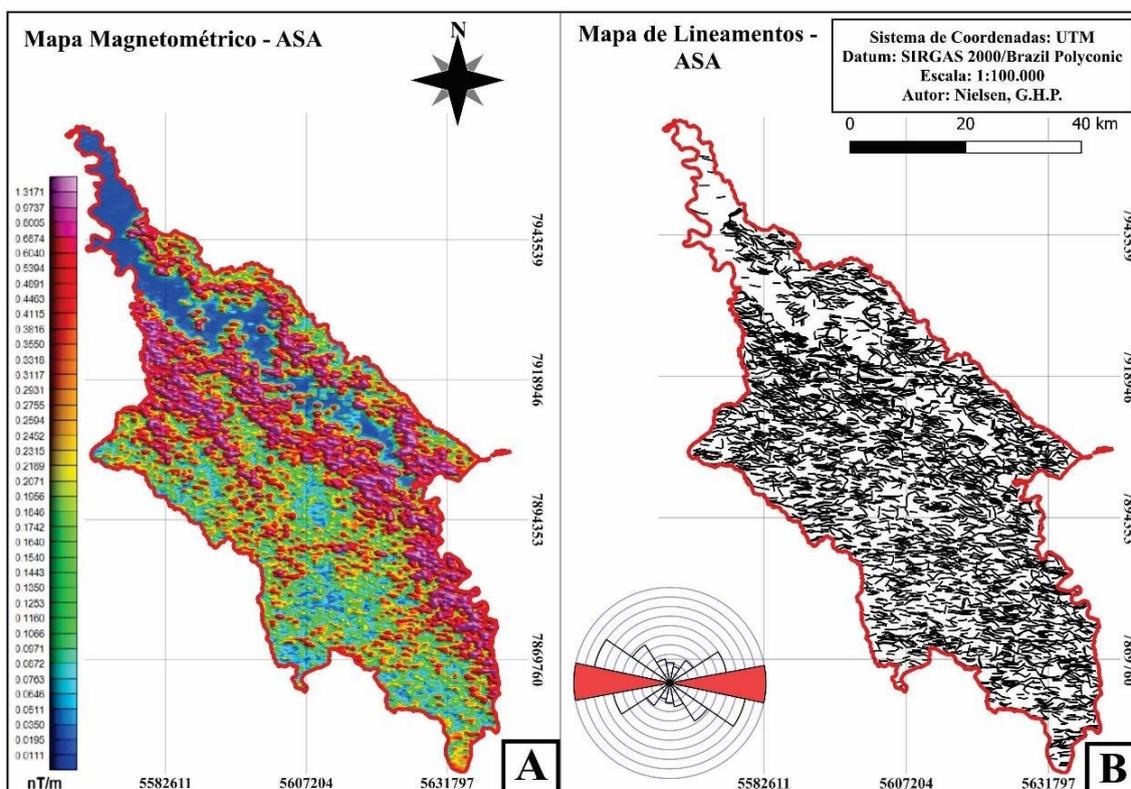
A técnica de magnetometria é útil para estudos de água subterrânea, permitindo identificar estruturas geológicas que influenciam a formação de depressões tectônicas e atuam como barreiras hidráulicas, segmentando bacias sedimentares. Em rochas cristalinas, alinhamentos magnéticos indicam falhas e fraturas, auxiliando na localização de áreas promissoras para aquíferos fraturados (ATLAS, 2021).

Foi usado o mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) devido ao seu comportamento monopolar, exibindo as anomalias de maneira mais nítida e precisa que facilitam a interpretação dos dados e o mapa de Primeira Derivada Vertical, por evidenciar fontes rasas, sendo utilizado para interpretar lineamentos magnéticos.

O mapa magnetométrico-ASA revela três padrões magnéticos distintos na área do Rio Araguari. O primeiro, de alta intensidade (0,542 a 1,193 nT/m) e cor rosa, indica basaltos da Formação Serra Geral. O segundo, de baixa intensidade (0,003 a 0,035 nT/m) e cor azul, coincide com rochas pré-cambrianas na calha do rio. O terceiro padrão, com intensidade intermediária (0,072 a 0,254 nT/m) e cores amarela e laranja, abrange o arenito Marília e coberturas cenozoicas nas partes sul, leste, sudoeste, sudeste e nordeste.

Os lineamentos foram traçados com auxílio do software PCI Geomatica, resultando em 3189 lineamentos na área de estudo, conforme Figura 18 B. Pelo diagrama de roseta se observa que este tem direção preferencial E-W e azimute de 80 a 100° e 260 a 280°, tendo 1323 lineamentos e secundariamente WNW-ESSE, com azimute de 100 a 120° e 280 a 300°, compondo 901 lineamentos.

Figura 18 - Mapa magnetométrico – ASA da área de estudo (A) e mapa de lineamentos ASA (B).



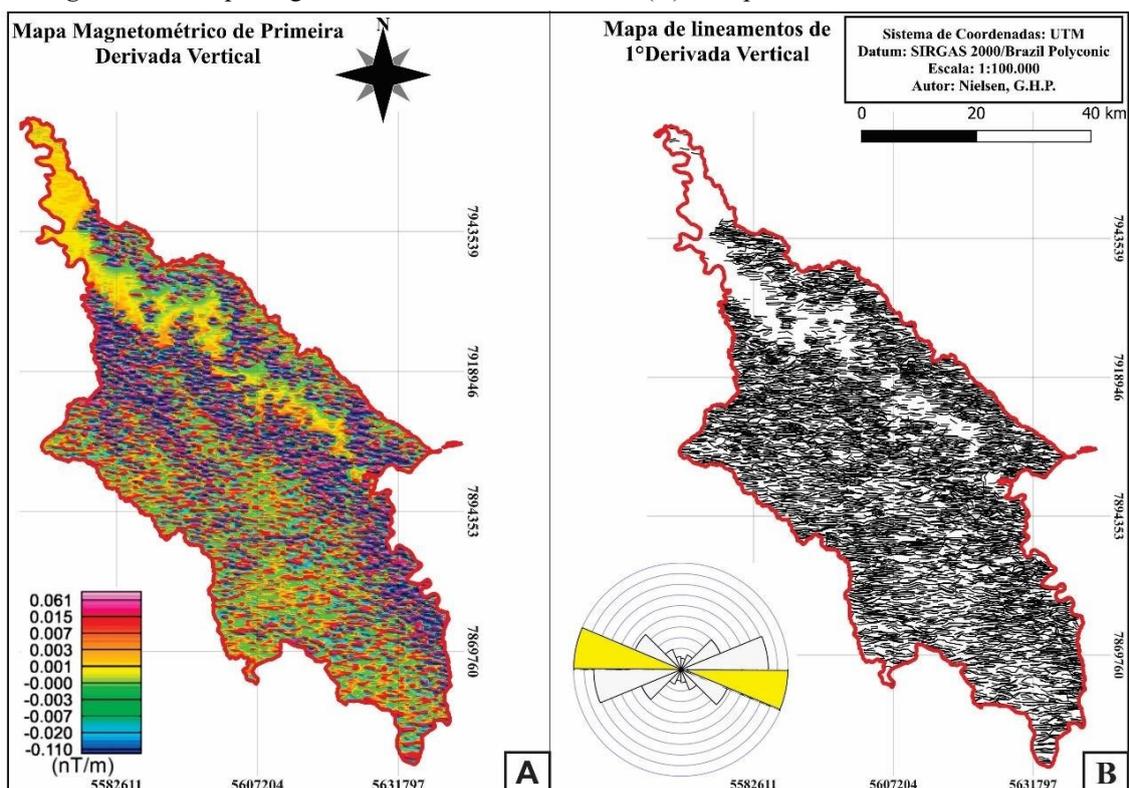
Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de Primeira Derivada Vertical, Figura 19 A, destaca variações magnéticas que indicam estruturas geológicas superficiais. Áreas de alta intensidade (cores arroxeadas) sugerem rochas magnetizadas próximas à superfície, enquanto as de baixa intensidade (cores quentes) pode indicar sedimentos menos magnetizados.

A orientação dos padrões revela alinhamentos estruturais, como falhas, que influenciam o fluxo de água subterrânea. Essas transições magnéticas ajudam a identificar zonas com potencial hidrogeológico, especialmente em aquíferos fraturados.

Os lineamentos foram adquiridos por meio do software PCI Geomatica, apresentando 5036 lineamentos na área de estudo Figura 19 B. Através do diagrama de rosetas é possível observar a existência de um predomínio de direção WNW-ENE e azimute 260 a 280° e secundariamente 100 a 120°.

Figura 19 - Mapa magnetométrico Primeira Derivada (A) e mapa de lineamentos 1° Derivada.



Elaborado pelo autor.

7.4.4 MAPA DE DENSIDADE DE LINEAMENTOS

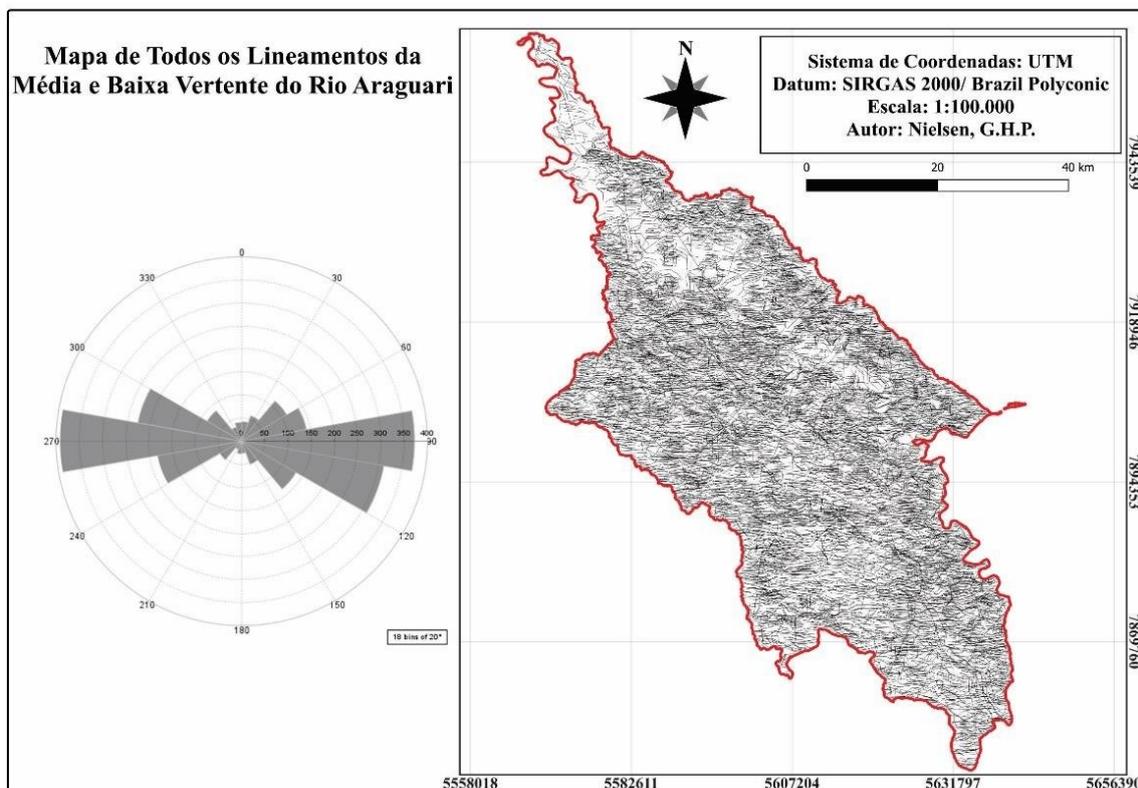
A análise dos lineamentos foi feita de forma integrada, pois as estruturas estão inter-relacionadas. Apesar de algumas não compartilharem a mesma profundidade, as

estruturas mais antigas influenciam as mais recentes, sendo que as primeiras geralmente ocorrem em maiores profundidades. As reativações tectônicas nas estruturas antigas também afetam as formações mais recentes.

A avaliação da direção e azimute para a produtividade hídrica iniciou-se com buffers de 200 metros para os lineamentos integrados. Utilizou-se a ferramenta de vizinho mais próximo no QGIS para associar os azimutes e direções dos lineamentos aos poços e suas capacidades específicas. Esse processo permitiu identificar individualmente os lineamentos que interceptam os poços, podendo haver um ou mais lineamentos associados a um mesmo poço, ou um lineamento influenciando múltiplos poços. Para aumentar a precisão da análise, foi empregado o software ioGAS, garantindo dados geostatísticos mais confiáveis.

O estudo comparou a capacidade específica de cada poço com as direções e azimutes de cada lineamento que intercepta o determinado poço. A capacidade específica dos poços foi dividida em 5 escalas de produtividade, (0-1 m³/h/m), (1-2 m³/h/m), (2-4 m³/h/m), (4-10 m³/h/m) e (10-68 m³/h/m), em que as capacidades acima de 4 m³/h/m foram consideradas satisfatórias.

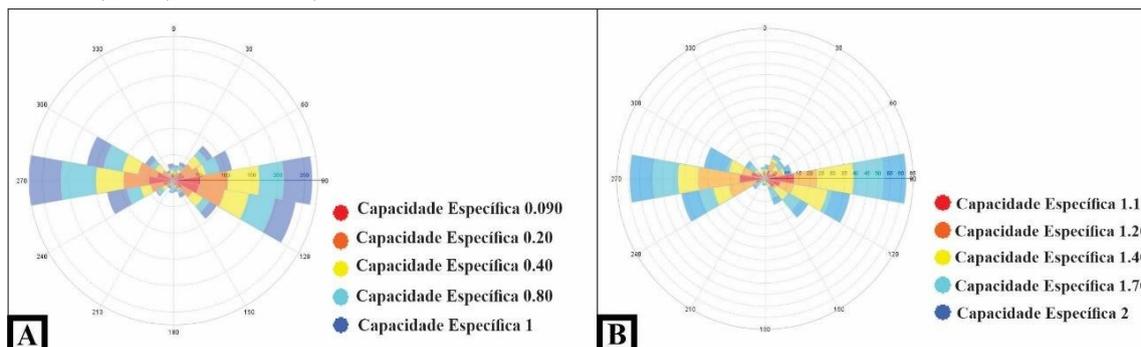
Figura 20 - Mapa e roseta de todos os lineamentos estruturais.



Elaborado pelo autor.

O diagrama de roseta 0-1 m³/h/m, Figura 21 A, teve um destaque para as direções NE-SW, para os azimutes 34 a 60° e 240 a 260°, pois apresentaram poucos poços com produtividades abaixo de 0,20 m³/h/m. A classe de 1 a 2 m³/h/m, Figura 21 B, apresentou o comportamento parecido com o da classe 0-1 m³/h/m, porém, a relevância foi para os azimutes 240 a 260° tendo poucos poços próximos a 1 m³/h/m.

Figura 21 - Estereogramas associados as classes de capacidade específica, A (0-1 m³/h/m), B (1-2 m³/h/m)



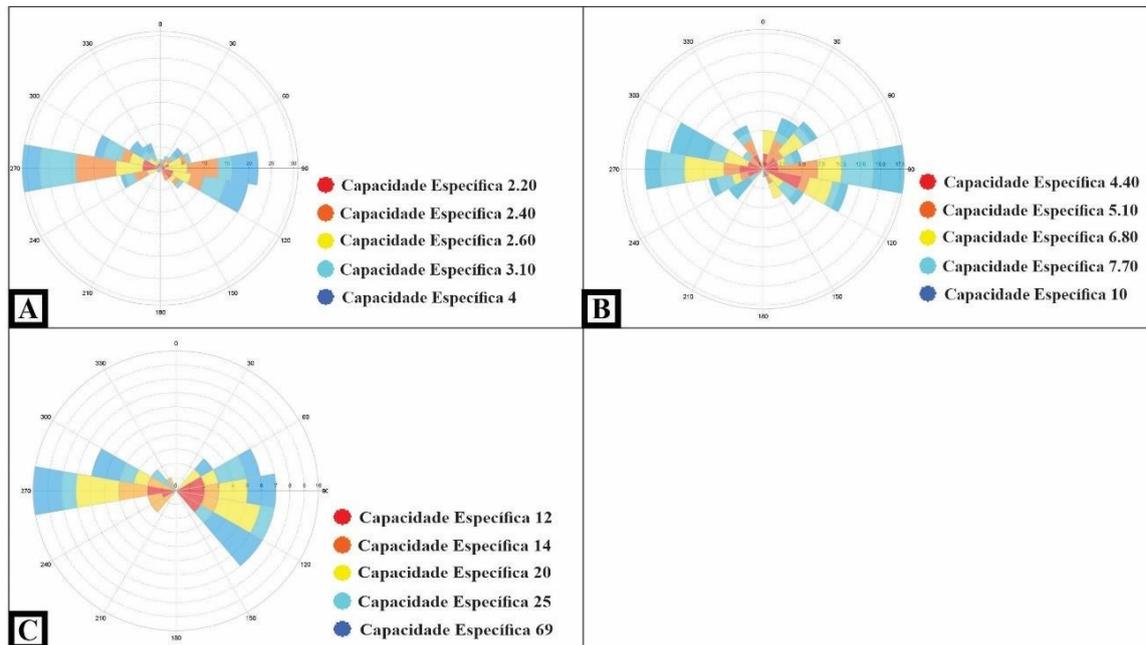
Elaborado pelo autor.

A partir do intervalo 2-4 m³/h/m, Figura 22 A, nota-se as diferenças entre as estruturas, onde os azimutes 260 a 280° detém um número maior de poços. As direções 80 a 120° possuem uma menor quantidade de poços, no entanto apresentam mais poços cuja capacidade específica é próxima de 4 m³/h/m, evidenciando uma qualidade maior nessa direção.

No intervalo de capacidade específica de 4-10 m³/h/m, Figura 22 B, observa-se uma variedade de estruturas, visto que os azimutes 280 a 300° com direção WNW-SSE, apontam a maior qualidade produtiva por terem menos poços presentes nessa direção e estes dispõem as maiores capacidade específicas da classe, e em segundo pelo azimute 80 a 100°.

A roseta respectiva a capacidade específica de 10-68 m³/h/m, Figura 22 C, mostra que embora os lineamentos dos quadrantes de direção NE-SW, E-W, NW-SE e WNW-SSE tenha poços com alta produtividade, as direções 280 a 300° não constatarem capacidades específicas menores que 12³/h/m. O azimute 120 a 140° de direção NW-SE, também se destacou nessa classe, apresentando poços com capacidades específicas acima de 20 m³/h/m.

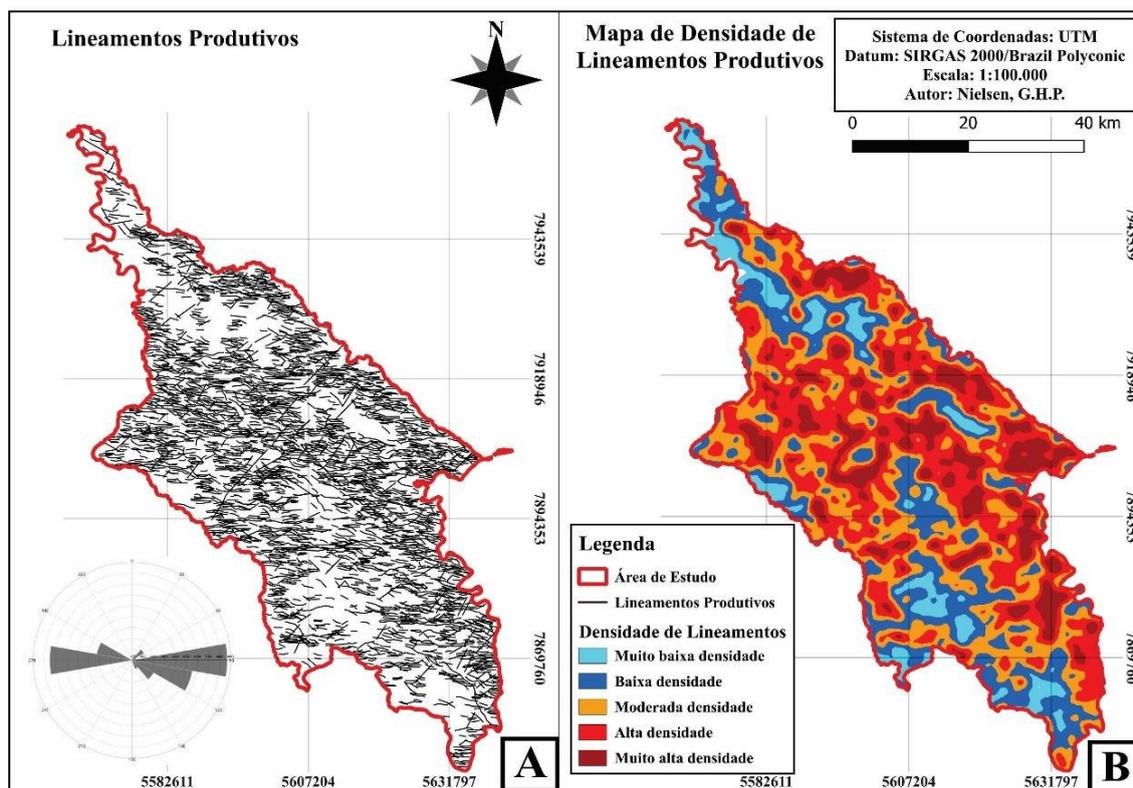
Figura 22 - Estereogramas associados as classes de capacidade específica, A (2-4 m³/h/m), B (4-10 m³/h/m) e C (10-69 m³/h/m).



Elaborado pelo autor.

As direções e azimutes que melhor apresentaram poços produtores foram NE-SW de azimute 25 a 65°, E-W de azimute 80 a 100° e 260 a 280°, WNW-SSE de azimute 100 a 115° e 280 a 295°, NW-SE de azimute 115-155°, conforme Figura 23 A. O mapa final de densidade de lineamentos foi dividido em cinco escalas de agrupamento, sendo a 1 a pior e a 5 a melhor, Figura 23 B.

Figura 23 - A Mapa de lineamentos mais produtivos em relação a águas subterrâneas em e B Mapa de densidade de lineamentos preferenciais



Elaborado pelo autor.

7.5 MAPA DE FAVORABILIDADE HÍDRICA

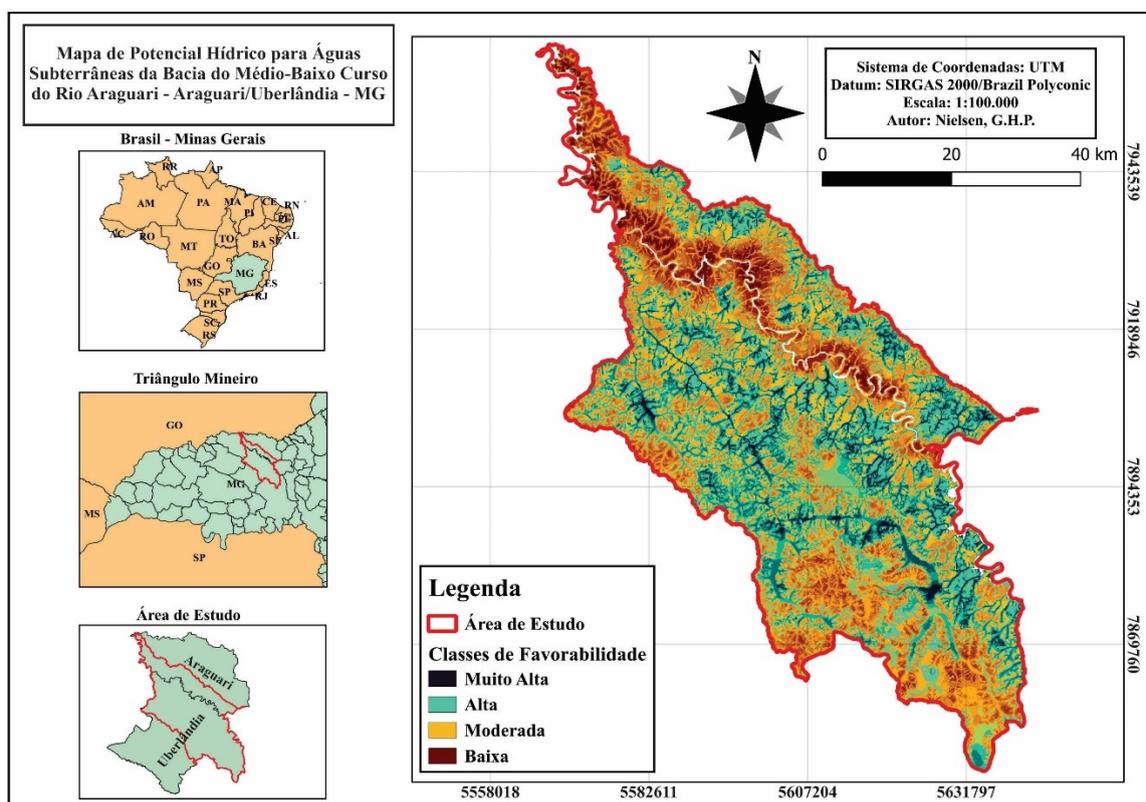
O mapa final de favorabilidade hídrica subterrânea foi gerado a partir da integração dos quatro tipos de mapas apresentados anteriormente através da Calculadora Raster do software QGIS, empregando o método AHP.

Preliminarmente foram atribuídos pesos para os subcritérios de cada mapa, para que, em seguida esses mapas pudessem ser integrados. Entre as classes do mapa litológico os pesos determinados foram: 40% (Arenito Marília), 28% (Coberturas Detrito Lateríticas), 18% (basaltos da Serra Geral) e 7% (xistos do Grupo Araxá e gnaisses do Complexo Maratá).

Para o mapa modelo HAND foram: 47% (0-7m), 28% (7-16m), 16% (16-29m), 9% (acima de 29m). Já o mapa de aquíferos recebeu os seguintes pesos: 43% (vulcânicos), 26% (bacia sedimentar), 16% (coberturas cenozóicas), 9% (poroso/fissural) e 6% (cristalino). E por fim, para a densidade de lineamentos foi determinado: 41% (muito alta densidade), 26% (alta densidade), 16% (moderada densidade), 9% (baixa densidade) e 6% (muito baixa densidade).

Através da calculadora AHP, foram atribuídos os seguintes valores para os mapas, seguindo pelo grau de maior importância: 46% (HAND), 28% (densidade de lineamentos), 16% (aquíferos) e 10% (litologia), baseados nos dados adquiridos através do levantamento bibliográfico.

Figura 24 - Mapa de favorabilidade hídrica subterrânea do médio-baixo curso do Rio Araguari nos municípios de Araguari e Uberlândia, exibindo as zonas de maior potencial



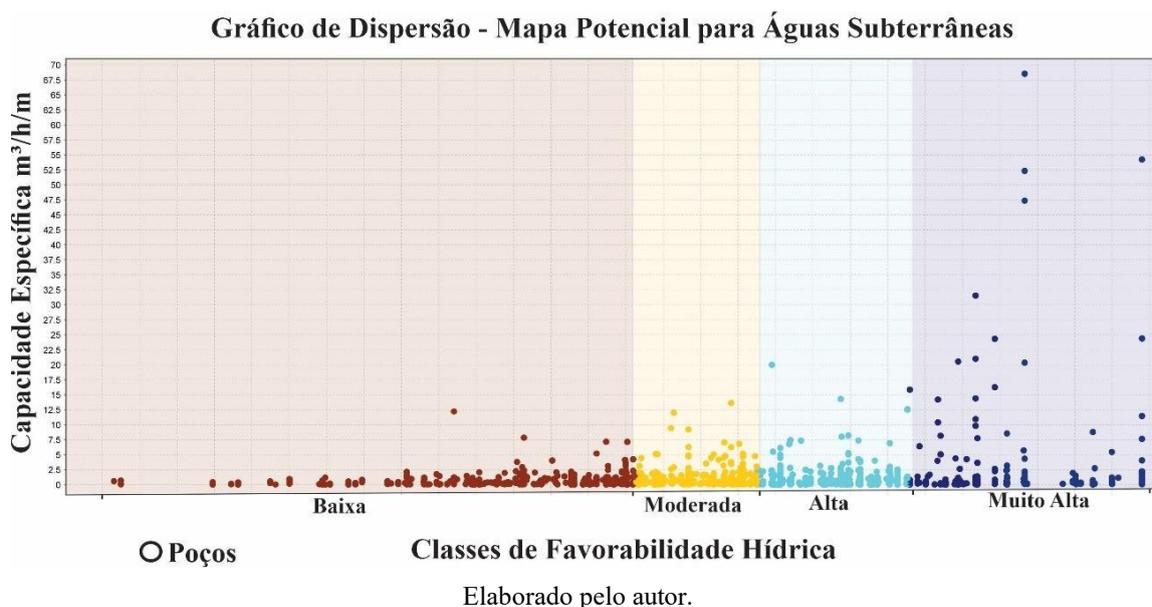
Elaborado pelo autor.

A validação dos resultados, Figura 25, foi efetuada a partir do cálculo da capacidade específica de 1482 poços obtidos no banco de dados hidrogeológicos do IDE-Sisema no ano de 2024, correlacionando com as classes definidas no mapa final. Foram definidas quatro classes de favorabilidade de água subterrânea, baixa, moderada, alta e muito alta, utilizando o método de classificação por quebras naturais (Jenks).

Em áreas consideradas de baixa propensão, observa-se que os poços apresentam capacidades específicas menores. Em contrapartida, os poços com capacidade específica maior tendem a estar localizados em áreas classificadas como de favorabilidade moderada, alta e, principalmente, muito alta.

Entretanto, mesmo que zonas de alta e muito alta favorabilidade hidrogeológica apresentaram a ocorrência de poços com capacidades específicas mais altas, é comum ocorrerem poços de menor capacidade específica. Portanto, é importante ressaltar que a produtividade dos poços não depende apenas das características do aquífero, mas também das condições de perfuração, incluindo a posição em relação às estruturas geológicas.

Figura 25 - Gráfico de dispersão correlacionando com a capacidade específica dos 1442 poços com as classes de favorabilidade hídrica. Destaca-se que os poços mais produtivos estão localizados em áreas de potencial máximo de águas subterrâneas.



8. CONCLUSÃO

A metodologia AHP demonstrou ser uma ferramenta eficaz e versátil para análises hidrogeológicas em áreas extensas, dispondo de baixo custo de aplicação. Esse método foi fundamental para a tomada de decisões, minimizando a subjetividade e os erros na atribuição de pesos durante a integração dos mapas para gerar os modelos de favorabilidade hídrica subterrânea.

A definição dos pesos dos mapas temáticos foi essencial para a criação deste modelo, cuja eficácia foi confirmada pela capacidade específica medida em 1442 poços tubulares na área de estudo, onde os maiores valores de capacidade específica foram encontrados nas áreas de favorabilidade moderada, alta e especialmente muito alta.

O modelo HAND foi considerado o elemento central na integração devido à sua relação com a profundidade do lençol freático. Normalmente, as áreas próximas ao lençol freático coincidem com vales próximos a sistemas de drenagem. Observa-se ainda que regiões de menor altitude, com camadas sedimentares espessas, apresentam um maior potencial para armazenamento e produção de água, garantindo a manutenção da vazão por períodos mais longos. Além disso, onde o lençol freático é menos profundo, a perfuração de poços se torna mais viável economicamente.

O mapa de densidade de lineamentos deixa claro as regiões com maior grau de fraturamentos tanto em subsuperfície quanto em áreas superficiais. Isso acontece porque as estruturas superficiais são correlacionadas com fraturas mais largas, situadas em maiores profundidades. Ao passo que os lineamentos estruturais produtivos, aumenta drasticamente a seleção das áreas com maiores transmissividade.

O mapa de aquíferos se mostrou confiável em relação ao tipo de domínio hidrogeológico existente na área e o perfil estratigráfico retirado dos poços, sendo assim esse mapa ofereceu confiabilidade para a determinação de áreas favoráveis.

O mapa litológico foi o critério classificado como o menos importante para a integração, devido a esse mapa apresentar informações ambíguas. Foram adquiridas inúmeras colunas estratigráficas da área de estudo e perfis estratigráficos que se localizavam em basaltos, apresentando profundidades de até 50 metros de rochas sedimentares, inviabilizando análises de alguns poços nessa litologia.

Os resultados obtidos neste estudo são coerentes e promissores para delimitar de forma inicial áreas com potencial de ocorrência de água subterrânea para perfuração de poços tubulares profundos, uma vez que a geração de mapas de favorabilidade hidrogeológica a partir da integração de multicritérios utilizando de técnicas SIG se mostrou eficiente.

Entretanto, tendo em vista que este trabalho foi realizado somente através de sensoriamento remoto, sugere-se para a sequência do estudo uma maior atividade em campo para compreender melhor a litoestratigrafia da área e agregar informações mais precisas ao método aplicado.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017: Informe 2017. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

ALMEIDA, F. d. et al. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, Special Issue 17, p. 1–29, 1981.

ARONOFF, S. *Geographic information systems: a management perspective*. Ottawa: DL Publications, 1989. 249p. Disponível em https://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html.

BACCARO, Claudete Aparecida Dallevedove. Unidades Geomorfológicas do Triângulo Mineiro. **Revista Sociedade & Natureza. Uberlândia**, v. 3, n. 5, p. 37-42, 1991.

BACCARO, C. A. V.; FERREIRA, I. L.; ROCHA, M. R.; RODRIGUES, S. C. Mapa geomorfológico do Triângulo Mineiro: uma abordagem morfoestrutural-escultural. **Sociedade & Natureza**, v. 13, n. 25, p. 115-127, 2001. DOI:10.14393/SN-v13-2001-29958

BACCARO, C. A. D. et al. Mapeamento Geomorfológico da Bacia do Rio Araguari (MG). In: LIMA, S. do C.; SANTOS, R. J. (Org.) **Gestão Ambiental da bacia do Rio Araguari** – rumo ao desenvolvimento sustentável. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Geografia; Brasília: CNPq, p. 1 – 19, 2004.

BARBOSA, O. Guia das Excursões. 9º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, 1955.

BARBOSA, O. et al., 1967. Projeto Chaminés: geologia da região do Triângulo Mineiro. Petrópolis, Convênio DNPM/PROSPEC, Relatório Final, 116p.

BARBOSA, O. et al., 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. Boletim DNPM/SFPM, n.136, 140p.

BARCELOS, J. H. - 1984 - Reconstrução Paleogeográfica da Sedimentação do Grupo Bauru Baseada na sua Redefinição Estratigráfica Parcial em Território Paulista e no Estudo Preliminar fora do Estado de São Paulo. Rio Claro, p. 191 (Tese de Livre Docência). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. 1984

BARREIRO, H. S; BARBOSA, N. S. Extração Automática de Lineamentos na Exploração de Água Subterrânea: Caso dos Aquíferos Metassedimentares da Chapada Diamantina Centro-Setentrional. Dissertação de Mestrado Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ , v. 44, p. 1-12, 2021.

BATEZELLI, A. Análise da sedimentação cretácea no Triângulo mineiro e sua correlação com áreas adjacentes. PhD Thesis, Unesp, Rio Claro, 183p. 2003.

BERTOL, G. A. Avaliação da recarga aquífera anual do Aquífero Bauru em Araguari, Minas Gerais. 2007. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais

BONFIM, Luiz Fernando Costa. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. 2010.

BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for Geoscientists, Volume 13: Modelling with GIS (Computer Methods in the Geosciences). 1994.

Bomfim, L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em Ambiente SIG: concepção e metodologia. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2010, São Luís. Anais... São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2010. 18p.

BÜCHI, A. et al. Mapeamento Geológico na Exploração Mineral com uso de SIG e Realidade Virtual: Estudos Metodológicos. Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 4, p. 1310–1347, 15 dez. 2018.

BRANDÃO, R.L.; GOMES, F.E.M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas na avaliação potencial hidrogeológico da folha Irauçuba. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 16, n. 1, 2003.

BRITO, T. P. DE. Avaliação do potencial hídrico de aquíferos fissurais dos complexos Bação e Bonfim setentrional, Quadrilátero Ferrífero – MG. Dissertação de mestrado - departamento de geologia, universidade federal de ouro preto, 116p, 2018.

CÂMARA, G.; Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos. **São José dos Campos**, v. 264, 1995.

CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. Curitiba: MundoGEO, p. 1-44, 2005.

CODEMIG. **Mapa Geológico – Folha Uberlândia – SE.22-Z-B-Vi**. Minas Gerais: 2017. Mapa. Escala 1:100.000. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 6 fevereiro de 2024.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais: programa 2005/2006, texto técnico. [S.l.]: CODEMIG; Lasa, 2007. v. 1, 44 p. 21 mapas. Relatório interno.

COLLINS, M. G.; STEINER, F. R.; RUSHMAN, M. J. Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements. *Environmental Management*, v. 28, n. 5, p. 611-21, 2001.

CLEARY, Robert William. Águas subterrâneas. Engenharia Hidrológica. Tradução . Rio de Janeiro: Abrh/Editora da Ufrj, 1989. v. 2. p. 293-404.

DARDENNE M.A. 1981. Os Grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. In: Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas faixas marginais, Salvador, Anais, p. 140-157.

DARDENNE, M. A. The Brasília Fold Belt. In: Tectonic Evolution of South America. **31° International Geological Congress**. Rio de Janeiro, p. 231-263, 2000.

DROBNE, S.; LISEC, A. Multi-attribute decision analysis in gis: weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, v. 33, n. 4, p. 459-74, jan. 2009.

FAMELLI, Natália et al. Characterizing the nature and importance of lava-sediment interactions with the aid of field outcrop analogues. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 108, p. 103108, 2021.

FASHAE, Olutoyin A. et al. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach. [s. l.], p. 19–38, 2014.

FEITOSA, F.A.C. et al. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, LABHID, 2008. 812 p.

FERNANDES, Amélia J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, [s. l.], v. 29, p.49–72, 2008. Disponível em: http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100929X2008000100005&lng=es&nrm=iso.

FERREIRA, Ivone Luzia. Estudos geomorfológicos em áreas amostrais da Bacia do Rio Araguari-MG: uma abordagem da cartografia geomorfológica. 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

FIUMARI S.L. 2004. Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari – MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Minas Gerais, 122 p.

FREITAS, Marcos Alexandre de. Avaliação do potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos através de técnicas de geoprocessamento. 1998. **AVALIAÇÃO DO**

POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE TERRENOS CRISTALINOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO MARCOS ALEXANDRE DE FREITAS
Orientador: Dr. Carlos André B. Mendes. [s. l.], 1998.

FUCK, R. A. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. **SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste**, v. 4, n. June, p. 184–187, 1994.

GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. **Origem e evolução de bacias sedimentares**. segunda ed. [s.l: s.n.], 1991.

GHARARI S., HRACHOWITZ M., FENICIA F., SAVENIJE H.H.G. 2011. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment, *Hydrology and Earth Syst. Sci.* 15(11):3275- 3291, doi 10.5194/hess-15-3275-2011.

GOMES, Diego Guilherme da Costa (org.). Atlas aerogeofísico do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2021 Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22525?mode=full#:~:text=GOMES%2C%20Diego%20Guilherme%20da%20Costa%20\(org.\),Belo%20Horizonte%3A%20CPRM%2C%202021](https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22525?mode=full#:~:text=GOMES%2C%20Diego%20Guilherme%20da%20Costa%20(org.),Belo%20Horizonte%3A%20CPRM%2C%202021). Acesso em: 20 de março de 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Relatório Anual de Recursos Hídricos de Minas Gerais 2018. Belo Horizonte: IGAM, 2018. Disponível em: https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/images/Conjuntura_2017.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

ISAAKS, E. H., & SRIVASTAVA, R. M. (1989). **An Introduction to Applied Geostatistics**. Oxford University Press.

KUMAR, A.; KRISHNA, A. P. Assessment of groundwater potential zones in coal mining impacted hard-rock terrain of India by integrating geospatial and analytic hierarchy process (AHP) approach. *Geocarto International*, v. 33, n. 2, p. 105-129, 2018. doi: 10.1080/10106049.2016.1232314.

LACERDA FILHO, J. V.; OLIVEIRA, C. C. Geologia da Região Centro Sul de Goiás.

Boletim de Geociências do Centro Oeste, v. 18, p. 3-19,1995.

LEITE, C. E. S.; DEFINIÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DO PONTO DE VISTA HIDROGEOLÓGICO EM REGIÃO DE CRISTALINO ATRAVÉS DE IMAGENS DO LANDSAT-5 E SIG. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 1998.

LEONARDOS, O. H.; JOST, H.; FUCK, R. A.; BARROS, J. G. C. Geologia da região aurífera de Santa Cruz de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal. Boletim de Resumos, Natal: SBG, p. 338.

LISBÔA, N. A.; DANI, N.; ANTÔNIO, P. Prospecção de águas subterrâneas em Morfoestruturas Anelares que controlam os Sistemas Aquíferos da Bacia do Paraná, no Rio Grande do Sul (RS). **Águas Subterrâneas**, v. 36, n. 2, 14 set. 2022.

LOBATSKAYA, R. M.; STRELCHENKO, I. P. GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: a case study of Irkutsk city, Russia. *Geoscience Frontiers*, v. 7, p. 285–297, 2016.

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

MALLAST, U.; GLOAGUEN, R.; GEYER, S.; RODIGER, T.; SIEBERT, C. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, p. 2665–2678, 2011

MENEZES, P.R. & FERREIRA JÚNIOR, L.G. Comportamento espectral de alvos naturais como base para interpretação de imagens multiespectrais. (Textos universitários.) Brasília: UnB, 1995. 25 p.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental.1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V - 1999 - An outline of The Geology and Petroleum Systems

of the Paleozoic interior basins of South America. *Boletim da Petrobrás episodes*. Vol.22 n° 3, pp. 203-204.

MILANI, E. J. **Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná**. p. 17, 2004.

MORAES, Lucia Castanheira de; SEER, Hildor José; MARQUES, Leila Soares. Geology, geochemistry and petrology of basalts from Paraná Continental Magmatic Province in the Araguari, Uberlândia, Uberaba and Sacramento regions, Minas Gerais state, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, p. 221-241, 2018.

MURTHY, K. S. R.; MAMO, A. G. Multi-criteria decision evaluation in groundwater zones identification in Moyale-Teltele subbasin, South Ethiopia. *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 11, p. 2729-2740, 2009. doi: 10.1080/01431160802468255

Nobre A.D., Cuartas L.A., Hodnett M., Rennó C.D., Rodrigues G., Silveira A., Waterloo M., Saleska S. 2011. Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model, *J. Hydrology* 404(1):13–29, doi 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.

NUNES, Victor Hugo Souto. **Mapeamento Geológico das Rochas Gnáissicas-Migmatíticas e Metassedimentares do Grupo Araxá na Região de Araguari (MG)-Cumari (GO)**. 2020.

OLIVEIRA, L. A. DE; RIBEIRO, A. G. CONTRIBUIÇÃO DOS AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS PARA O ABASTECIMENTO PÚBLICO DE ÁGUA DA CIDADE DE ARAGUARI-MG. *Águas Subterrâneas*, 11 set. 2000.

OLIVEIRA, L. A. O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão. Dissertação de Mestrado em Geologia. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília. 2002.

OLIVEIRA, E. B. P. M., SÍGOLO, J.B. Orientação para elaboração de teses, dissertações e outros trabalhos acadêmicos. *Geologia USP: Série Didática*, v. 3 (1), p. 1- 56, 2005.

OLIVEIRA, H. L. P. R. Análise da influência dos fatores naturais e antrópicos na disponibilidade hídrica no alto curso do Córrego Três Marcos: subsídios para gestão integrada das águas superficial e subterrânea. 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

OLIVEIRA, N. C. DE M. et al. Aplicação do método AHP para confecção de modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 90–102, 25 mar. 2020.

PIMENTEL, M. M. Magmatismo Ácido peraluminoso associado ao Grupo Araxá na região entre Pires do Rio e Ipameri, Goiás: características geoquímicas e implicações geotectônicas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 5, 1995, Goiânia. Anais...Goiânia, 1995, p. 6.

Pimentel, M. M.; Fuck, R.A; Jost, H.; Ferreira Filho, C.F ; Araujo, S., 2000. The basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. In.: Cordanni, U. G. et al. Tectonic Evolution of South América. International Geo-logical Congress, 31, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, p.195-229.

PIMENTEL, M.; FUCK, R.; GIOIA, S. The neoproterozoic goiás magmatic arc, central brazil: a review and new sm-nd isotopic data. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 1, n. 30, p. 35–39, 2000a.

Quintas, Paul & Lefrere, Paul & Jones, Geoff. (1997). Knowledge Management: a Strategic Agenda. *Long Range Planning*. 30. 385-391.

RADAMBRASIL (Brasil). **Projeto RADAMBRASIL - Projeto de Integração Nacional**: Folha SE.22 Goiânia. 31. ed. rev. Rio de Janeiro: 1983.

Rennó C.D., Nobre A.D., Cuartas L.A., Soares J.V., Hodnett M.G., Tomasella J., Waterloo M.J. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia, *Remote Sens. of Environ.* 112(9):3469-3481, doi 10.1016/j.rse.2008.03.018.

ROCHA, M. R. et al. Mapeamento Geomorfológico do Triângulo Mineiro-Brasil. **Encontro de Geógrafos da América Latina**, v. 8, 2001.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo: Edusp. n.6, 17-30p, 1992.

Saaty RW 1987. The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used, *Math. Model.* 9(3):161-176. doi10.1016/0270-0255(87)90473-8.

Saaty TL 1990. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, *European J. of Operational Res.*48(1):9-26. doi 10.1016/0377-2217(90)90057-1.

SILVA, T. I.; RODRIGUES, S. C. A utilização de SIGs e técnicas de Geoprocessamento a partir de imagens da SRTM para Compartimentação Geomorfológica da Bacia do Médio-Baixo Curso do Rio Araguari/MG. *Caderno de Geografia*. V20, n34, 2010.

SOARES, P. C. et al. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 10, n. 3, p. 177-185, 1980.

SHEKHAR, S.; PANDEY, A. C. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. *Geocarto International*, v. 30, n. 4, p. 402-421, 2015. doi: 10.1080/10106049.2014.894584.

SOARES, J. et al. Seismic characteristics of central brazil crust and upper mantle:a deep seismic refraction study. *Journal of Geophysics Research* (in press), 2006^a.

THIEDE D.S., VASCONCELOS P.M. 2010. Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar results. *Geology*, 38(8):747-750.

VAZ, D. A.; ACHILLE, G. D.; BARATA, M. T.; ALVES, E. I. Tectonic lineament mapping of the Thaumasia Plateau, Mars: comparing results from photointerpretation and a semiautomatic approach. *Computers & Geosciences*, v. 48, p. 162–172, 2012.

UHLEIN, A. et al. Tectônica Da Faixa De Dobramentos Brasília – Setores Setentrional E Meridional. **Geonomos**, v. 20, n. 2, p. 1–14, 2012.

VALERIANO C.M., DARDENNE M.A., FONSECA M.A., SIMÕES L.S.A., SEER H.J. 2004. A EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA FAIXA BRASÍLIA. IN: V. MANTESSONETO, A. BARTORELLI, C.D.R. CARNEIRO, B.B. BRITO NEVES (eds). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução e obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p.575-593.

ZALAN P.V., WOLFF S., CONCEICAO J.C.J., MARQUES A., ASTOLFI M.A.M., VIEIRA I.S, APPI V.T., ZANOTTO O. A. 1991. Bacia do Parana. In: Origem e Evolucao de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, 135 – 168 p.

ANEXOS

Anexo I - Aplicação da Técnica AHP para o modelo HAND.

Anexo II - Aplicação da Técnica AHP para a densidade de lineamentos.

Anexo III - Aplicação da Técnica AHP para os aquíferos.

Anexo IV - Aplicação da Técnica AHP para o mapa litológico.

Anexo V - Aplicação da Técnica AHP para a priorização de todos os critérios.

Anexo VI – Mapa de localização dos poços da área de estudo.

Anexo I - Aplicação da Técnica AHP para o modelo HAND.

Matriz de Comparação Pareada

HAND	0-7 m	7-16 m	16-29 m	29-35 m
0-7 m	1	2	3	4
7-16 m	0.5000	1	2	3
16-29 m	0.33333	0.5000	1	2
29-35 m	0.2500	0.33333	0.5000	1
Soma	2.0833	3.8333	6.5000	10

Matriz de Normalização

HAND	0-7 m	6-16 m	16-29 m	29-35 m	Pesos Estatístico/Vetor Eigen
0-7 m	0.4800	0.5217	0.4615	0.4000	0.4658
7-16 m	0.2400	0.2609	0.3077	0.3000	0.2771
16-29 m	0.1600	0.1304	0.1538	0.2000	0.1611
29-35 m	0.1200	0.0870	0.0769	0.1000	0.0960

Aw1	1.8873
Aw2	1.1202
Aw3	0.6469
Aw4	0.3853

Autovetor	Índice de Consistência (IC)
4.0308	0.0103

RC
0.0114

Anexo II - Aplicação da Técnica AHP para a densidade de lineamentos.

Matriz de Comparação Pareada

Lineamentos	1	2	3	4	5
1	1	0.5000	0.33333	0.2500	0.2000
2	2	1	0.5000	0.33333	0.2500
3	3	2	1	0.5000	0.3333
4	4	3	2	1	0.5000
5	5	4	3	2	1
Soma	15.0000	10.5000	6.8333	4.0833	2.2833

Matriz de Normalização

Lineamentos	1	2	3	4	5	Pesos Estatístico/Vetor Eigen
1	0.0667	0.0476	0.0488	0.0612	0.0876	0.0624
2	0.1333	0.0952	0.0732	0.0816	0.1095	0.0986
3	0.2000	0.1905	0.1463	0.1224	0.1460	0.1611
4	0.2667	0.2857	0.2927	0.2449	0.2190	0.2618
5	0.3333	0.3810	0.4390	0.4898	0.4380	0.4162

Aw1	0.3141
Aw2	0.3953
Aw3	0.8151
Aw4	1.3375
Aw5	2.1295

Autovetor
5.0683

Índice de Consistência (IC)
0.0171

RC
0.0152

Anexo III - Aplicação da Técnica AHP para os aquíferos.

Matriz de Comparação Pareada

Aquíferos	Cristalino	Poroso/Fissural	Formações Cenozóicas	Bacia Sedimentar	Vulcânicas
Cristalino	1	0.5000	0.333333333	0.2500	0.2000
Poroso/Fissural	2	1	0.5000	0.333333333	0.2500
Formações Cenozóicas	3	2	1	0.5000	0.3333
Bacia Sedimentar	4	3	2	1	0.5000
Vulcânicas	5	4	3	2	1
Soma	15.0000	10.5000	6.8333	4.0833	2.2833

Matriz de Normalização

Aquíferos	Cristalino	Poroso/Fissural	Formações Cenóicas	Bacias Sedimentar	Vulcânicas	Pesos Estatístico/Vetor Eigen
Cristalino	0.0667	0.0476	0.0488	0.0612	0.0876	0.0624
Poroso/Fissural	0.1333	0.0952	0.0732	0.0816	0.1095	0.0986
Formações Cenozóicas	0.2000	0.1905	0.1463	0.1224	0.1460	0.1611
Bacia Sedimentar	0.2667	0.2857	0.2927	0.2449	0.2190	0.2618
Vulcânicas	0.3333	0.3810	0.4390	0.4898	0.4380	0.4162

Aw1	0.3141
Aw2	0.4953
Aw3	0.8151
Aw4	1.3375
Aw5	2.1295

Autovetor
5.0683

Índice de Consistência (IC)
0.0171

RC
0.0152

Anexo IV - Aplicação da Técnica AHP para o mapa litológico.

Matriz de Comparação Pareada

Litologia	Complexo Maratá	Xisto Araxá B	Serra Geral	Coberturas Cenozóicas	Arenito Marília
Compelo Maratá	1	1.0000	0.3333	0.2500	0.2500
Xisto Araxá B	1	1	0.3333	0.25	0.2500
Serra Geral	3	3	1	0.5000	0.3333
Coberturas Cenozóicas	4	4	2	1	0.5000
Arenito Marília	4	4	3	2	1
Soma	13.0000	13.0000	6.6667	4.0000	2.3333

Aw1	0.3767
Aw2	0.3767
Aw3	0.895
Aw4	1.4247
Aw5	2.0759

Autovetor
5.1086

Índice de Consistência (IC)
0.0272

RC
0.0242

Anexo V - Aplicação da Técnica AHP para a priorização de todos os critérios.

Matriz de Comparação Pareada

Mapa Final	Geologia	Aquíferos	Lineamentos	Hand
Geologia	1	0.5000	0.3333	0.2500
Aquíferos	2	1	0.5000	0.333333333
Lineamentos	3	2	1	0.5000
HAND	4	3	2	1
Soma	10.0000	6.5000	3.8333	2.0833

Matriz de Normalização

Mapa Final	Geologia	Aquíferos	Lineamentos	HAND	Pesos Estatístico/Vetor Eigen
Geologia	0.1000	0.0769	0.0870	0.1200	0.0960
Aquíferos	0.2000	0.1538	0.1304	0.1600	0.1611
Lineamentos	0.3000	0.3077	0.2609	0.2400	0.2771
HAND	0.4000	0.4615	0.5217	0.4800	0.4658

Aw1	0.3854
Aw2	0.6949
Aw3	1.1202
Aw4	1.8873

Autovetor
4.031

Índice de Consistência (IC)
0.0103

RC
0.0115

Anexo VI – Mapa de localização dos poços da área de estudo.

