

Trabalho de Conclusão de Curso
Curso de Graduação em Geologia

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO AQUIFERO CAIUÁ NA
PORÇÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Thalita Cristine Barbosa Soares

Orientador: Chang Hung Kiang
Co-orientador: Elias Hideo Teramoto

Rio Claro – SP

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

THALITA CRISTINE BARBOSA SOARES

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO AQUÍFERO CAIUÁ NA PORÇÃO
NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Geólogo.

Rio Claro - SP

2024

S676m Soares, Thalita Cristine Barbosa
Modelo hidrogeológico conceitual do aquífero Caiuá na porção
noroeste do estado do Paraná / Thalita Cristine Barbosa Soares. -- Rio
Claro, 2024
52 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e
Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Chang Hing Kiang
Coorientador: Elias Hideo Teramoto

1. Modelo Hidrogeológico conceitual. 2. Aquífero Caiuá. 3.
hidrogeologia. I. Título.

THALITA CRISTINE BARBOSA SOARES

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO AQUÍFERO
CAIUÁ NA PORÇÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (Orientador)

Dr. Elias Hideo Teramoto (Coorientador)

Geól. Bruno Zanon Engelbrecht

Geól. Eduardo Camargo Meneghel

Rio Claro, 04 de dezembro de 2024.



Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) Orientador(a)

DEDICATÓRIA

Á minha avó dona Catharina que me incentivou a sempre correr atrás dos meus sonhos e minha tia Neuza que era como uma segunda mãe para mim, estarão para sempre em meu coração (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que me acompanharam ao longo dessa jornada acadêmica. Em especial, agradeço ao Dr. Elias Hideo Teramoto, cujas valiosas orientações e ensinamentos foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus dedicados professores, que tiveram um papel crucial no meu desenvolvimento acadêmico, contribuindo significativamente para a ampliação do meu conhecimento.

Sou profundamente grata ao apoio recebido pelo LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias, que não apenas disponibilizou toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento do trabalho, mas também proporcionou um ambiente colaborativo e acolhedor. A Caroline que me ajudou a iniciar meu projeto e me ensinou passo a passo de como deveria ser este projeto, com certeza não teria conseguido sem toda dedicação e esforço dela. Ao Caio que me proporcionou muitos conhecimentos, além de me apoiar em momentos em que eu achei que não conseguiria, os meus mais sinceros agradecimentos.

Aos amigos e colegas de turma em Rio Claro, especialmente Danielle, Luiza, Larissa, Nicolle, Rafaela, Nattalia, Leticia, e Ana, deixo meu agradecimento pelos momentos de descontração que tornaram essa trajetória mais leve e agradável.

Por fim, expresso minha imensa gratidão à minha família, em especial à minha mãe, Maria de Lourdes, e ao meu irmão, Alex, cujo apoio incondicional foi fundamental para a concretização deste sonho. A presença de cada um de vocês nesta caminhada tornou-a ainda mais significativa e especial.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que essa etapa fosse concluída com sucesso, meu mais sincero agradecimento. Sem o apoio, a compreensão e a companhia de vocês, essa jornada teria sido muito mais desafiadora. Obrigada por fazerem parte dessa conquista e por torná-la possível.

"A felicidade pode ser encontrada, mesmo nas horas mais sombrias, se a pessoa se lembrar de acender a luz."

Alvo Dumbledore

RESUMO

O Aquífero Caiuá, que faz parte do Sistema Aquífero Bauru (SAB), localizado na porção noroeste do estado do Paraná, desempenha um papel essencial no abastecimento hídrico da região. Este estudo desenvolveu um modelo hidrogeológico conceitual para o SAC, integrando dados geológicos, hidrológicos e climáticos. A média anual de precipitação na área de estudo é de 1.527 mm, sendo que aproximadamente 18% desse total contribui para a recarga do aquífero, com variações locais baseadas na topografia e no uso do solo. Estimou-se que o volume de água armazenado no SAC atinge cerca de 4,5 bilhões de metros cúbicos, distribuídos ao longo de sua extensão de 29.500 km² e uma espessura máxima de 250 metros. O fluxo preferencial das águas subterrâneas direciona-se para os canais fluviais do rio Ivaí e Paranapanema, evidenciando a conexão entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. A elaboração do modelo conceitual, com suporte do método de krigagem e ferramentas como o software ArcGIS (versão 10.8.2), permitiu identificar as zonas de maior recarga e descarga, e assim uma base de dados hidrogeológicos que servirão para a construção do modelo conceitual através do software Leapfrog Geo (versão 2023.1).

Palavras-chave: Modelo conceitual; Sistema Aquífero Bauru, Aquífero Caiuá; Condutividade hidráulica (K), SIAGAS, RIMAS, ArcGIS, Krigagem, Leapfrog geo.

ABSTRACT

The Caiuá Aquifer, which is part of the Bauru Aquifer System (BAS) located in the northwestern portion of the state of Paraná, plays an essential role in the water supply of the region. This study developed a conceptual hydrogeological model for the BAS, integrating geological, hydrological, and climatic data. The average annual precipitation in the study area is 1,527 mm, of which approximately 18% contributes to the aquifer recharge, with local variations based on topography and land use. It was estimated that the volume of water stored in the BAS reaches approximately 4.5 billion cubic meters, distributed along its extension of 29,500 km² and an average thickness of 250 meters. The preferential flow of groundwater is directed to the river channels of the Ivaí and Paranapanema rivers, evidencing the connection between surface and groundwater resources. The development of the conceptual model, supported by the kriging method and tools such as Arcgis software (version 10.8.2), allowed the identification of the zones of greatest recharge and discharge, and thus a hydrogeological database that will be used to construct the conceptual model through Leapfrog Geo software (version 2023.1).

Keywords: Conceptual model; Bauru Aquifer System, Caiuá Aquifer; SIAGAS, Kriging, Hydraulic Conductivity (K), ArcGIS, Leapfrog Geo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da delimitação da área de estudo.	15
Figura 2 - Relevos típicos sustentados por diferentes unidades litoestratigráficas no noroeste do Paraná.	16
Figura 3 - Mapa de temperatura média anual do Estado do Paraná.	17
Figura 4 - Média anual de precipitação no Estado do Paraná.	18
Figura 5 - Mapa da média anual evapotranspiração do Estado do Paraná.	19
Figura 6 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com o contorno estrutural (profundidade) do embasamento cristalino.	21
Figura 7 - Mapa geológico da área de estudo.	24
Figura 8 - Perfil litológico representativo da Formação Caiuá.	25
Figura 9 - Mapa altimétrico do noroeste do Paraná.	27
Figura 10 - Mapa dos poços de monitoramento da rede RIMAS e SIAGAS.	31
Figura 11 - Mapa das estações fluviométricas, localizadas na região do aquífero Caiuá, e gráficos de vazão dos rios Ivaí, Pirapó e Xambré ao longo de 4 á 10 anos, destacando vazões máximas, médias e mínimas.	32
Figura 12 - Gráfico da média anual de precipitação e do total pluviométrico para as estações de monitoramento em Tapira, Planaltina do Paraná, Porto Rico e Paranacity.	33
Figura 13 - Mapa potenciométrico e direção preferencial de fluxo subterrâneo.	36
Figura 14 - Gráfico (Carga Hidráulica x Tempo).	38
Figura 15 - Mapa de recarga Aquífero Caiuá.	40
Figura 16 - Mapa de espessura aquífero Caiuá.	41
Figura 17 - Mapa da altitude estimada do contato entre a Formação Caiuá e a Formação Serra Geral na área.	42
Figura 18 - Modelo Conceitual Aquífero Caiuá.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação dos poços e estações meteorológicas associadas.	39
Tabela 2 - Relação entre recarga (R), precipitação (P) e a razão R/P (%) no período de 2015 a 2022..	39
Tabela 3 - Dados hidrogeológicos SIAGAS e identificação dos poços.	52

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná

RIMAS - Rede Integrada de Águas Subterrâneas

SAB - Sistema Aquífero Bauru

SBG - Sociedade Brasileira de Geologia

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

ETp - Evapotranspiração Potencial

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.1 Introdução	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Justificativas	14
CAPÍTULO II – ÁREA DE ESTUDO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	15
2.1 Localização da área de estudo	15
2.2 Aspectos fisiográficos e climáticos.....	16
CAPÍTULO III - CONTEXTO GEOLÓGICO	20
3.1 Geologia Regional	20
3.2 Evolução geotectônica-estrutural	22
3.3 Geologia Local.....	23
3.3.1 Formação Serra Geral	23
3.3.2 Formação Caiuá.....	24
3.3.3 Formação Serra Geral.....	25
3.3.4 Formação Santo Anastácio.....	26
3.3.5 Formação Pirapozinho	26
3.4 Hidrogeologia Local.....	26
3.4.1 Sistema Aquífero Bauru (SAB)	26
3.4.2 Aquífero Caiuá	26
CAPÍTULO VI – REVISÃO TEÓRICA.....	28
4.1 Modelo Conceitual Hidrogeológico	28
4.2 Método (Water Table Fluctuation - WTF).....	28
4.3 Potenciometria.....	29
CAPÍTULO V – METODOLOGIA	30
5.1 Monitoramento Hidrogeológico.....	30
5.2 Potenciometria Regional	31
5.2.1 Fluviometria.....	31
5.2.2 Pluviometria.....	33
5.3 Parâmetros Hidrodinâmicos	33
5.3.1 Porosidade efetiva (<i>Sy</i>).....	34
5.3.2 Condutividade Hidráulica (<i>K</i>).....	34
CAPÍTULO VI – DISCUSSÃO E RESULTADOS	35
6.1 Unidades Hidroestratigráficas	35
6.2 Condições de Fluxo	35
6.3 Water Table Fluctuation – WTF.....	37
6.4 Espessura Aquífero.....	40
6.5 Análise quantitativa de volume de água	42

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES.....	46
CAPÍTULO VIII – BIBLIOGRAFIA.....	48
CAPÍTULO XI - APÊNDICES.....	52

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Na distribuição global de água doce, aproximadamente 68,7% está retida em geleiras e calotas polares, e cerca de 30,1% são águas subterrâneas. Apenas 1,2% da água doce acessível está em superfícies como lagos e pântanos, enquanto os rios representam uma fração ainda menor, em torno de 0,006% (USGS, 2019; UN Water, 2020). No entanto, a água doce não está distribuída de maneira uniforme em toda a superfície da Terra. Em algumas áreas, há uma grande falta de água devido ao aumento da população e à urbanização, que altera os espaços ao tornar o solo impermeável, dificultando o ciclo normal de recarga da água.

Os Recursos Hídricos subterrâneos possuem um papel importante de abastecimento, e promovem o desenvolvimento econômico regional e o aumento na qualidade de vida das populações favorecidas. No Brasil, o crescimento populacional e a expansão das áreas urbanas exigem um uso mais eficiente dos recursos hídricos, incluindo águas subterrâneas. De acordo com a (ANA, 2023), as águas subterrâneas abastecem diretamente cerca de 30 milhões de pessoas no país, representando aproximadamente 18% da população atendida por redes públicas. Contudo, esse percentual é ainda mais significativo em municípios menores, onde até 52% das cidades dependem parcial ou totalmente desses recursos para abastecimento público.

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) abrange os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás e parte do Paraguai, com área total de 370.000 km². Trata-se de um aquífero sedimentar, de condição predominantemente livre (DAEE, 1976) cuja recarga natural está associada à infiltração direta da precipitação nas rochas sedimentares do Grupo Bauru.

O compartimento do SAB no estado do Paraná está presente na região noroeste, e tem como limites o rio Paranapanema, ao norte, e a área de desague do rio Piquiri no rio Paraná, ao sul; e ocupa uma área de aproximadamente 28.500 km² de relevo montanhoso, com espessura máxima média em torno de 250 a 270 metros (Schneider *et al.*, 1974).

A elaboração de um modelo conceitual é uma etapa que consiste em representar de forma simplificada da área a ser estudada, incluindo informações sobre as características físicas, tais como topografia, clima, hidrografia, solos, geologia e hidrogeologia, além do domínio do modelo e das condições de contorno. Assim, a preparação do modelo conceitual envolve a criação do conceito hidrogeológico de um sistema de água subterrânea, estimativa das zonas de

recarga e descarga e a elaboração do balanço hídrico para estimar a recarga de água subterrânea.

A construção do modelo também tem como objetivo organizar os dados associados para uma análise mais eficiente (Anderson e Woessner, 1992). É importante ressaltar que este modelo deve ser continuamente atualizado à medida que novas informações forem adquiridas (Bredehoeft, 2005), especialmente se as informações geológicas e hidrogeológicas regionais da área estudada forem escassas.

A gestão das águas subterrâneas pode ser beneficiada pelas informações geradas pela construção de um Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC), buscando maximizar os dados e experiências, utilizando ambos de forma sistemática para obtenção de respostas e conhecimentos sobre a dinâmica das águas subterrâneas.

1.2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual do Aquífero Caiuá, localizado no noroeste do Paraná, com o intuito de analisar sua dinâmica hídrica, considerando a influência da precipitação e a influência dos principais rios na recarga do aquífero. O trabalho também visa calcular o volume total de água armazenada, integrando dados geológicos, hidrológicos e climáticos, e fornecer bases científicas para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos da região.

1.3 Justificativas

O Sistema Aquífero Bauru no estado do Paraná, apesar de sua importância no abastecimento do noroeste do estado e da alta quantidade de poços instalados e registrados no Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS – SBG), apresenta uma carência de estudos geológicos e hidrogeológicos, assim o presente trabalho visa contribuir com o conhecimento geológico da área de estudo. A análise detalhada do Aquífero Caiuá é essencial para a compreensão e gestão dos recursos hídricos no estado do Paraná, pois ele é uma importante fonte de abastecimento domiciliar e de irrigação, além de regular a recarga dos principais rios e mananciais da região. Compreender sua dinâmica é essencial para garantir o uso sustentável, evitando a superexploração e preservando a segurança hídrica da região no longo prazo.

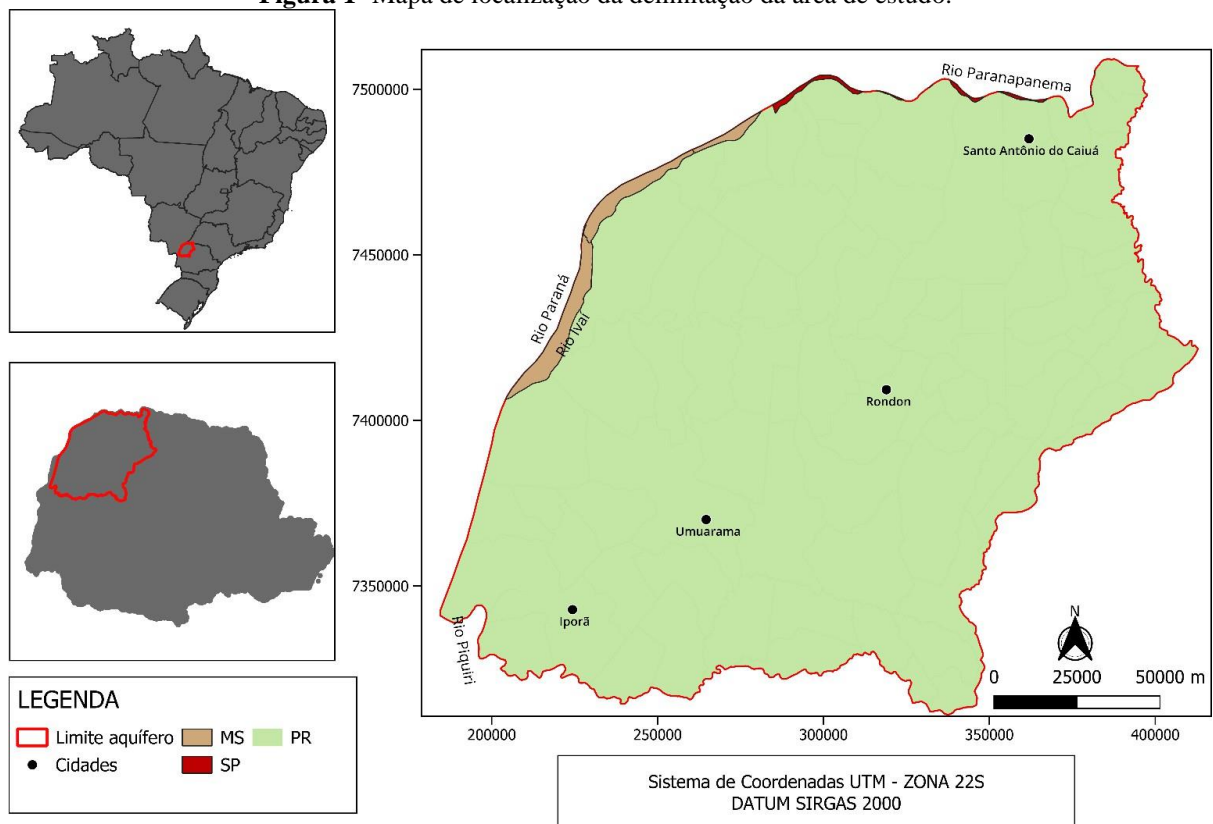
2 CAPÍTULO II – ÁREA DE ESTUDO E ASPECTOS FISIOGRAFICOS

2.1 Localização da área de estudo

A área de estudo está inserida na porção noroeste do Estado do Paraná, onde afloram as rochas sedimentares cretáceas do Grupo Bauru, especificamente com enfoque na Formação Caiuá. Área é delimitada pelos rios Paraná a oeste, Paranapanema na porção norte e Piquiri na porção sul, e pelo limite a leste em contato com a Formação Serra Geral, ocupando aproximadamente 29.5000 Km².

A região (figura 1) abrange cerca de aproximadamente 160 municípios, sendo os mais populosos os municípios de Umuarama, Paranaíba, Cianorte e Nova Esperança, segundo (IBGE, 2010).

Figura 1- Mapa de localização da delimitação da área de estudo.

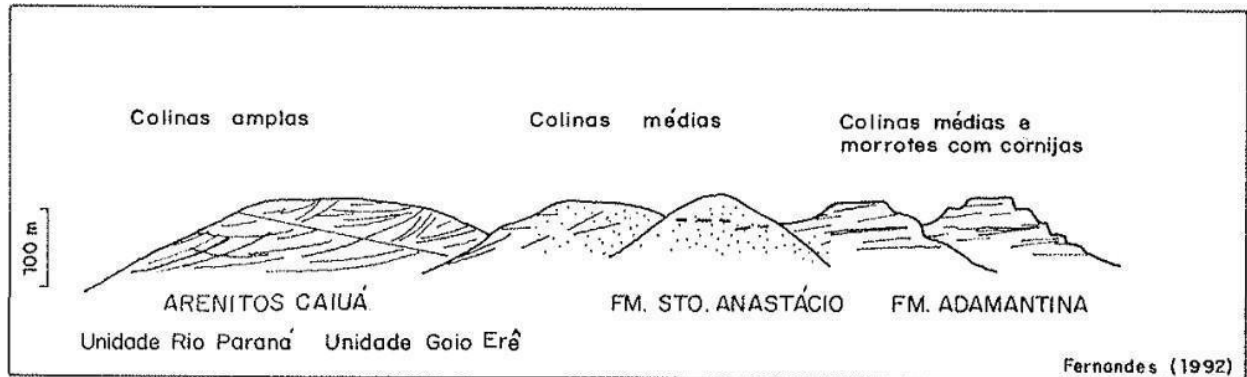


Fonte: Elaborado pela autora.

2.2 Aspectos fisiográficos e climáticos

A geomorfologia da área (figura 2) está inserida no 3º Planalto Paranaense (Maack, 1947), que é caracterizado por um relevo formado por amplas colinas, de topos extensos e arredondados, com encostas de baixa declividade e perfil convexo (Ponçano *et al.*, 1981).

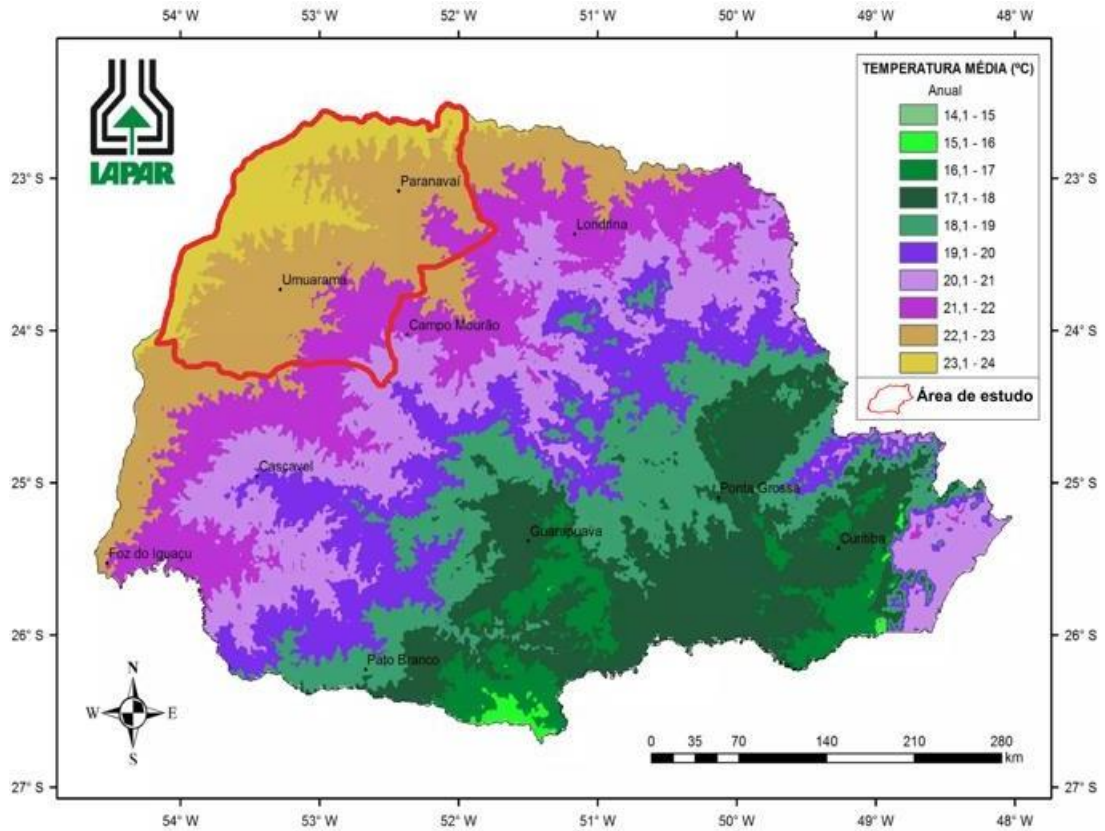
Figura 2 - Relevos típicos sustentados por diferentes unidades litoestratigráficas no noroeste do Paraná.



Fonte: Fernandes, 1992.

O clima da região segundo as médias climatológicas realizadas pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), apresenta temperatura anual em torno de 21,8°C, sendo o mês de fevereiro o qual apresenta de maior elevação de temperatura, com temperatura média de 24,9°C, e os meses de temperaturas mais baixas ocorrem entre o período de junho e julho (IAPAR, 2019), com temperaturas em média de 17,7° e 17,9°C (figura 3).

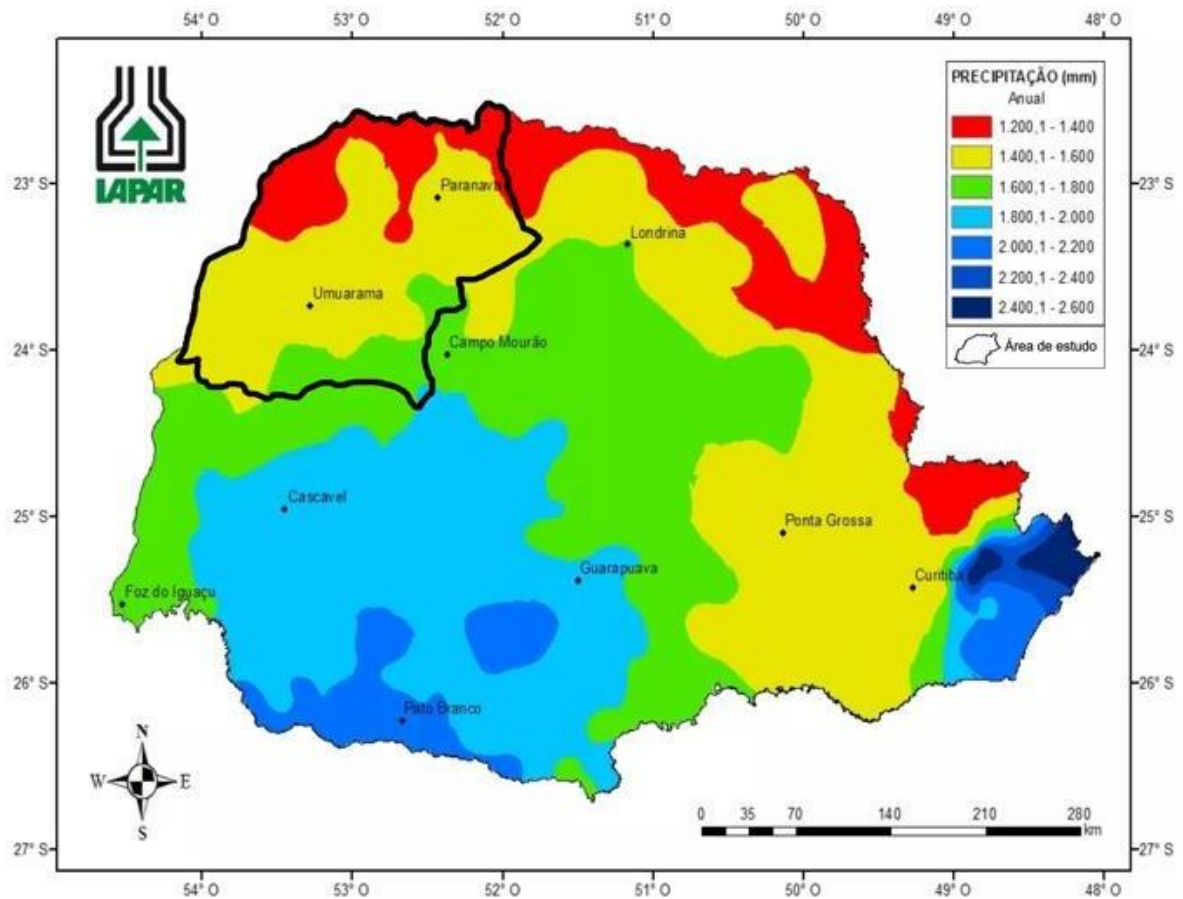
Figura 3 - Mapa de temperatura média anual do Estado do Paraná



Fonte: Modificado IAPAR, 2019.

A média anual de precipitação pluviométrica para a região noroeste do Estado do Paraná, obtido com a análise de uma série histórica de 45 anos, entre 1975 e 2020, é de 1527 mm (Nitsche *et al.*, 2019), valor muito próximo de 1500 mm, apresentado pelo Instituto Agrônômico do Paraná.

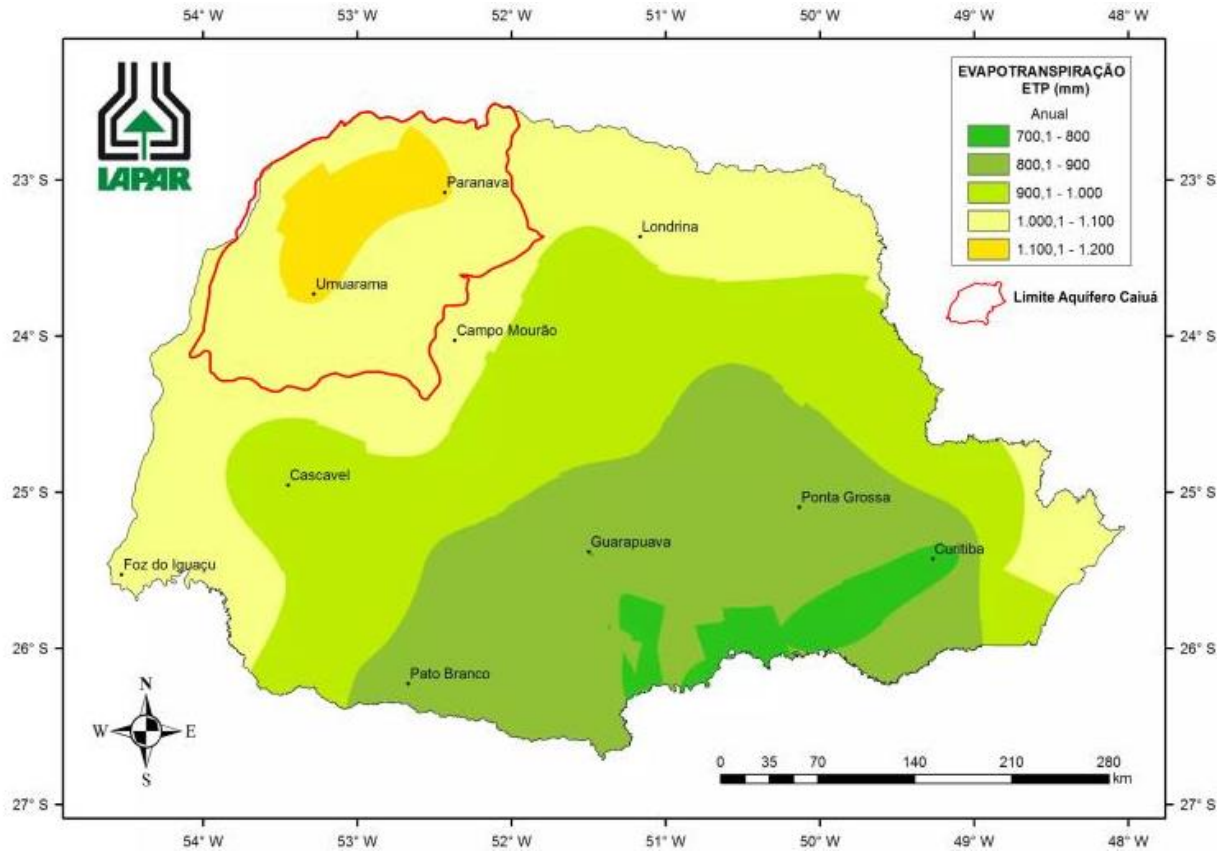
Figura 4 - Média anual de precipitação no Estado do Paraná.



Fonte: Modificado IAPAR, 2019.

A evapotranspiração potencial (ETp) nas regiões ao norte do estado do Paraná onde se localiza a área de estudo apresenta valores de ETp que variam entre 1.000 e 1.200 mm/ano (figura 5), já na parte sul os valores de ETp variam entre 700 e 800 mm/ano ao sul (IAPAR, 2019).

Figura 5 - Mapa da média anual evapotranspiração do Estado do Paraná.



Fonte: Modificado IAPAR, 2019.

3 CAPÍTULO III - CONTEXTO GEOLÓGICO

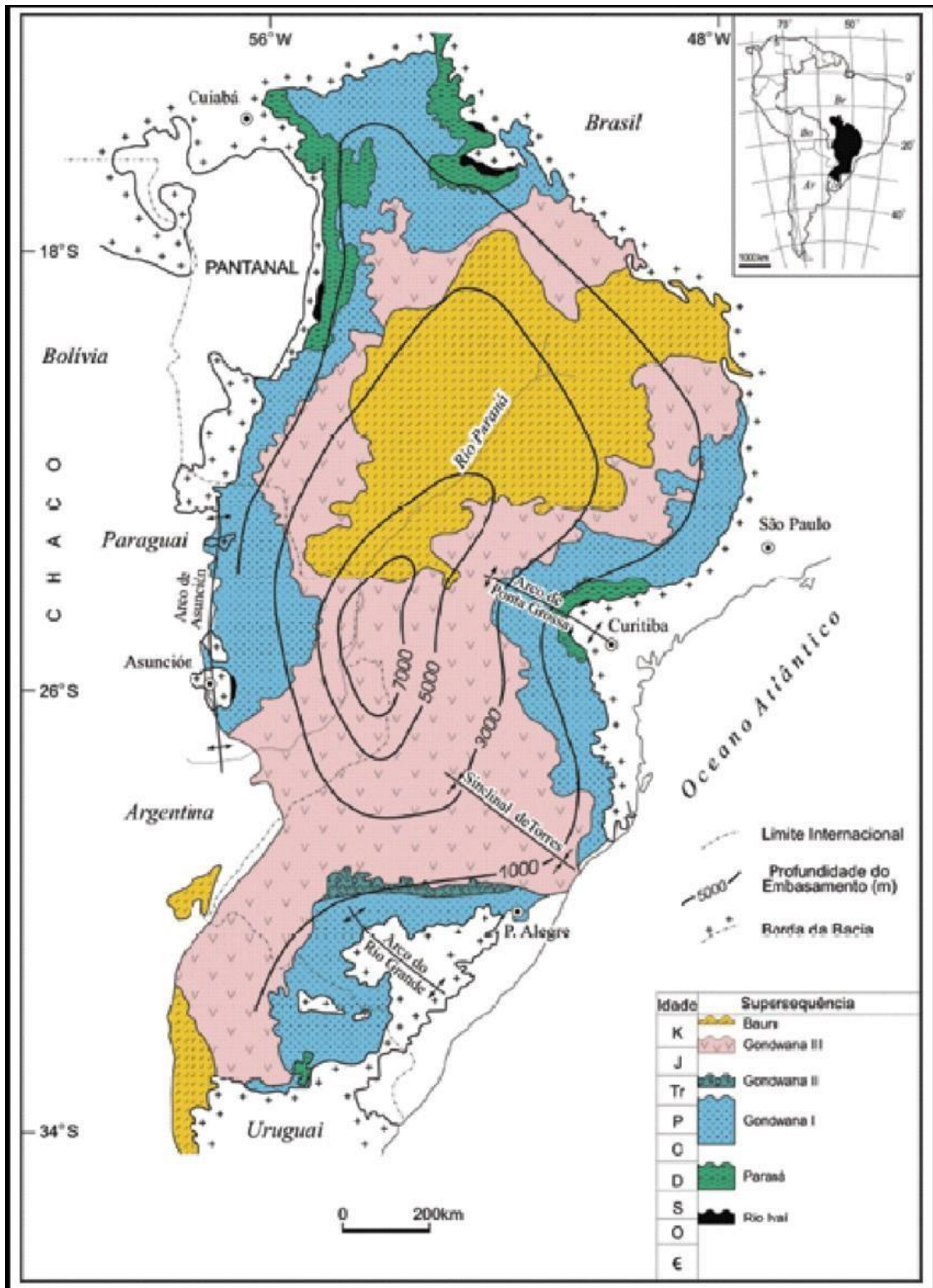
3.1 Geologia Regional

A Bacia Sedimentar do Paraná faz parte de uma extensa região da América do Sul, abrigando dentro de seus limites uma sucessão sedimentar-magmática com idades entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo (Milani *et al.*, 2007). Geograficamente, a bacia inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, numa área total que ultrapassa 1.500.000 quilômetros quadrados (Milani *et al.*, 2007). Sua forma é ovalada, sendo que seu eixo mais alongado possui direção aproximada N-S (Figura 6).

No Brasil, a Bacia Sedimentar do Paraná tem espessura de aproximadamente 6 mil metros no depocentro (Zalán *et al.*, 1990). Apresenta em seu contexto litoestratigráfico a maior manifestação de vulcanismo fissural ocorrida em região continental, que resultou no empilhamento de até 2 mil metros de lavas sobre seus sedimentos além de intrudir-se por entre os mesmos, sob a forma de diques e soleiras (Milani & Filho, 2000).

De acordo com Milani (1997), é possível subdividir as rochas da Bacia do Paraná em 6 Supersequências, sendo elas: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico- Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). Cada uma dessas sequências é uma materialização de intervalos temporais, divididos por superfícies de discordância.

Figura 6 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com o contorno estrutural (profundidade) do embasamento cristalino



Fonte: Milani (1997).

3.2 Evolução geotectônica-estrutural

De acordo com Almeida (1981), a bacia apresentou dois períodos maiores em sua evolução, subdivisíveis em menores fases. Durante o primeiro, entre o Paleozóico e o Jurássico Superior, evoluiu tectonicamente como tantas outras bacias intracratônicas discordantes de interior remoto, do tipo sinéclise. A partir do Jurássico Superior os processos da Reativação Wealdeniana ligados ao início da abertura do Oceano Atlântico, modificaram profundamente as características da bacia, transformando-a numa anfíclise, na qual os processos magmáticos e tectônicos sobrepujaram amplamente os sedimentares (Almeida, 1981).

Zalán *et al.*, (1987) argumentam que nos principais lineamentos da Bacia do Paraná existe um marcante padrão das feições lineares em forma de X. Estas feições podem ser divididas em três grupos, de acordo com suas orientações NWSE, NE-SW, E-W.

A reativação de falhas e fraturas durante a Reativação Wealdeniana controlou a deposição desses sedimentos, além de criar zonas de permeabilidade secundária que favoreceram a circulação de água subterrânea. Esses eventos tectônicos exerceram uma influência significativa na configuração hidrogeológica do Aquífero Caiuá, situado na porção noroeste da bacia. Durante o período de sedimentação eólica da Formação Caiuá, no Cretáceo, foram depositados arenitos com alta porosidade primária, que constituem os principais reservatórios do aquífero.

Além disso, as estruturas descritas por Zalán *et al.*, (1987), como os lineamentos em X, determinaram direções preferenciais para o fluxo hídrico subterrâneo, influenciando os processos de recarga e armazenamento do aquífero.

3.3 Geologia Local

3.3.1 Formação Serra Geral

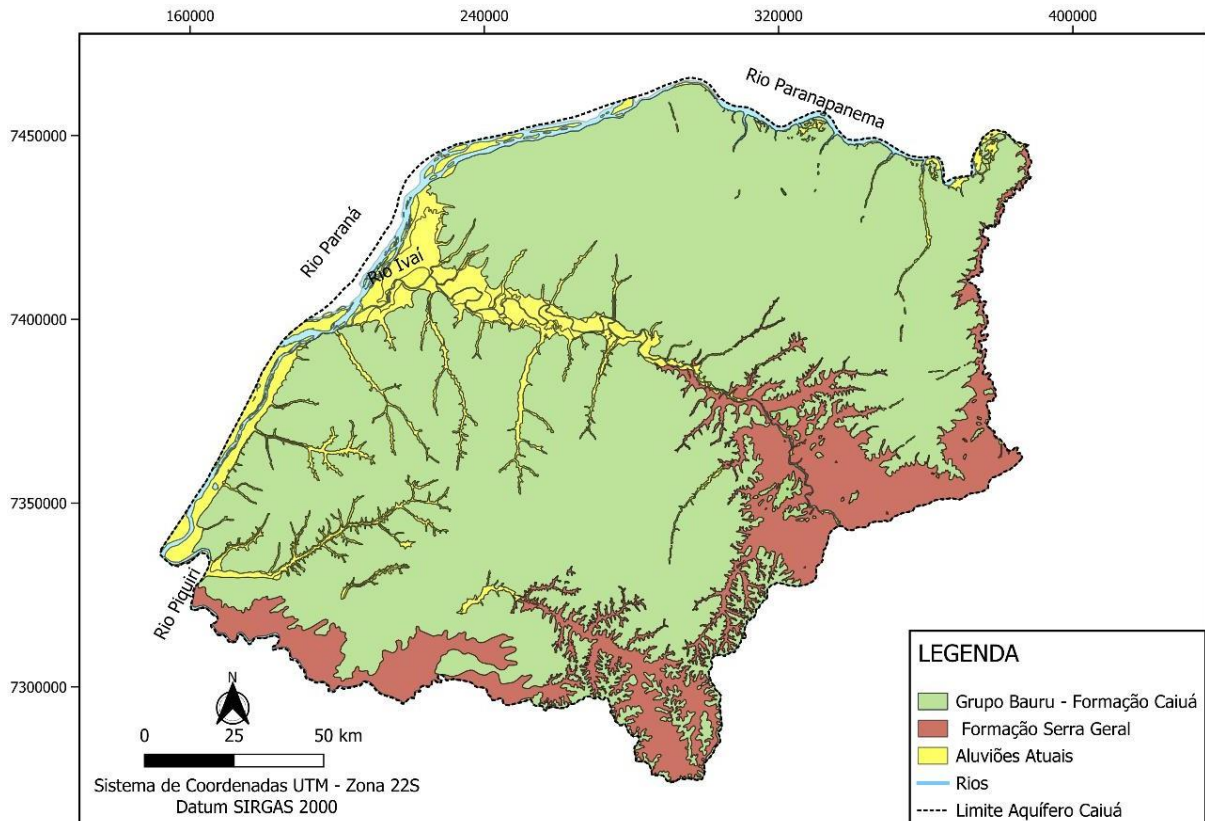
A denominação Formação Serra Geral refere-se à sequência de derrames de lavas basálticas localizada no Terceiro Planalto Paranaense. Essas rochas abrangem uma área de aproximadamente 109.000 km² no estado do Paraná, com espessuras que podem atingir até 1.500 metros (Araújo *et al.*, 1995). Composta principalmente por rochas ígneas vulcânicas, como basaltos toleíticos e andesitos basálticos (Silva, 2007), a espessura máxima da Formação Serra Geral no Paraná é de 1.400 metros, concentrada na região de Alto Piquiri (Araújo *et al.*, 1995).

A Formação Serra Geral é composta principalmente por derrames de basalto, que formam uma cobertura extensa sobreposta às camadas mais antigas da bacia sedimentar onde se encontra o Aquífero Caiuá. A Formação Serra Geral está em contato direto com a Formação Caiuá, especialmente nas regiões onde ocorreram falhas ou outras estruturas geológicas que permitiram a sobreposição das camadas basálticas sobre os sedimentos da Formação Caiuá (Fernandes, 1995).

3.3.2 Formação Caiuá

A área de estudo, está inserida no contexto litológico da cobertura suprabasáltica neocretácea da Bacia Sedimentar do Paraná referida a Formação Serra Geral, e na qual situa-se a Formação Caiuá (Figura 7), referida ao Grupo Bauru (Paula e Silva *et al.*, 1994).

Figura 7 - Mapa geológico da área de estudo.



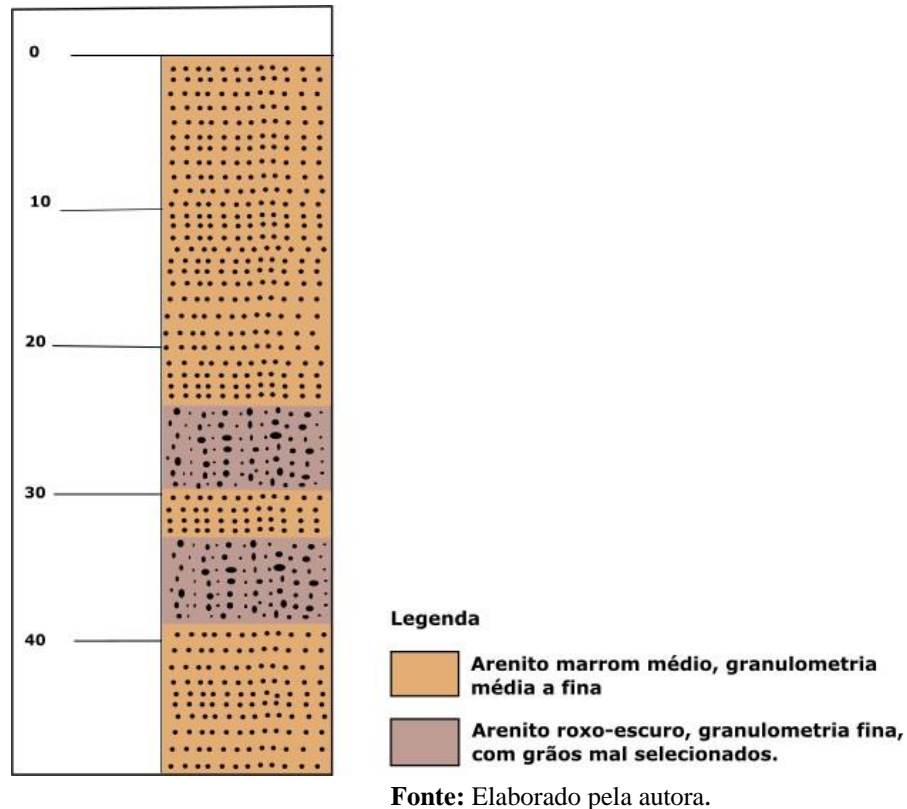
Fonte: Modificado CPRM, 2024.

Segundo Paula e Silva *et al.*, (1994) a Formação Caiuá caracteriza-se pela presença de um pacote predominante psamítico constituídos de arenitos vermelho-vinho e marrom acastanhado (figura 8), de granulometria variando de muito fina a média, grão com boa esfericidade, em geral pouco argilosos.

Esta formação é composta principalmente por depósitos sedimentares de arenitos finos a médios, intercalados com argilitos e siltitos.

Os arenitos da Formação Caiuá são bem consolidados e apresentam boa porosidade em torno de 15% a 25% e permeabilidade que varia entre os valores 10^{-3} m/s a 10^{-4} m/s (Boggiani, 2015), o que os torna capazes de armazenar e transmitir água subterrânea de forma eficaz.

Figura 8 - Perfil litológico representativo da Formação Caiuá.



3.3.3 Formação Serra Geral

A denominação Formação Serra Geral refere-se à sequência de derrames de lavas basálticas localizada no Terceiro Planalto Paranaense. Essas rochas abrangem uma área de aproximadamente 109.000 km² no estado do Paraná, com espessuras que podem atingir até 1.500 metros (Araújo *et al.*, 1995). Composta principalmente por rochas ígneas vulcânicas, como basaltos toleíticos e andesitos basálticos (Silva, 2007), a espessura máxima da Formação Serra Geral no Paraná é de 1.400 metros, concentrada na região de Alto Piquiri (Araújo *et al.*, 1995).

A Formação Serra Geral é composta principalmente por derrames de basalto, que formam uma cobertura extensa sobreposta às camadas mais antigas da bacia sedimentar onde se encontra o Aquífero Caiuá. A Formação Serra Geral está em contato direto com a Formação Caiuá, especialmente nas regiões onde ocorreram falhas ou outras estruturas geológicas que permitiram a sobreposição das camadas basálticas sobre os sedimentos da Formação Caiuá

(Fernandes, 1995).

3.3.4 *Formação Santo Anastácio*

A formação é constituída por arenitos finos a médios, apresenta coloração marrom-arroxeadado-avermelhado. Exibe intercalações de cimentação carbonática e níveis de calcretes. Situa-se estratigraficamente entre as unidades Caiuá e Adamantina, representando litofáceis transicionais de caráter misto (Fernandes, 1992).

3.3.5 *Formação Pirapozinho*

A Formação Pirapozinho é uma unidade composta quase que exclusivamente por lamitos, com raras intercalações de arenito. Mostra, regionalmente, relações de contato concordantes e interdigitadas com a Formação Caiuá. Caracteriza-se pela dominância de lamitos silto-argilosos com teor de areia variável, cinza-esverdeados a marrom-avermelhados e, mais raramente, vermelhos ou esverdeados, e característica cor chocolate no topo. A estrutura maciça é predominante; concreções e cimentação carbonáticas são comuns. Os lamitos apresentam-se medianamente bioturbados e, localmente, intensamente bioturbados, aparentemente sem restos fósseis. Intercalam-se raras lentes de arenito fino, cinza-esverdeado, síltico, maciço, carbonático e bioturbado (Paula e Silva *et al.*, 2007).

3.4 **Hidrogeologia Local**

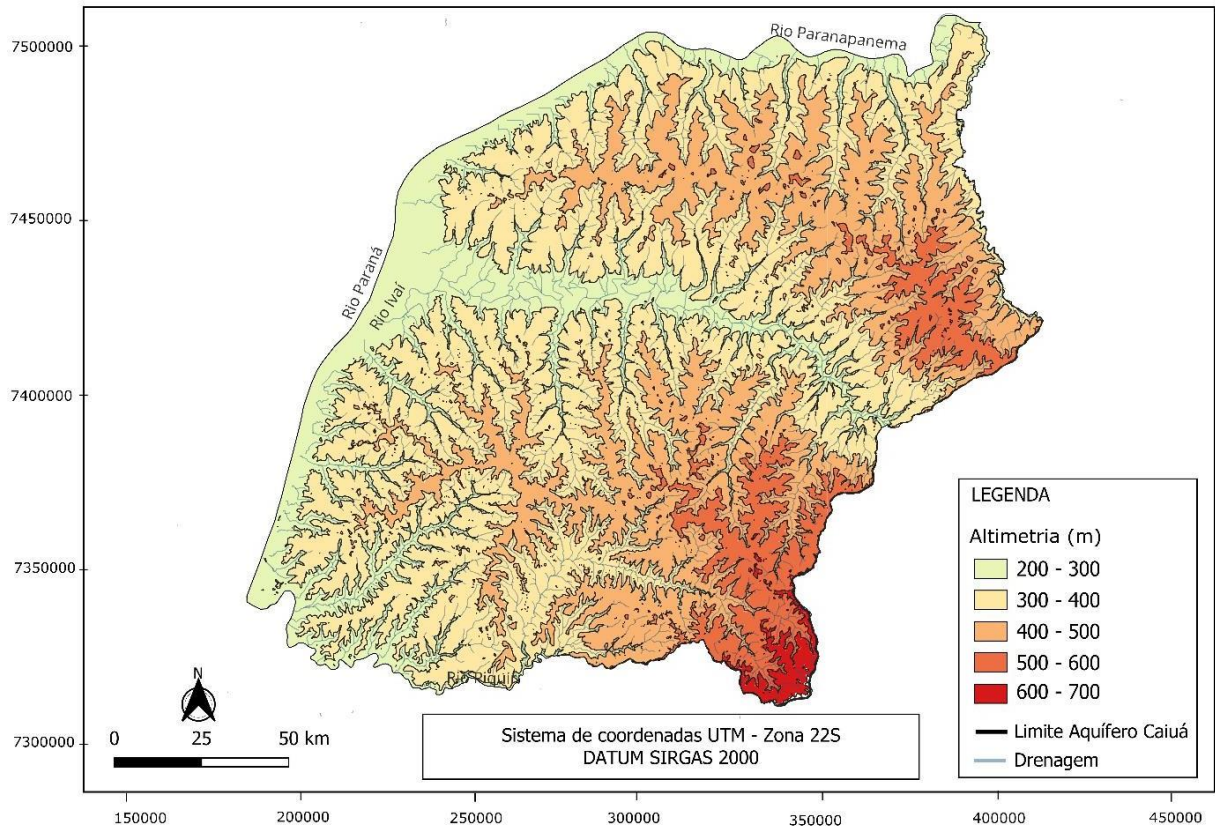
3.4.1 *Sistema Aquífero Bauru (SAB)*

O SAB se comporta como unidade hidrogeológica de extensão regional, contínua, livre e localmente confinada (DAEE, 1974; DAEE, 1976, 1979). Conforme proposta de Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.*, (2006), o Sistema Aquífero Bauru divide-se em unidades hidroestratigráficas representadas pelos aquíferos Caiuá, Santo Anastácio, Birigui, Adamantina e Marília, e pelos aquíferos Pirapozinho e Araçatuba. A unidade que corresponde a zona saturada corresponde a Formação Caiuá, que é representada por argilas compactas e arenitos.

3.4.2 *Aquífero Caiuá*

O Aquífero Caiuá consiste em um aquífero poroso, constituído geologicamente pelas rochas sedimentares cretáceas pós-basálticas da Bacia Sedimentar do Paraná, de sua formação homônima. No estado do Paraná são referidas ao Grupo Bauru, e, mais especificamente, à Formação Caiuá. A área apresenta uma variação de altimetria, onde na região o aquífero está localizado nas partes mais baixas, enquanto o basalto nas mais altas (figura 9).

Figura 9 - Mapa altimétrico do noroeste do Paraná.



Fonte: elaborado pela autora.

O aquífero Santo Anastácio é composto predominantemente por arenitos de granulação fina a média, intercalados com camadas de argilitos e siltitos. A presença dos arenitos confere ao aquífero uma boa permeabilidade e porosidade, favorecendo a recarga por infiltração direta de águas pluviais. Em contrapartida, as intercalações de argilitos e siltitos atuam como barreiras locais, reduzindo a permeabilidade e a movimentação hídrica em certas áreas (Silva *et al.*; 2010). O aquífero Pirapozinho é composto por arenitos de granulação fina a média, com menor ocorrência de argilitos e siltitos. A litologia predominante de arenitos confere ao aquífero uma alta permeabilidade, favorecendo a infiltração de águas pluviais e uma boa capacidade de armazenamento hídrico. No entanto, a presença esparsa de camadas de argilitos e siltitos pode formar barreiras que limitam localmente o fluxo de água subterrânea caracterizando o aquífero como um aquitardo (Pereira, Silva *et al.*, 2015).

As rochas sedimentares pós-basálticas apresentam litologias relativamente homogêneas, sem grandes quantidades de argilas compactas (Celligoi, 2000), oferecendo condições para que o Aquífero Caiuá seja um aquífero livre.

4 CAPÍTULO VI – REVISÃO TEÓRICA

4.1 Modelo Conceitual Hidrogeológico

O modelo hidrogeológico é utilizado como ferramenta para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários. Os modelos de águas subterrâneas detêm o papel de integrar um conjunto de informações e dados sobre áreas que necessitam de um detalhamento mais aprofundado sobre os processos hidrológicos atuantes no sistema (Anderson *et al.*, 2015).

O modelo conceitual reúne o conhecimento hidrogeológico em que consiste a área de estudo (Kresic; Mikszewski, 2013). Em sua elaboração busca-se representar o aquífero de forma esquemática, com suas camadas confinantes, recargas e descargas, conexões hidráulicas etc., e definir as principais relações causa-consequência (Gonçalves, 2016). Este modelo procura conciliar a representação da realidade do aquífero e a descrição qualitativa do seu comportamento com simplificações.

Os modelos hidrogeológicos também são fundamentais para a análise das condições de fluxo e das características de recarga e descarga dos aquíferos. As condições de fluxo podem ser normais como estacionárias, quando o fluxo ocorre sem variação temporal das condições hidráulicas, ou transitórias, quando as condições variam com o tempo. Esse entendimento é essencial para a modelagem, pois a definição do regime de fluxo influencia diretamente os cálculos de transporte e armazenamento de água subterrânea (Kresic, 2007).

4.2 Método (Water Table Fluctuation - WTF)

O método de Flutuação do Nível do Lençol Freático (WTF) é utilizado para estimar a recarga de aquíferos freáticos, baseando-se nas variações do nível de água subterrânea ao longo do tempo (Healy; Cook, 2002). O método pressupõe que o aumento no nível do lençol freático reflete a recarga, enquanto a diminuição está associada à extração de água ou perda por fluxos subterrâneos.

A recarga pode ser calculada a partir da seguinte fórmula:

Onde:

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

R: recarga do aquífero (volume de água por unidade de área)

S_y: coeficiente de armazenamento específico (fração da água armazenada por unidade de volume do solo)

Δh: variação no nível do lençol freático

Δt : intervalo de tempo correspondente à variação de Δh .

O método é vantajoso por sua simplicidade e aplicabilidade em áreas onde o nível freático pode ser monitorado, embora dependa da qualidade dos dados de nível de água e do conhecimento do coeficiente de armazenamento (Healy; Cook, 2002).

4.3 Potenciometria

A elaboração de um mapa potenciométrico representa um dos principais estudos de natureza hidrogeológica física a ser desenvolvido numa determinada área de ocorrência de um aquífero. Através desse mapa, possibilita-se o conhecimento de zonas de descarga, recarga e trânsito do aquífero, sentido do fluxo subterrâneo principal e fluxos secundários, áreas com maior ou menor transmissividade, dentre outras informações não menos importantes (De Lucena, 2004).

Os mapas de curvas equipotenciais são obtidos a partir de poços de monitoramento espalhados pela região que se deseja representar. Estes mapas são elaborados a partir dos mais variados métodos de interpolação, porém nem sempre a densidade de informações de cota potenciométrica disponível é suficiente para a realização de uma boa estimativa (Da Rocha *et al.*, 2009).

A variação anual da potenciométrica em aquíferos livres é um fator importante para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que, em última análise será o principal dado para a determinação das reservas hídricas renováveis e para as estimativas de disponibilidades hídricas. Como em aquíferos livres a superfície potenciométrica coincide com a elevação do nível freático, a análise da potenciometria, na prática, significa o estudo da evolução da superfície freática no tempo e no espaço (Formagio *et al.*, 2009).

5 CAPÍTULO V – METODOLOGIA

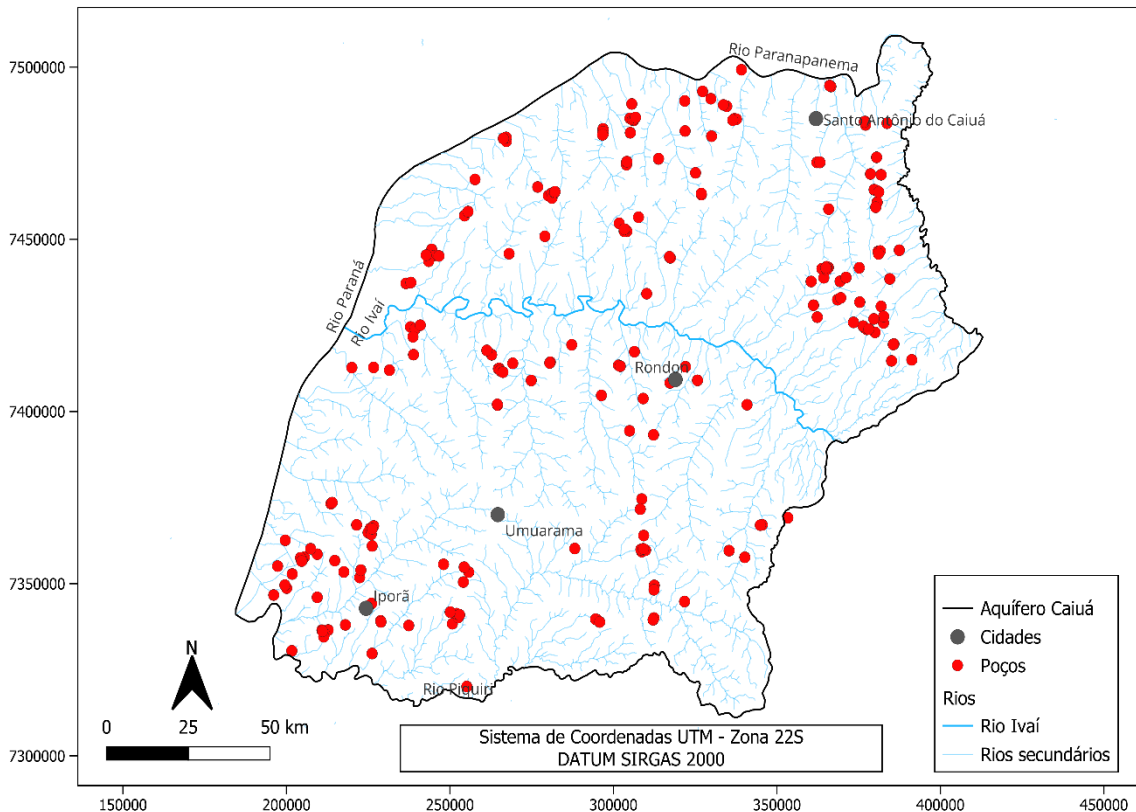
5.1 Monitoramento Hidrogeológico

Os dados hidrogeológicos do trabalho foram retirados a partir do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), e da Rede Integrada de Águas Subterrâneas (RIMAS) onde fornecem dados de nível de água, vazão, precipitação dos rios presentes na área de estudo; a partir destes dados foi possível a obtenção de informações sobre os aspectos construtivos dos poços, bem como às flutuações nos níveis de água subterrânea. Adicionalmente, foi possível extrair informações de natureza geológica como sobre a composição litológica, e suas implicações na permeabilidade e no armazenamento de água subterrânea. Além disso, possibilitam a identificação de estruturas geológicas, como fraturas, falhas e dobras, e suas influências no escoamento da água subterrânea. Informações sobre o perfil estratigráfico, distribuição de unidades aquíferas, contatos geológicos, continuidade lateral e vertical, e hidrogeológica onde é possível obter dados sobre níveis de água, permitindo identificar variações sazonais e tendências ao longo do tempo; além de identificar a conexão entre os poços, processos de recarga, a infiltração de água da chuva e o impacto estrutural na permeabilidade local, tanto da referida base de dados quanto de relatórios disponibilizados pela CPRM.

As informações coletadas foram submetidas a uma análise detalhada e posteriormente representadas graficamente por meio do software Excel. Além disso, utilizando-se desta ferramenta, foram realizadas avaliações acerca das variações nos níveis de água, bem como estimativas relativas à recarga hídrica do aquífero estudado.

Por fim, foram criteriosamente selecionados os poços (Apêndice I), este processo de seleção seguiu critérios específicos estabelecidos para garantir a representatividade e a relevância dos dados analisados. Os critérios incluíram a localização geográfica estratégica para a dinâmica do aquífero, a disponibilidade de dados históricos de monitoramento, a profundidade dos poços e a qualidade da cobertura hidrológica da área, garantindo que os dados representassem as variações nos níveis de água subterrânea e as condições hidrológicas da Formação Caiuá. Foram priorizados poços (figura 10) com dados históricos consistentes e conectividade hidrológica com os aquíferos em estudo, permitindo análises comparativas e a validação do modelo hidrogeológico aplicado.

Figura 10 - Mapa dos poços de monitoramento da rede RIMAS e SIAGAS.



Fonte: elaborado pela autora.

5.2 Potenciometria Regional

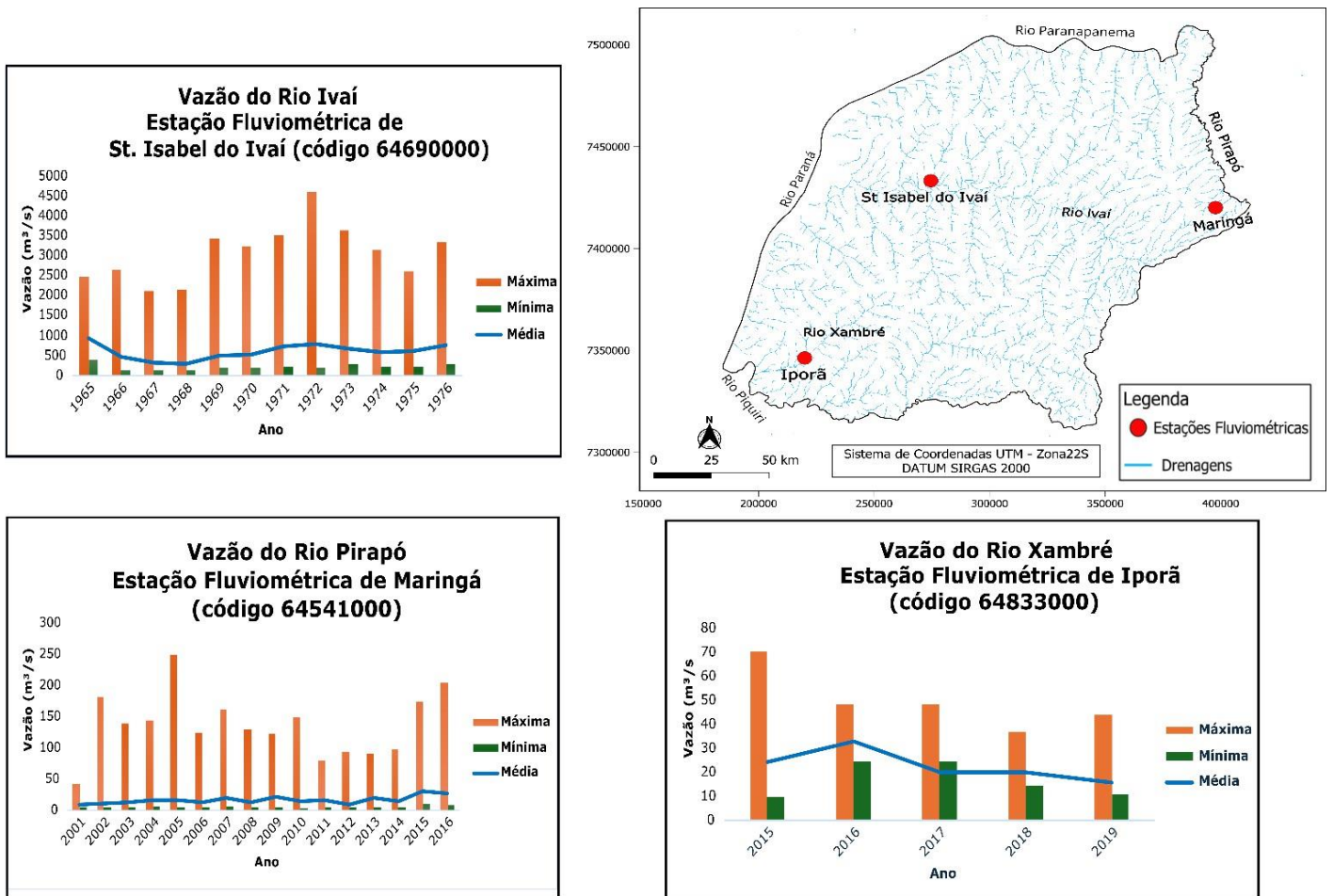
Para a análise da potenciometria regional do aquífero, foi utilizado o software ArcGIS, (versão 10.8.2)), que é amplamente empregue para análise espacial e mapeamento hidrogeológico. O ArcGIS possibilitou a integração de dados hidrogeológicos e o processamento espacial para a elaboração dos mapas potenciométricos. O intervalo de tempo utilizado para a construção dos mapas considerou dados de monitoramento ao longo de um período de dois anos, com medições sistemáticas de níveis piezométricos e dados obtidos pela rede RIMAS e SIAGAS. O uso dessa abordagem permitiu identificar padrões e tendências no fluxo de água subterrânea, bem como destacar áreas de recarga e descarga no aquífero da região em estudo.

5.2.1 Fluviometria

Os dados fluviométricos utilizados no trabalho foram retirados do portal HidroWeb que é uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), onde foi possível ter acesso as informações que foram calculadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), acerca dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, acerca da região de estudo.

A partir das informações coletadas nas estações fluviométricas foi possível calcular as vazões dos rios Ivaí, Pirapó e Xamburé, que são responsáveis pela maior parte da recarga e descarga do aquífero Caiuá, onde a variação fluviométrica foi calculada a partir de uma escala de tempo que variou entre 4 e 10 anos, e com isso foi possível obter parâmetros de máxima, média e mínima de vazão dos rios (figura 11).

Figura 11 - Mapa das estações fluviométricas, localizadas na região do aquífero Caiuá, e gráficos de vazão dos rios Ivaí, Pirapó e Xamburé ao longo de 4 á 10 anos, destacando vazões máximas, médias e mínimas.



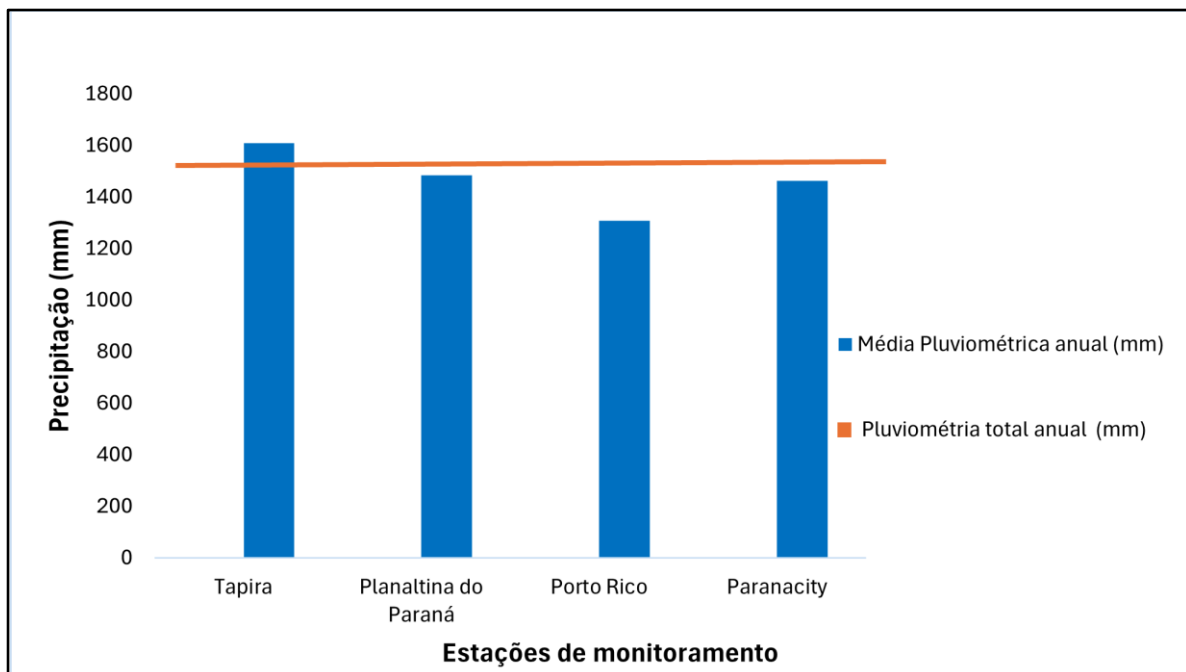
Fonte: elaborada pela autora

5.2.2 Pluviometria

Os dados de precipitação para a área de estudo foram extraídos dos bancos de dados das estações meteorológicas e pluviométricas do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IAPAR/EMATER), do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e do Instituto das Águas do Paraná.

A partir destas informações foi possível analisar as condições pluviométricas da região, onde o gráfico (figura 12) apresenta a média anual de precipitação e o total pluviométrico, com base nas medições das estações de monitoramento localizadas nos municípios de Tapira, Planaltina do Paraná, Porto Rico e Paranacity.

Figura 12 - Gráfico da média anual de precipitação e do total pluviométrico para as estações de monitoramento em Tapira, Planaltina do Paraná, Porto Rico e Paranacity.



Fonte: elaborado pela autora.

5.3 Parâmetros Hidrodinâmicos

A análise dos principais parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Caiuá, como a porosidade efetiva (S_y) e a condutividade hidráulica (K), foi realizada com base em dados de poços das redes de monitoramento, fundamentados em estudos anteriores já realizados na região. Esses trabalhos prévios forneceram os dados essenciais que sustentam a caracterização hidrogeológica do aquífero, permitindo a análise comparativa e a validação dos resultados obtidos.

5.3.1 Porosidade efetiva (S_y)

De acordo com Fitts (2015), a porosidade efetiva é definida como a razão entre o volume de vazios interconectados, que permitem a transmissão de água, e o volume total do material, sendo uma grandeza adimensional. Para os cálculos de porosidade efetiva (S_y) do Aquífero Caiuá, foi utilizado o valor médio de 0,15, conforme indicado por AGUASPARANÁ (2010, p. 18). No entanto, Celligoi (2000), ao realizar testes em laboratório com amostras provenientes dos municípios de Nova Esperança e Terra Rica, identificou valores médios de 0,168 e 0,226; respectivamente. Dessa forma, esses valores foram aplicados nos cálculos referentes aos poços localizados dentro dos limites desses municípios.

5.3.2 Condutividade Hidráulica (K)

A condutividade hidráulica refere-se à capacidade com que a água subterrânea se desloca no meio geológico, sendo que materiais com maiores condutividades hidráulicas possuem maior aptidão para transmitir água em comparação com aqueles de baixa condutividade (Fitts, 2015).

Segundo Fitts (2015), em um meio heterogêneo, o valor da condutividade hidráulica varia de acordo com o local, enquanto em um meio anisotrópico, essa variação ocorre conforme a direção, ou seja, a condutividade na direção X difere da condutividade na direção Y. Um meio completamente isotrópico, por outro lado, apresenta a mesma condutividade em todas as direções. Para Fitts (2015), um meio totalmente homogêneo e isotrópico não existe na natureza, mas pode ser considerado assim para simplificações matemáticas quando adequado.

6 CAPÍTULO VI – DISCUSSÃO E RESULTADOS

6.1 Unidades Hidroestratigráficas

No Aquífero Caiuá, as unidades hidroestratigráficas foram definidas com base nas características geológicas e hidrogeológicas das camadas que o compõem, a partir de dados de poços construtivos das litologias que afloram na área. As principais unidades identificadas no Aquífero Caiuá incluem:

Formação Caiuá: Esta formação foi caracterizada principalmente por depósitos de arenitos finos a médios, com intercalações de argilitos e siltitos, além de apresentar alta permeabilidade e capacidade de armazenamento de água subterrânea.

Formação Santo Anastácio: Composta principalmente por arenitos médios a grossos, esta formação possui boa permeabilidade e é uma importante unidade produtora de água subterrânea no Aquífero Caiuá.

Formação Pirapozinho: Esta formação é composta principalmente por argilitos e siltitos, com intercalações de arenitos, onde estas camadas atuam como uma barreira ou confinamento em algumas áreas do Aquífero Caiuá configurando-se como um aquitardo. Na escala de trabalho atual a representação dessas duas formações não convém pela sua pequena extensão, e pequena representatividade nos parâmetros do modelo.

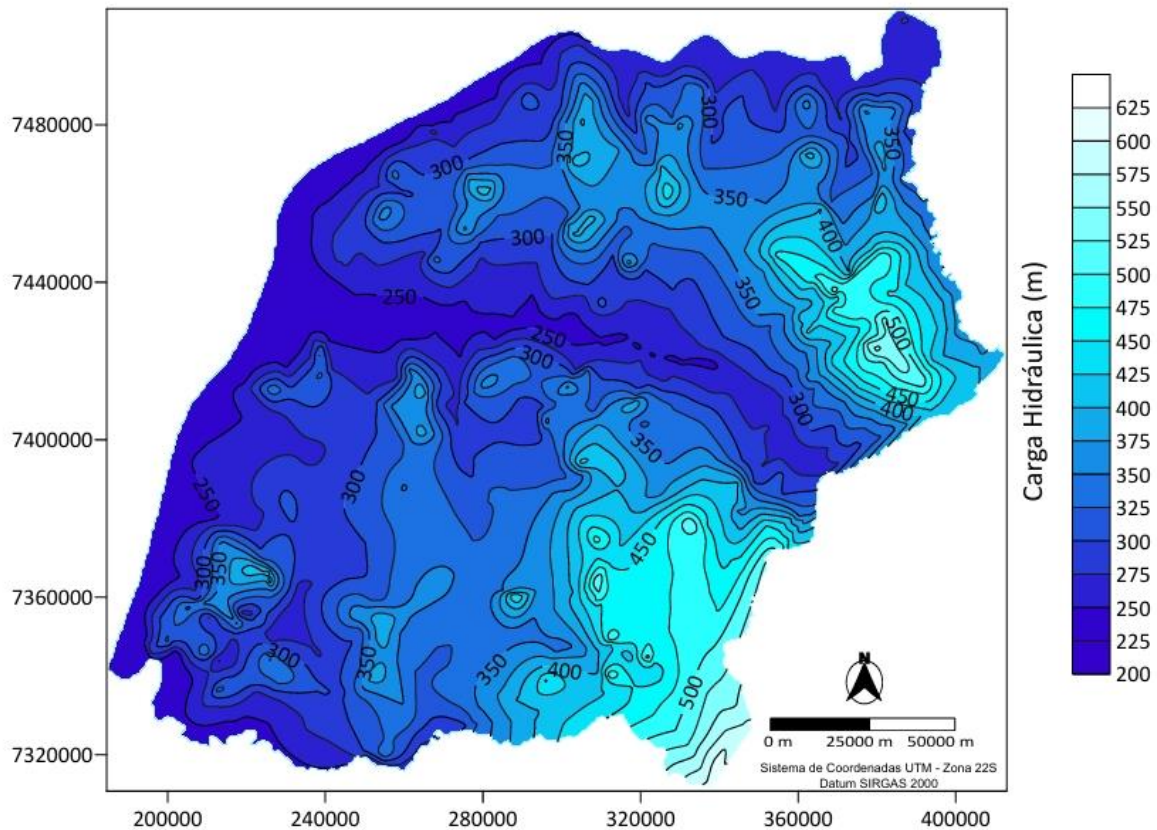
Formação Serra Geral: Os derrames basálticos da formação apresentam espessuras que variam entre 100 – 300 m, onde em regiões que o basalto é contínuo e impermeável, acaba sendo um limitante em relação a recarga e movimentação da água nos arenitos da Formação Caiuá, mas onde há fraturas pode ocorrer a movimentação de água entre as duas unidades.

6.2 Condições de Fluxo

A potenciometria demonstrou a relação entre os mananciais subterrâneos e superficiais, sendo o rio Paranapanema de caráter efluente na área estudada. A recarga do aquífero está associada aos altos topográficos adjacentes na porção norte do rio Paranapanema e a sua descarga se dá na direção do canal e da foz do rio Ivaí.

O mapa potenciométrico apresentado na (Figura 13) foi elaborado levando-se em consideração os dados hidrológicos dos poços disponibilizados pelo SIAGAS, que mediram diretamente o nível de água do aquífero; em conjunto com os dados referente a topográfica dos cursos d' água, onde foi assumido que onde há drenagens, há também o afloramento da água do aquífero, que estão situados ao longo de todos os rios principais, Ivaí, Pirapó, Piqueri, Paraná e Paranapanema que indicam a direção de fluxo preferencial está para porção mais a sul da área, onde há o encontro do rio Ivaí e Piqueri.

Figura 13 - Mapa potenciométrico e direção preferencial de fluxo subterrâneo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da análise do mapa potenciométrico, foi possível identificar padrões específicos no fluxo de águas subterrâneas e sua relação com o balanço hídrico da área de estudo. Foi observado que a estrutura do fluxo ocorre predominantemente em áreas de maior carga hidráulica para as de menor carga, conforme indicado pelas linhas de equipotenciais e pelas setas direcionadas. Esse movimento evidencia que os principais rios, como o Rio Paraná, o Rio Paranapanema e o Rio Ivaí, atuam como áreas de descarga do aquífero, recebendo um fluxo contínuo de água subterrânea.

As regiões onde as linhas de carga hidráulica se encontram mais próximas indicam gradientes hidráulicos mais acentuados, indicando uma maior intensidade de fluxo localizada nessas áreas. Esses gradientes podem estar associados a condições de maior permeabilidade ou variação.

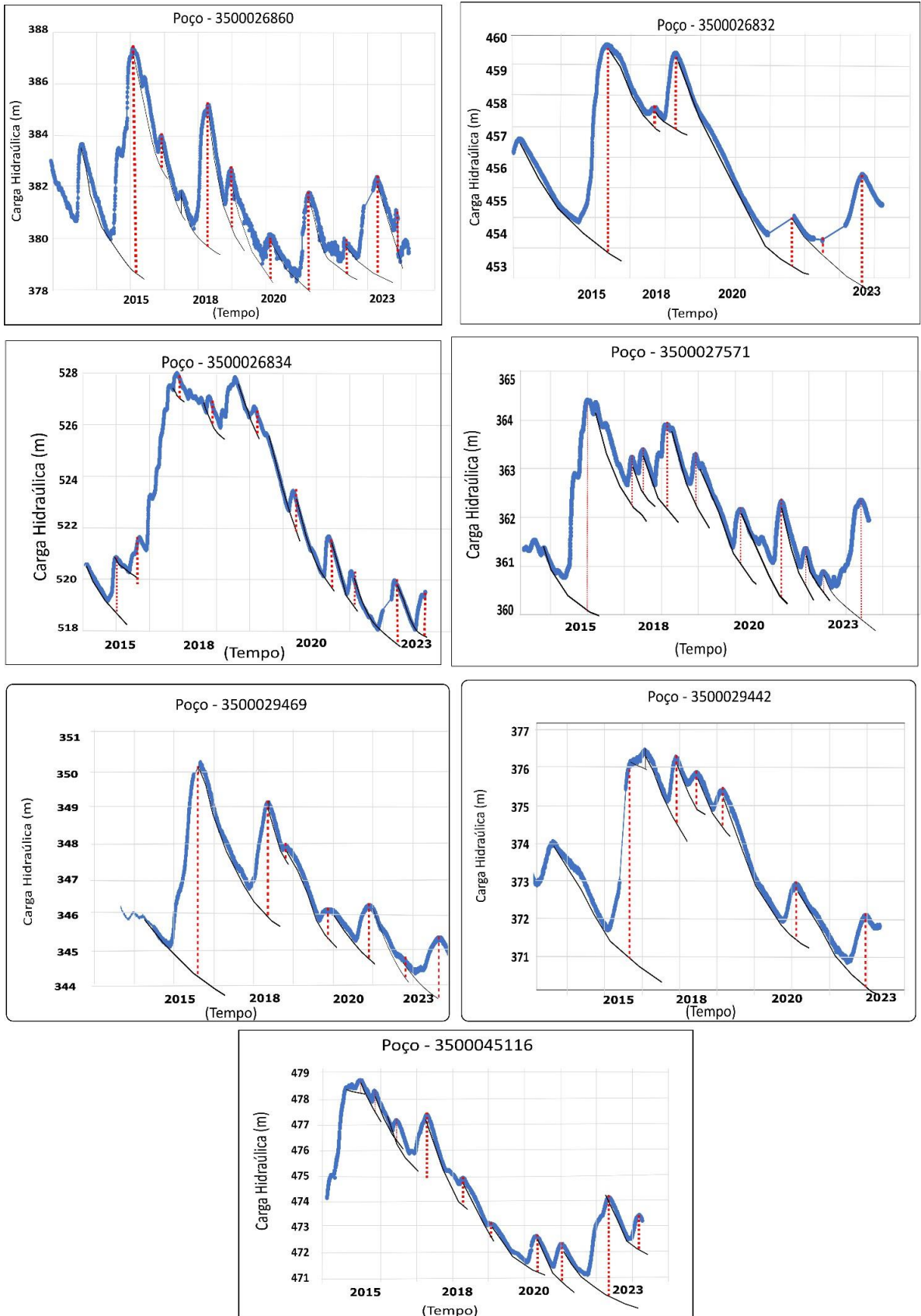
O divisor de águas, representado pela linha tracejada, delimita a separação entre as principais bacias hidrogeológicas da área que são a Bacia do Paraná e a Bacia do Paranapanema. Essa divisão sugere que a seção do fluxo é orientada para diferentes sistemas de drenagem, com cada bacia contribuindo para o escoamento em direção aos rios indicados.

Além disso, as áreas de carga hidráulica mais elevadas podem ser interpretadas como zonas de recarga do aquífero, onde a infiltração da água da superfície alimenta o sistema aquífero. Já as áreas de menor carga, localizadas próximas aos rios, configuram zonas de descarga, onde o aquífero contribui para a manutenção do fluxo fluvial.

6.3 Water Table Fluctuation – WTF

A partir do Método de Flutuação do Nível do Lençol Freático (WTF), foi possível a elaboração dos gráficos apresentados na (figura 14), que ilustram a flutuação da carga hidráulica ao longo do tempo em diferentes poços de monitoramento do aquífero. Eles mostram as variações do nível freático, onde os aumentos indicam eventos de recarga, e as quedas refletem as perdas por extração ou fluxos subterrâneos. A linha azul contínua representa os dados observados da carga hidráulica em cada poço, enquanto a linha vermelha pontilhada corresponde ao que é a variação do nível freático calculada ao longo do tempo.

Figura 14 - Gráfico (Carga Hidráulica x Tempo).



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir de dados de monitoramento de 7 poços de monitoramento (tabela 1) da rede RIMAS, foi possível calcular a média de recarga de cada poço ao longo do período de 2015 a 2022. E conjunto com dados de precipitação das estações de monitoramento do HidroWeb, disponibilizados pelo (SNIRH), foi possível determinar a média anual de precipitação de cada poço no período de 7 anos, e como isso comparar a relação do quanto a precipitação contribui para a recarga do aquífero ao longo do tempo (tabela 2).

Tabela 1 - Identificação dos poços e estações meteorológicas associadas.

Id poço	Longitude	Latitude	Id estações	Longitude	Latitude	Id estações	Longitude	Latitude
3500026830	269780	7363217	2352050	303118	7452708	2352031	333574	7366906
3500026832	354562	7446860	2352039	361848	7431221	2352046	302379	7412694
3500026834	332657	7378760	2352062	377861	7435666	2352045	341641	7403909
3500027571	280702	7414314	2352042	298418	7381070	2351013	402890	7409977
3500029442	301763	7454640	2353033	266567	7413988	2353038	266761	7440093
3500029469	256342	7408575	2353010	245780	7445225	2353044	274619	7434032
3500045116	309765	7358256	2353034	288283	7419522	2352048	300785	7438581
			2352060	299254	7446536			

Fonte: elaborado pelo autor.

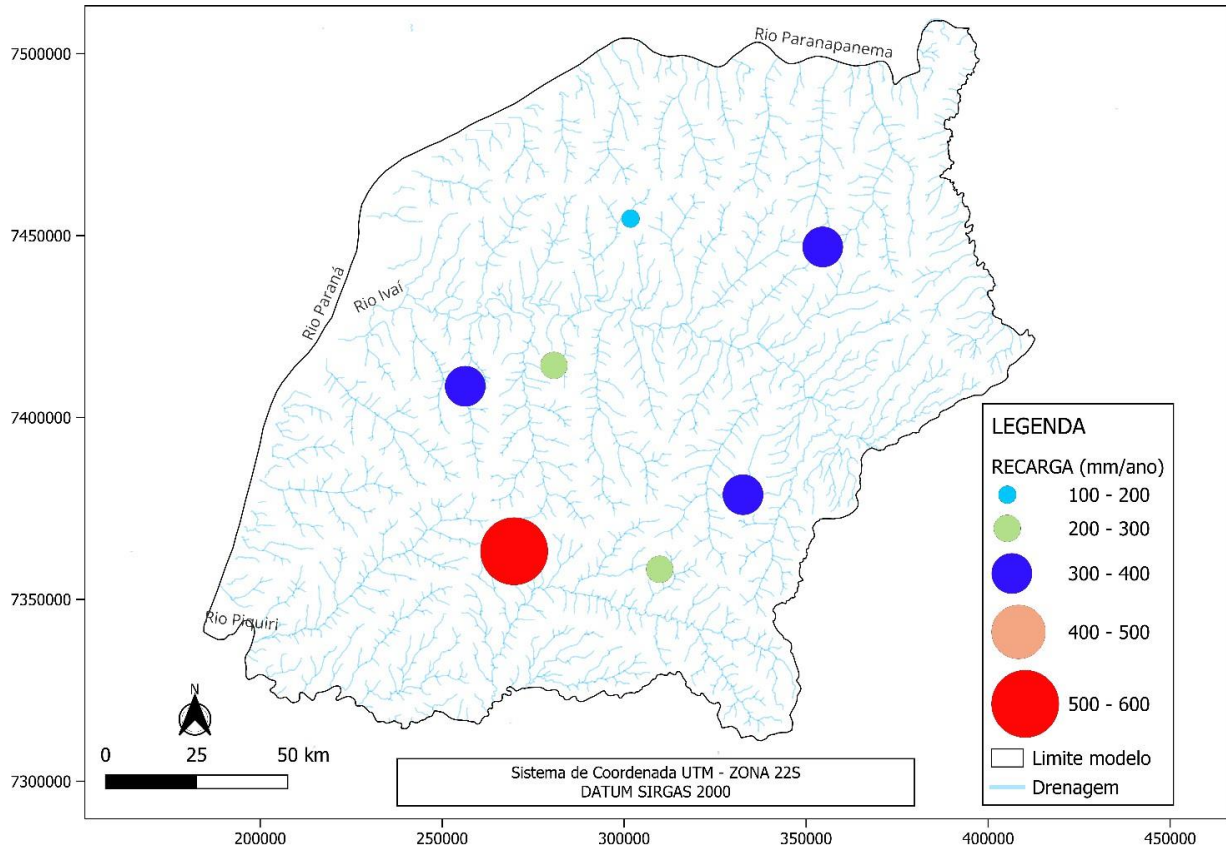
Tabela 2 - Relação entre recarga (R), precipitação (P) e a razão R/P (%) no período de 2015 a 2022.

Ano	Recarga (R) (mm)	Precipitação (P) (mm)	R/P(%)
2015	601	2417	24,85
2016	385	1555	24,77
2017	155	1835	8,46
2018	460	1624	28,34
2019	211	1227	17,22
2020	172	1151	14,97
2021	355	1363	26,03
2022	195	1382	14,11
Média anual			19,84375

Fonte: elaborado pelo autor.

A distribuição da recarga ao longo da área de aquífero Caiuá (figura 15), mostra que as maiores recargas ocorrem na região centro-sul, isso pode ter influência dos poços e estações onde foram coletados os dados de precipitação, que estão localizados onde as espessuras são mais elevadas, e com isso possuem uma capacidade de infiltração vertical e armazenamento do fluxo subterrâneo.

Figura 15 - Mapa de recarga Aquífero Caiuá.

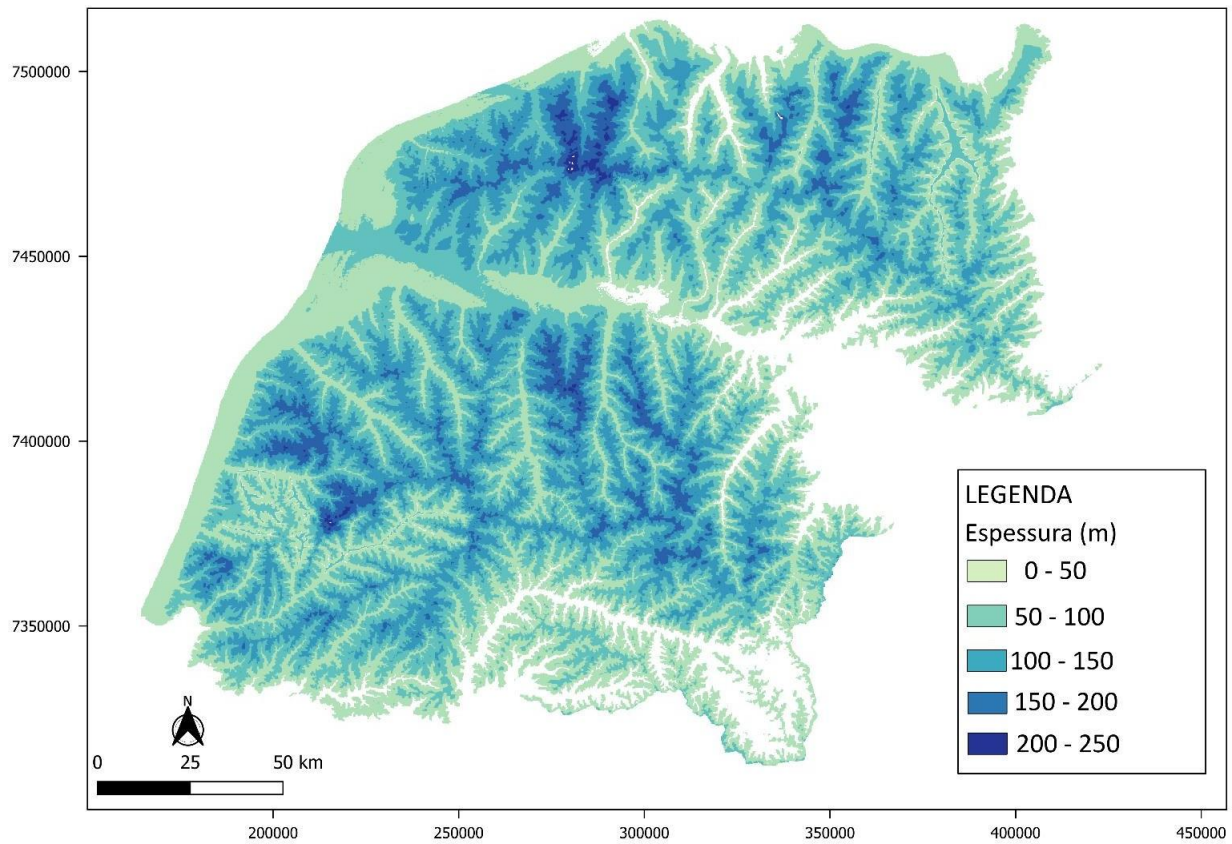


Fonte: elaborado pela autora.

6.4 Espessura Aquífero

A partir de dados de profundidade de poços cadastrados na área na rede RIMAS e SIAGAS foi elaborado um mapa de espessura (Figura 16), onde foi possível observar que as maiores espessuras do aquífero estão concentradas regiões centrais (centro-noroeste e na porção centro-sudeste), e as menores espessuras correspondem as áreas a leste e sul que se estão nas bordas e fazem contato com a formação Serra Geral, com isso o mapa apresenta que a espessura máxima está próxima de 200 metros.

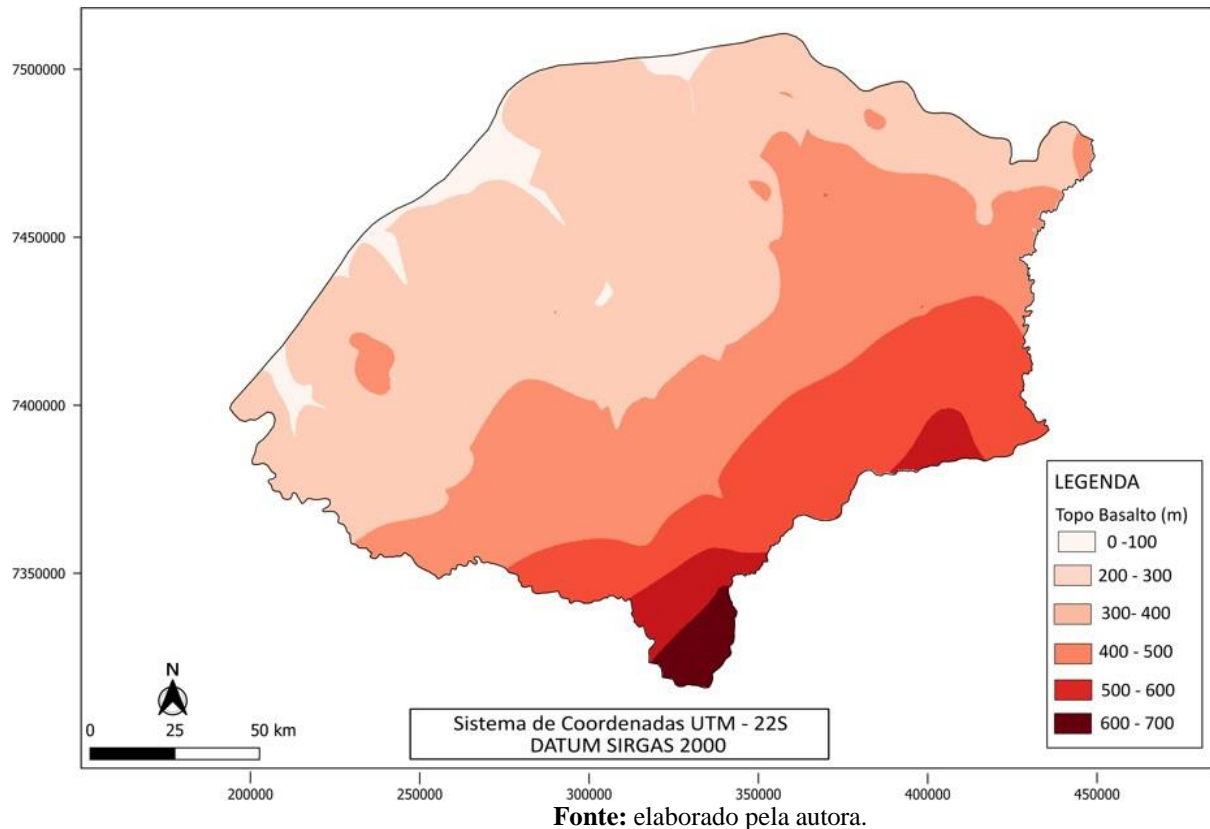
Figura 16 - Mapa de espessura aquífero Caiuá.



Fonte: elaborado pela autora.

O topo do basalto na região de estudo demonstra que as áreas mais a norte e noroeste o basalto aparece em altitudes menos elevadas, onde possivelmente o basalto estará aflorante. Já nas regiões em que o basalto aparece em cotas menores podem indicar maior interação entre o aquífero Caiuá e a superfície (figura 17).

Figura 17 - Mapa da altitude estimada do contato entre a Formação Caiuá e a Formação Serra Geral na área.



6.5 Análise quantitativa de volume de água

Para estimar o volume de água armazenada no aquífero, foi necessário, inicialmente, calcular o volume de rocha saturada (VRs). Esse cálculo foi realizado utilizando a Equação 1, que considera informações do contato geológico, da potenciométrica e da delimitação do Aquífero Caiuá:

$$VRs = A \times C \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

- A é a área total do aquífero na região analisada;
- C corresponde à espessura média da coluna de água existente no Aquífero Caiuá.

A espessura da coluna de água foi estimada subtraindo a elevação do contato entre as formações Caiuá e Serra Geral da superfície potenciométrica. Com essa metodologia, obteve-se um volume de rocha saturada igual a $VRs = 745.401.200.000 \text{ m}^3$. Esse número corresponde ao volume total de rocha porosa e fissurada que contém água.

Para calcular o volume de água efetivamente disponível no aquífero (VA), foi utilizada a média do coeficiente de armazenamento específico (S_y), obtido a partir de dois estudos: Calligoi (2000), que apresentou valores de S_y de 0,226 e 0,168, e AGUASPARANÁ (2010), que indicou $S_y = 0,15$. A média ponderada desses valores resultou em $S_y = 0,181$, que foi

utilizado no cálculo, descrito pela Equação 2:

$$VA = VRs \times Sy \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- VA representa o volume de água efetivamente disponível no aquífero, em metros cúbicos (m³);
- Sy é o valor médio do coeficiente de armazenamento específico.

Com a substituição dos valores calculados, obteve-se um volume efetivo de água de VA = 134.917.617.000 m³, o que equivale a aproximadamente 134,9 km³. Esse número representa a fração do VRs que pode ser utilizada, ou seja, o volume de água efetivamente armazenado no aquífero e disponível para aproveitamento.

6.6 Modelo Conceitual Aquífero Caiuá

O modelo conceitual desenvolvido para representar o aquífero Caiuá na região do Noroeste do Paraná foi elaborado com base na análise de dados de poços das redes SIGAS e RIMAS. A análise permitiu a identificação das unidades geológicas predominantes, suas características e respectivas espessuras médias, elementos fundamentais para a construção do modelo. Este modelo visa descrever a dinâmica hidrogeológica da região e as unidades responsáveis pelo armazenamento e transporte de água no aquífero.

Os dados analisados mostram que a Formação Caiuá, que é o aquífero principal da região, possui características favoráveis para a movimentação e armazenamento de água subterrânea. A espessura média da Formação Caiuá varia entre 60 e 120 metros. Estes dados foram obtidos através da análise dos poços das redes SIGAS e RIMAS, que mostraram arenitos bem selecionados e de boa permeabilidade, fatores essenciais para a dinâmica de água no aquífero.

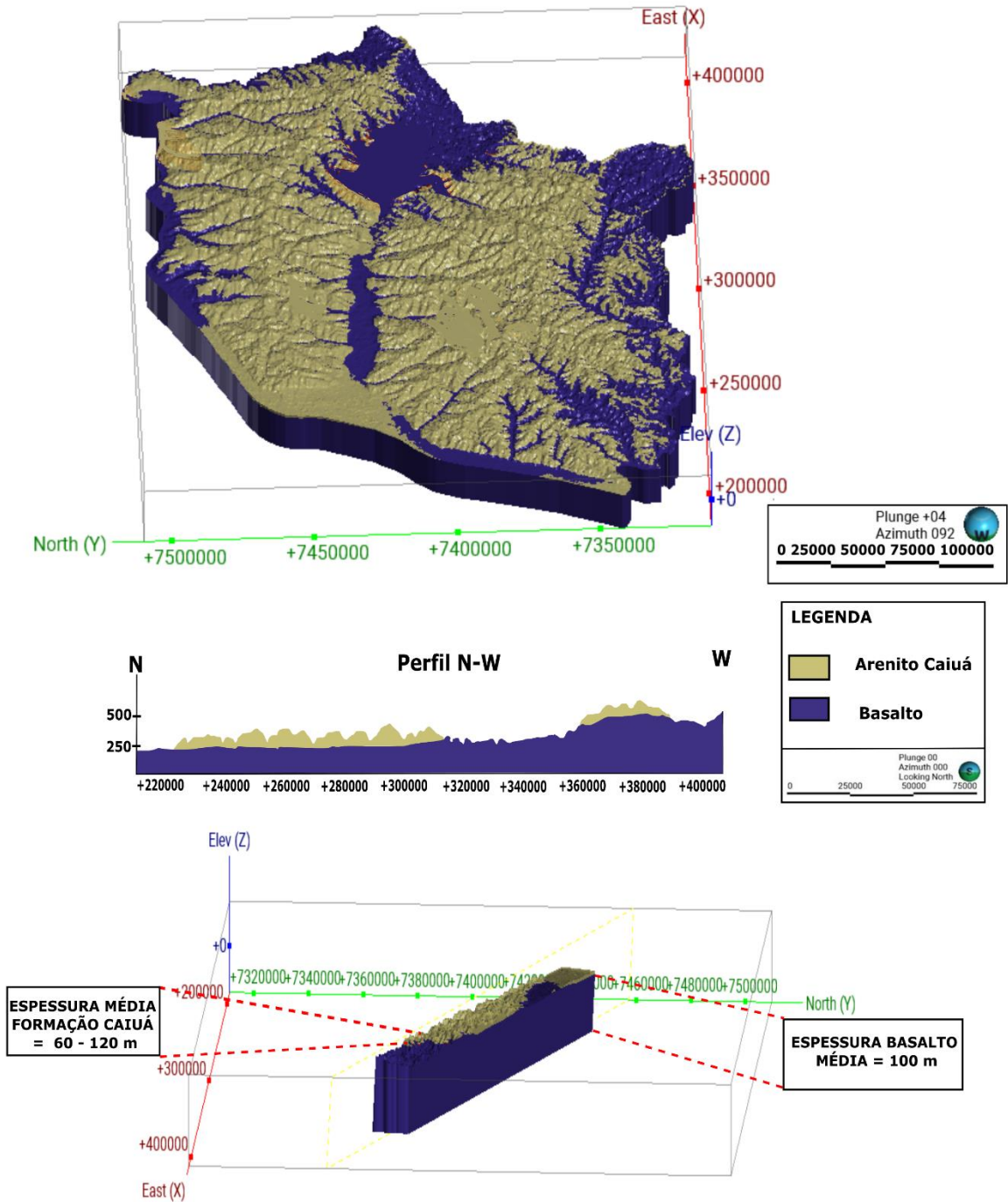
Por sua vez, a Formação Serra Geral, constituída por basaltos, atua como a base impermeável do sistema aquífero. Esta unidade apresenta espessuras médias entre 50 e 100 metros, também derivadas da análise dos dados disponíveis. A presença da Formação Serra Geral impede o fluxo de água em direção a camadas mais profundas, servindo como barreira hidrogeológica e contribuindo para a estabilidade do aquífero.

No modelo conceitual final, a Formação Caiuá representa o topo do sistema aquífero, onde ocorrem os processos de recarga e armazenamento de água através da infiltração. A Formação Serra Geral, localizada na base do sistema, é caracterizada como a barreira impermeável que confina a água no aquífero, limitando seu movimento para as profundidades.

Essa abordagem possibilitou a construção de um modelo hidrogeológico claro,

fundamentado nas espessuras médias encontradas a partir da análise dos dados de poços da rede SIGAS e RIMAS. A combinação dessas informações permite compreender os processos hidrológicos e a dinâmica de fluxo do aquífero Caiuá, oferecendo uma base sólida para estudos hidrogeológicos e planos de gestão de recursos hídricos na região do Noroeste do Paraná.

Figura 18 - Modelo Conceitual Aquífero Caiuá.



Fonte: elaborado pela autora

7 CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES

A partir dos dados adquiridos ao longo do trabalho a cerca do aquífero Caiuá, evidenciou a relevância desse sistema para o abastecimento hídrico na região noroeste do Paraná.

A construção do modelo permitiu a identificação de áreas de alta potencialidade de recarga, evidenciando que em quase toda sua extensão apresenta-se livre; e semi-confinado no contato da unidade saturada (F.m Caiuá) para a insaturada (F.m Serra Geral).

A análise dos dados de vazão, fluviometria e pluviometria forneceu uma compreensão detalhada sobre a capacidade de armazenamento e a dinâmica de recarga do aquífero, que se revelou fundamental para garantir a sustentabilidade hídrica local. Observou-se que o Aquífero Caiuá, ao apresentar características de alta porosidade e permeabilidade em suas formações sedimentares de arenito da formação Caiuá, possui um significativo volume de 134 Km³ água armazenada. Esse volume, aliado às condições geológicas que favorecem a recarga por infiltração direta das precipitações, contribui para um ciclo de recarga e descarga.

Os rios Ivaí, Pirapó e Xambré desempenham um papel crucial na dinâmica do aquífero. Os gráficos indicam que as vazões médias anuais desses rios variam entre 25 m³/s e 35 m³/s, com picos de vazão máxima chegando a 55 m³/s em períodos de cheia e valores mínimos abaixo de 15 m³/s durante a estiagem. Esses dados refletem uma conexão hidráulica direta com o Aquífero Caiuá, onde esses rios atuam tanto como áreas de descarga quanto de recarga em diferentes trechos.

A recarga média anual do Aquífero Caiuá foi estimada em 150 mm/ano, representando cerca de 10% a 12% da precipitação média anual, que varia entre 1500 e 1600 mm/ano. Essa recarga é limitada por fatores como a alta evapotranspiração anual, que alcança valores de até 1200 mm/ano, além das características hidrogeológicas locais, como solos arenosos altamente permeáveis e argilitos que atuam como barreiras hidráulicas.

A análise espacial do fluxo hídrico mostra que a recarga está associada a regiões de topo mais elevado, enquanto a descarga ocorre principalmente nas áreas próximas aos canais dos rios. No caso do rio Ivaí, a descarga do aquífero é mais evidente na porção sul da área de estudo, próximo à sua confluência com o rio Piquiri, reforçando a importância das interações entre águas superficiais e subterrâneas.

Embora o volume total de água disponível no aquífero seja considerável, acaba sendo uma fonte de abastecimento quase que exclusiva por ser a maior rede de abastecimento da região noroeste do Paraná, isso faz com que a exploração contínua e em alta intensidade a longo do tempo possa vir resultar em uma redução do volume estático e dinâmico do sistema, com

impactos negativos para a população.

Portanto, conclui-se que o Aquífero Caiuá constitui uma importante reserva hídrica, mas exige estratégias de manejo sustentável para evitar a superexploração. Medidas de monitoramento constante e políticas de uso responsável são recomendadas para assegurar que o volume de água do aquífero continue a atender as necessidades da população e das atividades econômicas da região, sem comprometer sua integridade e capacidade de recuperação natural.

8 CAPÍTULO VIII – BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA F.F.M. de & MELO M.S. **A Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozoico**. São Paulo, IPT, I:12-45 (Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000). 1981.
- ALMEIDA F.F.M. **Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul Americana**. Rev. Bras. Geociências 13 (3):139-158. 1983.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023**. Brasília, 2023.
- ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. **Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport**. Academic Press, Inc. (1992).
- BOGGIANI, Beatriz Hadler. **Análise de fácies, porosidade e permeabilidade de arenitos fluviais e eólicos das Formações Pedra Pintada e Varzinha - RS, como análogos de reservatório de hidrocarbonetos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- BRASIL. **Manual de Saneamento** (3ª ed ed.). Brasília. 2007.
- BREDEHOEFT, J.D. **The conceptualization model problem—surprise**. *Hydrogeology Journal*, 13, 37-46. (2005).
- CASTANY, G. **Tratado Practico de las Aguas Subterraneas**. Barcelona: Omega, 1971.
- CELIGOI, A. **Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná**. São Paulo, 95 p. (Tese de Doutorado Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo). 2000.
- DA ROCHA, M. M.; YAMAMOTO, J. K.; DA NÓBREGA FONTELES, H. R. **Cokrigagem ordinária versus krigagem com deriva externa: aplicações para a avaliação do nível potenciométrico em um aquífero livre**. *Geologia USP. Série Científica*, v. 9, n. 1, p. 73-84, 2009.
- DE LUCENA, L. F.; DA ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, A. V. L. **A potenciometria do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi-RN e considerações sobre a relação com mananciais superficiais**. *Águas Subterrâneas*, v. 18, n. 1, 2004.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 6, Ribeirão Preto - SP, São Paulo**: Geopesisadora - Tahal, 2v., 1974.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Estudo de Águas Subterrâneas, Regiões Administrativas 7,8, 9 - Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba**. São Paulo: v. 1 e 2.1976.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília**. São Paulo: v.1 e v.2, 1979.
- DIAS GONÇALVES, R. **Modelagem Numérica e Avaliação Hidrogeológica do Aquífero**. Rio Claro. 2016.

DINIZ, J. A. de O.; et al. **Crise hídrica no Brasil: o uso das águas subterrâneas como reforço no abastecimento público.** CPRM. Rio de Janeiro, 2021.

EGER, G. Z. S. Formulação de Modelos Conceituais Hidrogeológicos em áreas contaminadas **contaminadas: estudo de caso do Centro Tecnológico de Resíduos (CENTRES), Queimados-RJ.** Dissertação de Mestrado; 91 p. UFRJ, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA/FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná, Tomo I.** SUDESUL – EMBRAPA – GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ/IAPAR, Londrina, 602 p. (1984).

FALLARA, F., LEGAULT, MI, & RABEAU, O. **Modelagem Geológica Integrada 3-Dna Subprovíncia de Abitibi (Québec, Canadá): Técnicas e Aplicações.** *Exploração e Geologia Mineira*, 15 , 27-43. 2006.

FERNANDES, L. A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os Grupos Bauru e Caiuá.** Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A., & COIMBRA, A. M. **O grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional.** *Revista Brasileira de Geociências*, 24(3), 164- 176. doi:10.25249/0375-7536.1994164176. 1994.

FITTS, C. R. **Águas Subterrâneas.** Tradução Daniel Vieira. Rio de Janeiro: Elsevier, 2ª edição, 2015

FORMAGIO, L. F., et al. **Estudo da variabilidade da potenciometria em aquíferos freáticos com auxílio de regressão múltipla espacial.** *Revista Brasileira de Geociências*, 2009.

FREEZE, RA; CHERRY, JA *Água subterrânea* . Prentice-Hall, 1979.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Using groundwater levels to estimate recharge.** *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 91–109, 2002.

HEATH, RC *Hidrologia Básica de Águas Subterrâneas* . Documento de Abastecimento de Água do Serviço Geológico dos EUA 2220, 1983.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ – AGUASPARANÁ. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos: Parte B – Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas.** Paraná, 2010.

IRITANI, M.A. **Modelação matemática tridimensional para proteção das captações de águas subterrâneas.** Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 198. 200 p. 1998.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Cidades.2010. Disponível em: < <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=> >. Acesso em: 20 maio. 2023.

- KRESIC, N.; MIKSZEWSKI, A. **Hydrogeological Conceptual Site Models: data analysis and visualization**. CRC press, Boca Raton, 584 f, 2013.
- LACEY, G.C. & GRAYSON, R.B. **Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia**. *Journal of Hydrology*. v. 204, p. 231-250, 1998.
- MAACK, R. **Breves notícias sobre a Geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina**. Arquivos de Biologia e Tecnologia. Curitiba, vol. II, p. 66-154. 1947.
- MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento **com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre. 225p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997.
- MILANI, E. J.; et al. **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro, In-Fólio Produção Editorial. p.389-449. 2000.
- MILANI, E. J.; et al. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências da PETROBRAS, vol.15, nº2, p.265-287, 2007.
- MORAES, J. M. **Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.8, n.1, p.61-70. 2003.
- NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. Atlas Climático do Estado do Paraná. Londrina, PR: IAPAR, 2019. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>. Acesso em: 6 jan. 2021.
- PAULA E SILVA, F. E CAVAGUTI, N. **Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP**. In: Simpósio sobre bacias cretácicas, Atas... p.141-144.1992.
- PAULA E SILVA, F. E CAVAGUTI, N. **Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP**. Geociências. UNESP. p.83-99, 1994.
- PAULA E SILVA, F. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo**. 2003. 166p. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2003.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANOCHANG, M.R. **Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 1, p. 77-88, 2005.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANOCHANG, M. R. E STRADIOTO, M. **R. Sucessão Sedimentar do Grupo Bauru na Região de Pirapozinho (SP)**. Geociências. Rio Claro. v.25 (n.1), p.17-26, 2006.
- PEREIRA, A. P.; SILVA, R. A. **Caracterização hidrogeológica do Aquífero Pirapozinho**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 3, p. 234-242, 2011.
- REBOUÇAS, C. A, 2002, “Águas Doces no Brasil”, São Paulo, Brasil, p.120

SCHNEIDER, R.L.; et al. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná.** In: Congresso Brasileiro de Geologia (SBG), v.1. p.41-65.1974.

SILVA, FLAVIO DE PAULA e. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do grupo Bauru no estado de São Paulo.** 2003. xiv, 167 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2003.

SILVA, L. P. E. **Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa.** Dissertação de mestrado. 2007.

SILVA, R. A.; FERREIRA, J. R. **Caracterização hidrogeológica do Aquífero Santo Anastácio.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 2, p. 120-130, 2010.

VIEIRA, A. Água é vida. Caderno de atividades, p. 2021. Brasília: WWF Brasil, 2006.

ZALÁN, P.V.; et al. **Análise da bacia do Paraná.** Relatório Interno Gt-Os-009/85, PETROBRÁS(Depex-Cenpes), Rio de Janeiro. 195p. 1987.

ZALÁN, P.V.; et al. Bacia do Paraná. In: Origem e evolução de Bacias Sedimentares.Petrobrás, Rio de Janeiro, p. 135-164. 1990.

9 CAPÍTULO XI - APÊNDICES

APÊNDICE I

Tabela 3 - Dados hidrogeológicos SIAGAS e identificação dos poços.

Município	ID Poço	Longitude (m)	Latitude (m)	N.a	Cota Topográfica	Carga Hidráulica
Paranacity	3500032688	383635	7483701	28,8	393	364
Paranacity	3500026835	381303	7462021	48,02	459	411
Paranacity	3500032486	380553	7464100	19,04	378	359
Paranacity	3500032487	381850	7468730	18	398	380
Paranacity	3500032833	380461	7473803	58,5	449	391
Paranacity	3500033150	379700	7464400	6,57	352	345
Paranacity	3500033155	381111	7463720	25,9	414	388
Mandaguaçu	3500032436	385554	7419452	50,6	594	543
Mandaguaçu	3500032721	385754	7419581	44	597	553
Nova Esperança	3500016138	368509	7432458	33	505	472
Nova Esperança	3500016203	375310	7431748	10,28	505	495
Nova Esperança	3500016204	362302	7427389	35	466	431
Nova Esperança	3500016209	361160	7430853	26,6	451	424
Nova Esperança	3500016210	369499	7432991	33	524	491
Nova Esperança	3500017389	375142	7441712	19,8	511	491
Nova Esperança	3500018023	384497	7438497	32,2	493	461
Presidente Castelo Branco	3500032744	377450	7423830	29,93	553	523
Presidente Castelo Branco	3500032773	381829	7430509	20	554	534
Presidente Castelo Branco	3500032788	382600	7427600	31,95	561	529
Alto Paraná	3500016178	369287	7437787	5,2	520	515
Alto Paraná	3500017393	371097	7438910	7,93	496	488
Alto Paraná	3500032042	363712	7441413	37,23	510	473
Alto Paraná	3500032043	365707	7441805	43,15	524	481
Alto Paraná	3500032044	365176	7442041	52	528	476
Alto Paraná	3500032047	364930	7441730	49,03	521	472
Alto Paraná	3500032310	365784	7458767	38,42	440	402
Alto Paraná	3500032675	365189	7441194	16,12	500	484
Alto Paraná	3500032680	364932	7441730	47,37	521	474
Alto Paraná	3500032695	360436	7437743	20	441	421
Inajá	3500017384	376701	7484108	11,38	383	372
Inajá	3500033126	376928	7484202	11,38	378	367
Inajá	3500033137	377082	7483196	33,56	413	379
São João do Caiuá	3500017360	363143	7472304	6	421	415
São João do Caiuá	3500032576	363128	7472377	12	420	408
São João do Caiuá	3500033145	362192	7472321	60,99	468	407
São João do Caiuá	3500032568	362087	7485329	11	374	363
Itauná do Sul	3500017367	306137	7484510	47,35	430	383
Itauná do Sul	3500017388	305046	7485112	44,62	425	380
Itauná do Sul	3500017404	305591	7489303	50	417	367
Itauná do Sul	3500019575	305156	7480929	19,49	424	405
Itauná do Sul	3500029441	305820	7484690	42,64	428	385
Itauná do Sul	3500032200	306245	7484875	49,65	445	395
Itauná do Sul	3500032201	306733	7485358	65,36	465	400
Itauná do Sul	3500033143	305150	7480936	19,49	423	404
Diamante do Norte	3500032138	380188	7459306	1,35	424	423
Cruzeiro do Sul	3500032844	380565	7460733	42,5	456	414
Cruzeiro do Sul	3500033119	380656	7460733	35,16	456	421
Uniflor	3500017375	380906	7446465	9	507	498
Uniflor	3500017981	381560	7446593	43,1	537	494
Uniflor	3500032384	387391	7446822	28,6	468	439
Uniflor	3500032385	381057	7445774	9,75	512	502
Porto Rico	3500026830	269784	7363221	14,56	387	372
Porto Rico	3500026831	213891	7361267	40,5	406	366
Porto Rico	3500026832	354552	7446856	22,75	481	458
Porto Rico	3500026833	267243	7478465	7,76	287	279
Porto Rico	3500026834	332644	7378762	14,04	537	523
Porto Rico	3500026835	381296	7462040	48,02	459	411
Tapira	3500027571	280711	7414322	15,35	378	363
Planaltina do Paraná	3500029441	305822	7484700	42,64	428	385
Planaltina do Paraná	3500029442	301764	7454650	31,99	409	377

