

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MODELAGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

DISSERTAÇÃO

DELIMITAÇÃO DAS ZONAS POTENCIAIS E ANÁLISES
HIDROQUÍMICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA IV- PIABANHA (RJ)

MARISTELA ALMADA GOMES DE OLIVEIRA

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MODELAGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

DELIMITAÇÃO DAS ZONAS POTENCIAIS E ANÁLISES
HIDROQUÍMICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA IV- PIABANHA (RJ).

MARISTELA ALMADA GOMES DE OLIVEIRA

Sob a Orientação da Professora
Olga Venimar de Oliveira Gomes

e Coorientação da Professora
Helena Saraiva Koenow Pinheiro

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geociências**, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, Área de Concentração em Geociências.

Seropédica,
Junho de 2021

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

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

O48d Oliveira, Maristela Almada Gomes de, 1993-
Delimitação das zonas potenciais a análises
hidroquímicas das águas subterrâneas na região
hidrográfica IV-Piabanha (RJ) / Maristela Almada
Gomes de Oliveira. - Seropédica, 2021.
96 f. : il.

Orientadora: Olga Venimar de Oliveira Gomes.
Coorientadora: Helena Saraiva Koenow Pinheiro.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Modelagem e Evolução Geológica, 2021.

1. Aquífero Fraturado. 2. Sistema de Informação
Geográfica. 3. Processo de Análise Hierárquica. 4.
Hidrogeoquímica. I. Venimar de Oliveira Gomes, Olga,
1977-, orient. II. Saraiva Koenow Pinheiro, Helena,
1985-, coorient. III Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Modelagem
e Evolução Geológica. IV. Título.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE PETROLOGIA E GEOTECTÔNICA**



ATA Nº 3571 / 2021 - DPETRO (11.39.40)

Nº do Protocolo: 23083.059720/2021-47

Seropédica-RJ, 20 de agosto de 2021.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO - UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA - IA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA - PPGMEG**

MESTRANDO(A): MARISTELA ALMADA GOMES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR(A): OLGA VENIMAR DE OLIVEIRA GOMES

CO-ORIENTADOR(A): HELENA SARAIVA KOENOW PINHEIRO

TÍTULO: DELIMITAÇÃO DAS ZONAS POTENCIAIS E ANÁLISES HIDROQUÍMICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA IV-PIABANHA (RJ)

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre(a) no Programa de Pós Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, Área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

MEMBROS DA BANCA:

Dra. Olga Venimar de Oliveira Gomes (presidenta; ITR-UFRRJ)

Dra. Erika Cortines (membro titular interno; ITR-UFRRJ)

Dr. Alan Wanderley Albuquerque Miranda (membro titular interno; DPG-UFRRJ)

Dra. Carla Semiramis Silveira (membro titular externo, Instituto de Geoquímica-UFF)

LOCAL (LINK), DATA E HORA:

<https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/sergio-castro-valente>

28 de junho de 2021

Horário de início: 09:00h

Horário do Término: 13:12h

Apresentação da candidata: 09:11h as 10:13h

DISSERTAÇÃO:

(X) APROVADA EM 28 de junho de 2021

() REPROVADA

ATA:

Os integrantes da banca reuniram-se, em sessão sigilosa, após a defesa pública e decidiram pela APROVAÇÃO da dissertação com base no seguinte:

O formato da dissertação está de acordo com as normas regimentais da UFRRJ. O conteúdo da dissertação tem qualidade superior à necessária à obtenção do grau de mestre. A qualidade da defesa pública foi boa e as respostas às arguições foram, de modo geral, boas. Alguma mudança de forma foi sugerida pelos integrantes da banca.

Assinaturas conforme (MEMORANDO CIRCULAR No 61/2020 - PROPLADI (12.28.01.43)):

Dra. Olga Venimar de Oliveira Gomes (presidenta; ITR-UFRRJ)

Mestranda Maristela Almada Gome de Oliveira

(Assinado digitalmente em 23/08/2021 08:41)
OLGA VENIMAR DE OLIVEIRA GOMES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

(Assinado digitalmente em 27/08/2021 13:55)
MARISTELA ALMADA GOMES DE OLIVEIRA
DISCENTE
Matrícula: 20191003523

Para verificar a autenticidade deste documento entre em
<https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **3571**, ano:
2021, tipo: **ATA**, data de emissão: **20/08/2021** e o código de verificação: **29e4c5e845**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE PETROLOGIA E GEOTECTÔNICA



ATA DE DEFESA DE TESE Nº 209 / 2021 - DPETRO (11.39.40)

Nº do Protocolo: 23083.058301/2021-98

Seropédica-RJ, 13 de agosto de 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA
NOME DO PÓS-GRADUANDO: **MARISTELA ALMADA GOMES DE OLIVEIRA**

Dissertação de mestrado submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geociências no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/06/2021

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Olga Venimar de Oliveira Gomes (orientadora e presidenta da banca; ITR-UFRRJ)

Dra. Erika Cortines (membro titular interno; ITR-UFRRJ)

Dr. Alan Wanderley Albuquerque Miranda (membro titular interno; DPG-UFRRJ)

Dra. Carla Semiramis Silveira (membro titular externo, Instituto de Geoquímica-UFF)

(Assinado digitalmente em 23/08/2021 09:07)
ALAN WANDERLEY ALBUQUERQUE MIRANDA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DPETRO (11.39.40)
Matrícula: 1560386

(Assinado digitalmente em 21/08/2021 10:43)
ERIKA CORTINES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCMA (12.28.01.00.00.18)
Matrícula: 1767097

(Assinado digitalmente em 23/08/2021 08:40)
OLGA VENIMAR DE OLIVEIRA GOMES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCMA (12.28.01.00.00.18)
Matrícula: 1767261

(Assinado digitalmente em 06/09/2021 12:50)
CARLA SEMIRAMIS SILVEIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 021.936.597-02

Para verificar a autenticidade deste documento entre em
<https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **209**, ano:
2021, tipo: **ATA DE DEFESA DE TESE**, data de emissão: **13/08/2021** e o código de
verificação: **f0f28ce24a**

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu infinito Amor. Por me guiar, proteger e abençoar de tantas formas.

Ao Programa de Pós-graduação em Modelagem e Evolução Geológica e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade de crescimento.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos e por atuar incentivando a Ciência e os estudantes que seguem a área acadêmica.

Às minhas orientadoras Olga Gomes e Helena Pinheiro, por me ensinarem tanto e de forma tão generosa. Sou grata por ter essas duas grandes cientistas e grandes mulheres, que tanto me inspiram, como parte da minha história profissional.

À coordenação do PPGMEG, aos professores e aos meus colegas da turma de 2019, pelo apoio e companheirismo. O ambiente de carinho, acolhimento e compreensão que encontrei nas aulas e na nossa salinha certamente facilitaram muito a minha jornada, e a tornaram mais divertida.

Aos meus pais, por serem meus maiores incentivadores. Por estarem sempre ao meu lado, acreditando em mim e me dando forças. Para mim, os verdadeiros mestres são eles: Raimundo e Lucimar.

A toda minha família e amigos, por compartilharem comigo as alegrias e os momentos difíceis.

Aos estudantes, pesquisadores e profissionais, como Yasmin Martins de Albuquerque, Caio Henrique Moreira Machado, Ana Carolina Cabral Miranda e Ingrid de Carvalho Lage, que trataram ou disponibilizaram dados de pesquisa e, desta forma, contribuíram para o avanço das minhas análises.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. This study was supported in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – finance Cod. 001.

RESUMO

OLIVEIRA, Maristela Almada Gomes de. **Delimitação das Zonas Potenciais e Análises Hidroquímicas das Águas Subterrâneas na Região Hidrográfica IV- Piabanha (RJ)**. 2021. 96p Dissertação (Mestrado em Modelagem e Evolução Geológica, Geociências). Instituto de Agronomia, Departamento de Petrologia e Geotectônica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

A complexidade do comportamento hídrico em meios fraturados, muito frequentes no Rio de Janeiro, representa um desafio para a gestão destes recursos. A Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV) é a quarta região hidrográfica do estado do Rio de Janeiro que mais explora água subterrânea, com problemas constantes de racionamento hídrico e pouco conhecimento das condições hidroquímicas e hidrodinâmicas de seus aquíferos, predominantemente fraturados. Os objetivos deste trabalho foram delimitar as zonas potenciais para a exploração das águas subterrâneas e discutir os comportamentos hidroquímicos na RH-IV, como um modelo de estudos para outras regiões. A delimitação de zonas potenciais, usando sensoriamento remoto, Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Processo de Hierarquia Analítica (AHP), constituiu um ferramental eficaz e pouco oneroso, se comparado com outros levantamentos (geofísico, geológico e hidrogeológico). Já a análise hidroquímica foi realizada a partir de dados secundários avaliados por diagramas, razões hidroquímicas e análise da salinização (RAS – Risco de Adsorção do Sódio), tendo em vista não só a influência natural, mas também antrópica nas águas subterrâneas da RH-IV. O mapa de potencialidade de águas subterrâneas foi elaborado considerando cinco classes sendo elas: muito altas (17,61%), altas (35,56%), moderadas (28,16%), baixas (11,05%) e muito baixas (7,61%). Os critérios mais relevantes para potencialidade de águas subterrâneas na RH-IV foram solos, densidade de lineamentos, geologia e precipitação. Para fornecer subsídios para análise dos dados hidroquímicos foi gerado um modelo preliminar de fluxo, que apontou o fluxo de água subterrânea no sentido SE para NW, em direção do Rio Paraíba do Sul. A recarga principal do sistema subterrâneo ocorre na região da Serra dos Órgãos, nos municípios de Petrópolis e Teresópolis, enquanto a descarga na região de Três Rios e Carmo. Foram classificados 6 tipos hidroquímicos de água subterrânea, sendo predominante as águas bicarbonatadas cálcicas (48%), seguida de bicarbonatadas sódicas (29%). As águas bicarbonatadas magnesianas (10%), cloretadas sódicas (10%), bicarbonatada mista (2%) e sulfatada magnesiana (2%) também foram identificadas. Foram identificados valores anômalos de NO_3^- , Fe, Cd, U e Mn em aquíferos da RH-IV. Quanto ao risco de salinização, 94% das amostras apresentaram risco nulo ou baixo. Os poços que apresentaram risco de salinização médio ou alto encontram-se sob influência antrópica da urbanização e/ou da irrigação. A evidência de salinização dos aquíferos da RH-IV deve ser considerada no modelo de gestão de recursos hídricos, tendo em vista os usos das águas subterrâneas, as dificuldades de remediação para sistemas aquíferos e a possível evolução desse quadro na RH-IV ao longo do tempo.

Palavras-chave: Aquífero Fraturado. Sistema de Informação Geográfica. Processo de Análise Hierárquica. Hidrogeoquímica.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Maristela Almada Gomes de. **Delineation of the Potential Zones and Hydrochemical Analysis of the Groundwater in the Piabanha Hydrographic Region (RJ)**. 2021. 96p. Dissertation (Master Science in Geological Modeling and Evolution, Geosciences) Instituto de Agronomia, Departamento de Petrologia e Geotectônica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

The complexity of the behavior of fractured aquifers, common in Rio de Janeiro, represents a challenge for groundwater management. The Piabanha Hydrographic Region (RH-IV) is the fourth hydrographic region of the state of Rio de Janeiro that most exploits groundwater, with constant problems of water rationing and little knowledge of its hydrochemical and hydrodynamic conditions. The objectives of this work were to delimit the potential zones for groundwater exploitation and to discuss the hydrochemical behaviors in RH-IV, as a model for studies in other regions. The delimitation of potential zones with remote sensing, Geographic Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) is an effective tool, if compared to other surveys (geophysical, geological and hydrogeological). The hydrochemical analysis was performed with pre-existing data through diagrams, hydrochemical ratios and salinization analysis (SAR - Sodium Adsorption Ratio), considering the natural and anthropic influence to the groundwater. The potential zone map was elaborated considering five classes being: very high (17.61%), high (35.56%), moderate (28.16%), low (11.05%) and very low (7.61%). The most relevant criteria for groundwater potentiality in RH-IV were soils, lineament density, geology and precipitation. A preliminary flow model was generated, which pointed the groundwater flow in the SE to NW direction, towards the *Paraíba do Sul* River. The main recharge of the groundwater system occurs in the region of *Serra dos Órgãos* (*Petrópolis* and *Teresópolis*), while the discharge in the region of *Três Rios* and *Carmo*. Six hydrochemical groundwater types were classified, with calcium bicarbonate waters (48%) predominating, followed by sodium bicarbonate waters (29%). Magnesian bicarbonate (10%), sodium chloride (10%), mixed bicarbonate (2%), and magnesian sulfate (2%) waters were also identified. Anomalous values of NO₃, Fe, Cd, U and Mn were identified in aquifers of RH-IV. Regarding salinization risk, 94% of the samples presented irrelevant risk. The wells that presented medium or high salinization risk are under anthropic influence from urbanization and/or irrigation. The evidence of salinization of the aquifers of the RH-IV should be considered in the water resource management model, given the uses of groundwater, the difficulties of remediation for aquifer systems and the possible evolution of this picture in the RH-IV over time.

Keywords: Fractured Aquifer. Geographic Information System. Analytic Hierarchy Process. Hydrogeochemistry.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação para Risco de Salinidade	11
Tabela 2. Análise das razões iônicas.....	12
Tabela 3. Matriz de comparação entre critérios para definição dos pesos de contribuição de cada critério utilizado.....	24
Tabela 4. Escala Fundamental de Saaty que define o grau de importância dos critérios utilizados.....	25
Tabela 5. Índice de Consistência Randômico (RCI) dado pela Escala de Saaty.	26
Tabela 6. Atribuição de pesos para critérios e subcritérios	28
Tabela 7. Matriz de comparação entre critérios.....	34
Tabela 8. Ranqueamento para as classes de cada critério	34
Tabela 9. Distribuição dos subcritérios que compõem cada mapa temático.....	36
Tabela 10. Zonas potenciais para água subterrânea na área de estudo.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição da água no subsolo. Fonte: MARQUES (2010).....	3
Figura 2. Tipologia de aquíferos. a) Poroso b) Cárstico c) Fraturado ou Fissural. Fonte: Adaptado de TODD (2005).....	4
Figura 3. Representação do diagrama de Piper, que permite a classificação das águas considerando os íons dominantes em sua composição.	9
Figura 4. Representação do Diagrama de Stiff.	10
Figura 5. Mapa de localização da Região Hidrográfica do Piabanha (RH IV), no estado do Rio de Janeiro.....	14
Figura 6. Pluviograma médio mensal (em mm), calculado a partir de dados da CPRM (2015), para os municípios de Petrópolis, Teresópolis, São José do Vale do Rio Preto e Areal, no estado do Rio de Janeiro.....	15
Figura 7. Mapa das unidades litoestratigráficas mapeadas na área de estudo. (Adaptado de HEILBRON et al., 2016 - CPRM)	18
Figura 8. Bloco diagrama representativo de fraturas de alívio sub-horizontais controladas pelo flexuramento de rochas cristalinas através de uma tectônica de falhas de gravidade. Fonte: VALENTE et al. (2001).	22
Figura 9. Estrutura do Processo Analítico Hierárquico. O objetivo ou problema é dividido em critérios hierarquizados. Os critérios são subdivididos e a sua importância para o problema também é analisada. A partir do julgamento de todos os elementos, a melhor alternativa é definida. Fonte: Adaptado de SAATY (1977).....	24
Figura 10. Fluxograma de metodologia para determinação de zonas potenciais de água subterrânea.	28
Figura 11. Modelo Preliminar de isolinhas de carga hidráulica, fluxo, áreas de recarga e descarga principais.	33
Figura 12. Mapa de Solos da área de estudos. Predominam Latossolos e Argissolos, ocorrendo também Cambissolos e Solos Hidromórficos (Fluvisolos e Gleissolos). Na região da Serra dos Órgãos há ocorrências importantes de Neossolos e afloramentos rochosos.....	38
Figura 13. Mapa Geomorfológico da área de estudos. Predominam feições escarpadas na região da Serra dos Órgãos. Na porção NE observam-se planícies fluviais, que constituem ambientes geomorfológicos mais favoráveis ao acúmulo de água subterrânea.....	39

Figura 14. Mapa de Densidade de Drenagens da área de estudos. Predominam densidades altas, entre 3,13 e 2,16 km/km ² . As menores densidades, mais favoráveis do ponto de vista hidrogeológico, encontram-se nas bordas da área.....	40
Figura 15. Mapa de Densidade de Lineamentos da área de estudos. Há importantes núcleos de maior densidade na porção S-SW, sendo essas regiões as mais favoráveis para a infiltração de água.....	41
Figura 16. Lineamentos morfoestruturais destacados, a partir de fotointerpretação em SIG, em quatro direções azimutais (0°, 45°, 90° e 135°). Os lineamentos de direção NE-SW refletem as zonas de cisalhamento dúcteis resultantes do Ciclo Brasileiro. As estruturas de direção NW-SE revelam a reativação dessas zonas de cisalhamento, iniciada a partir da atuação de um regime distensivo de direção NNW-SSE relacionado à quebra do supercontinente Gondwana.....	42
Figura 17. Mapa de Declividade da área de estudos. Predominam os terrenos escarpados, montanhosos e fortemente ondulados. As áreas planas restringem-se a menos de 2% do total.....	43
Figura 18. Mapa Litológico simplificado da área de estudos. Predominam rochas gnáissicas na porção norte e graníticas na porção sul. Minoritariamente, observa-se planícies aluvionares ao longo da área, sendo essas litologias as mais favoráveis à infiltração de água.....	44
Figura 19. Mapa de precipitação pluviométrica da área de estudos. Os maiores valores ocorrem na porção sul, que coincide com a Serra dos Órgãos; decrescendo em direção ao norte, onde as perspectivas hidrogeológicas são menores devido à baixa precipitação.....	45
Figura 20. Zonas potenciais para água subterrânea na Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV) e classes de valores de vazão específica para 135 poços de águas subterrâneas.....	46
Figura 21. Dispersão dos dados apresentando a correlação entre valores de capacidade específica de 135 poços tubulares e classes potenciais para ocorrência de água subterrânea na Região Hidrográfica do Piabanha.....	48
Figura 22. Profundidade dos Poços versus Condutividade Elétrica para a Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV), RJ.	52
Figura 23. Diagrama de Piper para Classificação Hidroquímica das Unidades Hidroestratigráficas mapeadas.....	54

Figura 24. Diagramas de Stiff e delimitação de zonas hidroquímicas (A1, A2, A3, A4).....	57
Figura 25. Gráfico rMg/Ca versus Condutividade Elétrica (CE) nas águas subterrâneas da Região Hidrográfica do Piabanha, RH-IV. Poços representantes do aquífero Rio Negro e Serra dos Órgãos (pontos 12, 15, 21, 27 e 57) possuem as menores rMg/Ca, o que indica a área urbana de Petrópolis como uma zona de recarga. Os poços do aquífero Conservatória (pontos 28 e 29), com altas rMg/Ca representam numa zona de descarga.....	59
Figura 26. Gráfico rSO ₄ /Cl versus CE nas águas subterrâneas da RH-IV. Observa-se que os poços com baixas rSO ₄ /Cl não coincidem com os poços com baixas rMg/Ca, o que torna improvável a relação daqueles com as áreas de recarga de água subterrânea.....	60
Figura 27. Classificação RAS/USSL para a RH-IV. Foram analisadas 102 amostras, dentre as quais todas apresentaram risco de sódio baixo. Quanto ao risco de salinização, 95 amostras apresentaram risco baixo, 6 tiveram risco médio e 1 amostra apresentou alto risco.....	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	2
2.	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Conceitos de Hidrogeologia.....	3
2.1.1	Especificidades dos Aquíferos Fraturados	4
2.1.2	Dinâmica das Águas Subterrâneas	5
2.2	Zoneamento das Águas Subterrâneas com Método de Análise Hierárquica (AHP)	6
2.3	Análises Hidroquímicas	6
2.3.1	Parâmetros Físico-Químicos	6
2.3.2	Constituintes Principais e Secundários	7
2.3.3	Classificação Hidroquímica das Águas Naturais	8
2.3.4	Normas e Padrões de Qualidade.....	10
3.	MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1	Área de Estudo.....	14
3.1.1	Contexto Geológico.....	16
3.1.2	Características de Uso do Solo e Demanda Hídrica na RH-IV.....	22
3.2	Delimitação de Zona Potenciais para Aproveitamento de Água Subterrânea	23
3.2.1	Mapas Temáticos para Análise Multicritério	26
3.2.2	Aplicação do Método AHP e Atribuição de Pesos	28
3.2.3	Produção do Mapa de Zonas Potenciais	30
3.3	Levantamento e Análise dos Dados de Captações de Águas Subterrâneas (poços).....	30
3.3.1	Caracterização da Carga Hidráulica e Fluxo de Água Subterrânea	31
3.2.2	Análise dos Dados Hidroquímicos.....	31
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1	Carga Hidráulica e Circulação da Água Subterrânea – Modelo Preliminar	32
4.2	Delineação de zonas potenciais para águas subterrâneas da Região Hidrográfica do Piabanha.....	33
a)	Solos.....	37
b)	Geomorfologia	38
c)	Densidade de Drenagens.....	39

d)	Densidade de Lineamentos	40
e)	Declividade	42
f)	Geologia simplificada	43
g)	Precipitação.....	44
4.1.1	Zonas Potenciais Para Aproveitamento de Água Subterrânea	45
4.1.2	Validação dos Resultados do Zoneamento.....	48
4.3	Unidades Hidroestratigráficas Exploradas.....	49
4.4	Análise e Evolução Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas	51
4.4.1	Parâmetros Físico-Químicos	51
4.4.2	Análise dos Constituintes	52
4.4.3	Classificação Hidroquímica	53
4.4.4	Razões Iônicas.....	58
4.4.5	Razão de Adsorção de Sódio.....	60
5.	CONCLUSÕES	62
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
7.	ANEXOS	77
	Anexo A - Estatística descritiva das unidades litoestratigráficas da RH-IV.	77
	Anexo B – Classificação RAS/USSL para 102 poços quanto ao risco de salinização RH-IV.	80

1. INTRODUÇÃO

A água doce é um bem inigualável para a sobrevivência humana. A humanidade depende desse recurso para atividades de subsistência e de progresso, tais como produção de alimentos, processos energéticos, industriais e de transporte, além das questões culturais (ASSADOURIAN et al., 2005).

Segundo a UNESCO (2018), muitos países já estão passando por situações de escassez hídrica, e provavelmente terão que lidar com uma menor disponibilidade, principalmente das águas superficiais, a partir de 2050. A escassez está diretamente relacionada às condições de precipitação, temperatura ambiente e indiretamente pode apresentar relações com as mudanças climáticas e conflitos hídricos (PETERSEN-PERLMAN et al., 2017).

Progressivamente, o estudo das águas subterrâneas assume uma importância estratégica para a humanidade, visto que é entendido como uma das soluções diretas para problemas de restrição hídrica, à medida que a sociedade reconhece que as águas superficiais não têm condições de atender à crescente demanda global, seja por escassez ou por degradação do referido recurso. Há de se considerar a questão contemporânea das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica. O Brasil é um país de grande potencial hídrico que está sendo intensamente influenciado pelas mudanças globais e ainda desconhece suas reservas hídricas subterrâneas. De acordo com Rebouças (2002) e Margat & Van der Gun (2013), o Brasil consiste na décima nação que mais extrai águas subterrâneas, sendo esse recurso utilizado principalmente para uso doméstico e urbano (66%), além da irrigação (24%) e uso industrial (10%).

Cerca de metade das rochas que cobrem a superfície terrestre são rochas cristalinas, sendo que no estado do Rio de Janeiro sua abrangência é de 80%. Essas rochas configuram reservatórios de águas subterrâneas caracterizadas como aquíferos fissurais ou fraturados. A complexidade do comportamento hídrico em meios fraturados constitui um desafio para a gestão de recursos subterrâneos, como é o caso do Estado do Rio de Janeiro (FERNANDES & RUDOLPH, 2001; NEVES & MORALES, 2007; JOTHIBASU & ANBAZHAGAN, 2018). A permeabilidade secundária compelida principalmente aos sistemas de fraturas das rochas cristalinas determina a competência hidráulica desse tipo de aquífero (SINGHAL & GUPTA, 1999; TERAMOTO et al., 2018; BRITO et al., 2019).

Para fins de gestão de recursos hídricos, o território do Estado do Rio de Janeiro está dividido em nove Regiões Hidrográficas (RIO DE JANEIRO, 2013). A Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV), área com intensos fraturamentos, é a quarta região hidrográfica que mais explora água subterrânea. Essa região hidrográfica abriga uma população total de mais de 500 mil habitantes (IBGE, 2010), sendo que apenas cerca de 26,5% dos seus municípios não reportaram problemas de racionamento de água. Quanto aos demais, aproximadamente 27% atribuíram a causa do racionamento a eventos de estiagem, 19,5% à infraestrutura precária e outros 27% dos municípios reportaram racionamento causado pela insuficiência de água no manancial (CEIVAP, 2015). Economicamente, além do setor industrial, a região também vivencia um franco desenvolvimento nos setores da agricultura, turismo e extração mineral. Apesar de abrigar cidades populosas e socioeconomicamente importantes, cada vez

mais dependentes dos recursos hídricos subterrâneos, a região ainda desconhece esse potencial hídrico, tornando-se crucial, portanto, a realização de estudos de qualidade e disponibilidade que ampliem os conhecimentos acerca da região.

Quanto ao entendimento da disponibilidade hídrica, é notória, dentro da realidade brasileira, a dificuldade de mapeamentos efetivos relacionados aos recursos hídricos, quanto mais às águas subterrâneas, em virtude principalmente da escassez, fragilidade e inconsistências em bancos de dados. Desta forma, a utilização de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Sensoriamento Remoto e Análise de Decisão Multicritérios, já utilizadas por muitos autores ao redor do mundo (MADRUCCI, & ARAÚJO, 2008; CHENINI et al., 2010; SHEKHAR & PANDEY, 2015; TEIXEIRA et al., 2015; SINGH et al., 2018) e apresentada nesta pesquisa, pode representar inclusive, uma boa opção para definição preliminar de zonas potenciais para águas subterrâneas em regiões hidrográficas.

Além do estudo quantitativo citado acima, essa pesquisa apresenta uma análise qualitativa para as águas subterrâneas da RH-IV, a partir de dados secundários. Análise relevante, considerando que Godoy (2019) observou concentrações elevadas de urânio, radônio e chumbo em águas captadas de poços artesianos em municípios da RH-IV como São José do Vale do Rio Preto, Petrópolis, Teresópolis e Sapucaia, enfatizando a necessidade de medidas que contribuam para a garantia da integridade daqueles que venham a consumir as águas subterrâneas na região. Outros pesquisadores (DIAS da CRUZ, 2016; MARTINS, 2018; GOMES 2019; LEMOS, 2019;) identificaram anomalias naturais de manganês, flúor, bário e estrôncio na região, levantando o questionamento acerca do material geológico e das atividades antrópicas que afetam as águas naturais.

A análise hidroquímica realizada para a RH-IV apresenta as características físico-químicas e relações iônicas dos principais aquíferos explorados, que podem apontar condições hidroquímicas de origem natural e sob influência antropogênica.

As análises quantitativas e qualitativas realizadas nesta pesquisa fornecem relevantes subsídios para a gestão dos recursos hídricos, já que caracterizam zonas potenciais, condições hidrodinâmicas e hidroquímicas para as águas subterrâneas exploradas na Região Hidrográfica do Piabanha.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram (a) delimitar as zonas potenciais para a exploração das águas subterrâneas e (b) analisar os comportamentos hidroquímicos na RH-IV, como um modelo de estudos para outras regiões, considerando dados secundários disponibilizados por órgãos ambientais. Os objetivos específicos foram:

- Delinear zonas potenciais para exploração das águas subterrâneas, a partir de análises multicritérios considerando o Processo de Hierarquia Analítica (AHP), bem como sensoriamento remoto e Sistema de Informações Geográficas (SIG);
- Apresentar um modelo preliminar de circulação das águas subterrâneas e principais características hidrodinâmicas dos aquíferos explorados;

- Realizar a caracterização hidroquímica e apontar aspectos de qualidade das águas subterrâneas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos de Hidrogeologia

Hidrogeologia é o ramo das Geociências que estuda o movimento, volume, distribuição e qualidade das águas subterrâneas, ou seja, das águas presentes sob a superfície da Terra em espaços vazios existentes entre as partículas ou grãos do material geológico (CUSTODIO & LLAMAS, 1983), seja solo, sedimento, rochas sedimentares ou rochas cristalinas.

As águas subterrâneas cumprem uma fase do ciclo hidrológico, uma vez que constituem uma parcela da água precipitada (TUCCI & BELTRAME, 2000). Após a precipitação, parte das águas que atinge o solo se infiltra e percola no interior do subsolo, podendo percolar; a depender de fatores como porosidade do meio, cobertura vegetal e volume de precipitação; pela zona saturada ou insaturada (Figura 1).

Zona não saturada, também chamada de zona de aeração ou vadosa, é a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona, pequenas quantidades de água distribuem-se uniformemente, sendo que as suas moléculas se aderem às superfícies dos grãos do solo. A zona saturada corresponde à região onde, por ação gravitacional, os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água. Esta região subsuperficial é considerada efetivamente como reservatório da água subterrânea (DREVER, 1982). Se esse reservatório (formação geológica) tem condições de armazenar e movimentar água suficiente para ser explorada é caracterizada como aquífero.

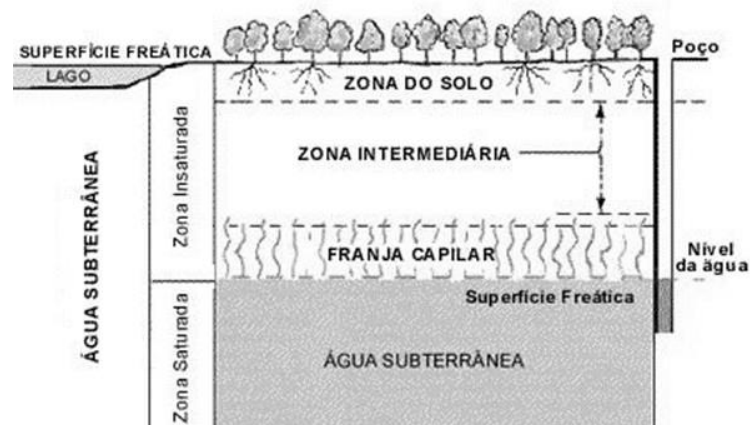


Figura 1. Distribuição da água no subsolo. Fonte: MARQUES (2010).

A constituição geológica determinará a velocidade que a água percola no meio, podendo condicionar inclusive a qualidade e a quantidade desse recurso no reservatório. Em sedimentos e rochas sedimentares, parâmetros como porosidade e permeabilidade são determinantes (CAPUTO, 1988), assim como a intensidade e conexão de fissuras, no caso

de rochas cristalinas (TODD, 2005). Quanto aos tipos de circulação, os aquíferos podem ser classificados como poroso (granular ou sedimentar), fraturado ou fissural e cárstico (Figura 2) (DRM, 2001).

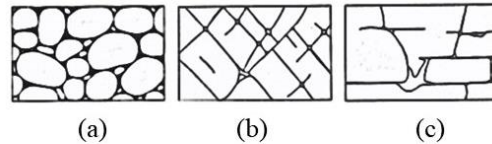


Figura 2. Tipologia de aquíferos. (a) Poroso (b) Cárstico (c) Fraturado ou Fissural. Fonte: Adaptado de TODD (2005).

O aquífero poroso é formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados a partir da deposição de grãos/partículas que compõem o material geológico. O tipo fraturado ou fissural é formado por rochas ígneas, metamórficas, ambas comumente chamadas de cristalinas, onde a circulação da água se faz por discontinuidades geológicas, tais como fissuras, falhas, juntas de alívio e zonas de contato entre litologias. O aquífero cárstico é formado em rochas calcárias e dolomíticas, onde a circulação da água se faz em discontinuidades resultantes da dissolução dos carbonatos pela água (CUSTODIO & LLAMAS, 1983).

2.1.1 Especificidades dos Aquíferos Fraturados

O principal desafio para a caracterização de um aquífero fraturado é a sua heterogeneidade. Nesse tipo de formação geológica, representada por rochas cuja porosidade primária é desprezível, a água flui por meio de discontinuidades estruturais planares, resultantes de processos rúpteis e intempéricos.

Apesar das limitações em termos de disponibilidade hídrica, devido à baixa permeabilidade e dificuldade de perfuração de poços, a necessidade crescente de água para abastecer centros urbanos e áreas rurais impulsionou, nas últimas décadas, maiores investigações acerca do potencial hídrico das rochas fraturadas (FEITOSA et al., 2008).

Segundo a ABAS (2021) os sistemas fraturados no Brasil ocupam uma área de cerca de 4,6 milhões de km², correspondente a 53,8% do território nacional. Pires (2020) justificou sua pesquisa a partir da importância de aquíferos fraturados em estados com forte potencial econômico no país, seja para uso doméstico, agropecuário ou industrial. Pesquisas anteriores (BARRETO et al., 2000; MARTINS et al., 2006; FERNANDES et al., 2005; BRASIL, 2015) contabilizaram que o Estado do Rio de Janeiro possui 80% dos seus aquíferos em terreno cristalino; no Estado de São Paulo os aquíferos fraturados somam 37%; e no Paraná, 10% dos aquíferos são fraturados.

A capacidade das rochas cristalinas acumularem água está relacionada à quantidade das fissuras/fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e circulação do fluxo da água. O regime tectônico atuante no local define os tipos de fraturas geradas. Fraturas com maior potencial de serem abertas, oriundas de processos extensionais e

transcorrentes, tendem a ser verticalizadas, enquanto que em regimes compressivos tendem a ser mais horizontalizadas (FOSSEN, 2016; PIRES, 2020).

Próximo à superfície, as rochas estão submetidas à ação meteórica, principalmente aquelas sob clima úmido. A rocha fissurada geralmente está sob o regolito, manto intemperizado que possui uma maior porosidade e que influi substancialmente nas condições de circulação, armazenamento e infiltração da água subterrânea antes de atingir a rocha (CUSTODIO & LLAMAS, 1983). A presença de regolito (manto de intemperismo) relativamente espesso em regiões úmidas é de grande importância em termos de armazenamento e filtragem do aquífero. Dentro desta camada, há o saprólito que é derivado da alteração e desagregação *in situ* da rocha mãe, e que se desenvolve a partir dos processos químicos, físicos e biológicos.

A composição química e a textura das rochas cristalinas influenciam suas propriedades mecânicas e as características do manto de intemperismo. As rochas cristalinas de granulação grossa e composição ácida, como granitos, gnaisses e pegmatitos, favorecem o desenvolvimento de extensos sistemas de fraturas abertas (JOHNSON, 1998) e a formação de horizontes arenosos no manto de intemperismo espesso, que facilitam os processos de recarga (CAVALCANTE, 1990). Por outro lado, Caine e Foster (1999) constataram que, em zonas de falhas alojadas em rochas granito-gnáissicas, a presença de feldspatos, associada à fragmentação mineral e à percolação de fluidos, promove a alteração desses minerais para argilominerais, que preenchem os poros e resultam em núcleos de falha argilosos, com baixa condutividade hidráulica.

As rochas cristalinas de granulação fina e composição micácea, como xistos, filitos, ardósias, tendem a desenvolver densa rede de fraturas, limitadas em comprimento e abertura, e manto de intemperismo argiloso raso, dificultando os processos de infiltração de água (NEVES, 2005). A produtividade nesses litotipos está associada, principalmente, à alta densidade e à conectividade das fraturas.

Os fatores climáticos estão intimamente relacionados aos processos de recarga e formação do manto de intemperismo. O regime de precipitação afeta a recarga do aquífero, nível d'água, quantidade e qualidade da água subterrânea (CUSTODIO & LLAMAS, 1996). Assim sendo, as mudanças climáticas visíveis em diversas partes do mundo, como ondas de calor e as secas prolongadas tendem a impactar negativamente a produção de aquíferos.

Engelbrecht (2017) apontou que aquíferos cristalinos alojados em áreas de clima árido e semiárido, como no Nordeste brasileiro, possuem geralmente manto de intemperismo pouco espesso ou ausente, baixas taxas de recarga e caráter depletivo. O déficit hídrico e as limitações dos processos de recarga nessas regiões resultam em nível d'água profundo, com alta concentração de sais, resultado do longo período da interação água/rocha. Em áreas de clima úmido, caso do Sudeste brasileiro, o manto intempérico é expressivo e controla os principais processos de recarga do aquífero (REBOUÇAS, 1988).

2.1.2 Dinâmica das Águas Subterrâneas

Além dos fatores citados anteriormente, a morfologia do terreno também exerce grande importância na dinâmica de fluxo das águas subterrâneas (CRUZ, 2016). De acordo

com Custodio e Llamas (1983), as zonas de recarga do aquífero estão associadas aos altos topográficos, e são influenciadas pela duração e intensidade da precipitação, pela espessura, extensão e tipo de material que compõe o manto de intemperismo. Já as zonas de descarga estão associadas aos vales topográficos, e concentram expressivos volumes de água. Nessas condições, o nível d'água é mais raso e as descontinuidades do maciço rochoso, principalmente aquelas próximas à superfície, encontram-se saturadas. Essas depressões proporcionam maior conectividade do aquífero com as águas superficiais e favorecem os processos de recarga por canais de drenagem superficial (WINTER et al., 1998).

A direção do fluxo subterrâneo pode ser reconhecida a partir da determinação da superfície potenciométrica, que corresponde à superfície delimitada pela altura dos níveis estáticos de um aquífero (HEATH, 1982). O conhecimento da profundidade do nível estático e da cota topográfica, num determinado ponto, por exemplo um poço tubular, possibilita a obtenção da cota do nível estático nesse ponto. A determinação do fluxo permite definir áreas de recarga e descarga, realizar estudos hidroquímicos, prever a dispersão de contaminantes, etc.

2.2 Zoneamento das Águas Subterrâneas com Método de Análise Hierárquica (AHP)

A disponibilidade da água subterrânea pode ser estimada através de análise multicritério considerando o diagnóstico físico da área de estudo. Essas informações, atreladas a um sistema de informação geográfica (SIG) possibilitam uma análise hierárquica (AHP) que resulta no zoneamento das potencialidades dos aquíferos.

A análise multicritério para tomada de decisões desenvolvida por Saaty (1987) consiste no Processo Hierárquico Analítico (AHP) que pode delimitar zonas com potenciais para armazenamento de águas subterrâneas (ARULBALAJI et al., 2019). Um levantamento bibliográfico virtual com abordagem exploratória sobre a aplicação do método AHP, em combinação com o ambiente SIG, para águas subterrâneas apontou milhares de publicações seguindo essa linha. Nessas publicações, foi consenso de muitos autores como Magesh et al. (2012); Das (2017); Shekhar e Pandey (2015) e Biswas (2012) utilizarem temáticas como geomorfologia, declividade, litologia e densidade de lineamentos em seus critérios para zoneamento da propensão a água subterrânea, que muitas vezes foram associadas a densidade de drenagem, solo, uso do solo e precipitação. Ainda nesse levantamento bibliográfico não foram identificadas pesquisas que englobassem o estado do Rio de Janeiro.

2.3 Análises Hidroquímicas

2.3.1 Parâmetros Físico-Químicos

Hidroquímica é o ramo da Hidrogeologia que trata da caracterização e migração das substâncias químicas presentes nas águas subterrâneas. O estudo hidroquímico tem por finalidade identificar e qualificar as principais propriedades e constituintes das águas

subterrâneas e superficiais, procurando estabelecer uma relação com o meio físico (SENA, 2011). A avaliação da qualidade da água subterrânea, bem como suas características hidrogeoquímicas, constitui uma importante ferramenta de gestão a análise para sua utilização em diversos fins (ALVES et al., 2010).

Sabe-se que as características geológicas do aquífero, o tempo de residência, as condições de circulação e armazenamento da água, além dos fatores externos como clima, poluição e recarga artificial podem influenciar as características físico-químicas das águas subterrâneas (MOURÃO et al., 2000).

Segundo Feitosa et al. (2008), as análises de água mais frequentemente realizadas em estudos hidroquímicos de água subterrânea são: físico-químicas, bacteriológicas, microbiológicas, radioativas e ambientais. Em geral, a rotina das análises de água inclui a determinação dos constituintes principais, secundários, tomadas das propriedades físicas, químicas, além de substâncias orgânicas.

Enquadram-se nas características de **propriedades físicas** os seguintes aspectos: temperatura, cor, odor, sabor, turbidez, sólidos em suspensão, condutividade elétrica e salinidade. Enquadram-se nas características de **propriedades químicas** os seguintes aspectos: pH, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade e dureza.

2.3.2 Constituintes Principais e Secundários

A maioria das substâncias naturais dissolvidas nas águas subterrâneas encontra-se no seu estado iônico e suas disponibilidades são resultantes de processos geoquímicos. Normalmente são 8 os **constituintes ou íons principais** dissolvidos nas águas naturais e sua soma representa a quase totalidade (90%) dos íons presentes. Esse grupo é formado pelos cátions sódio, potássio, cálcio e magnésio, além dos ânions bicarbonato, carbonato, cloreto e sulfato. A caracterização destes íons, apresentada a seguir, baseou-se em Feitosa et al. (2008):

O Sódio (Na^+) é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas, pois possui ampla distribuição nos minerais fontes; solubilidade elevada e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução. Nas águas subterrâneas o sódio ocorre, principalmente, sob a forma de cloretos, tendo como minerais fonte os feldspatos plagioclásios, feldspatóides (nefelina e sodalita), anfibólios e piroxênios. Há, em geral, um aumento gradativo dos teores de sódio nas águas subterrâneas, a partir da zona de recarga, em direção às suas porções mais confinadas ou dos seus exutórios. A concentração do sódio varia, em geral, entre 0,1 e 100 mg/L nas águas subterrâneas e entre 1 e 150 mg/L em águas naturais doces, atingindo, em média, 11.100 mg/L nas águas dos oceanos, e podendo chegar a 100.000 mg/L nas salmouras naturais.

O Potássio (K^+) é o sexto colocado na escala de abundância dos metais nas rochas ígneas. Entretanto, ocorre em menores quantidades nas águas subterrâneas, devido à sua participação intensa em processos de troca iônica, além da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e, ainda, de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais. Ocorre, principalmente, nos feldspatos potássicos, micas e leucitas, em rochas ígneas e

metamórficas. Os teores de potássio nas águas subterrâneas são inferiores a 10 mg/L, sendo mais frequentes valores entre 1 e 5 mg/L.

O Cálcio (Ca^{+2}) é o elemento mais abundante existente na maioria das águas naturais e rochas, ocorre principalmente nos minerais de calcita, aragonita e dolomita, em rochas calcárias, sendo o plagioclásio e a apatita as maiores fontes de cálcio nas rochas ígneas. Nas águas subterrâneas, os teores de cálcio variam, em geral, entre 10 e 100 mg/L.

O Magnésio (Mg^{+2}) ocorre, principalmente, em rochas carbonatadas e tem como minerais fontes mais frequentes a magnesita, a biotita, a granada, a hornblenda, a clorita, a alanita e a olivina. Juntamente com o cálcio, é o responsável pela dureza e produz gosto salobro às águas. As águas subterrâneas apresentam teores mais frequentes no intervalo de 1 a 40 mg/L.

Bicarbonato (HCO_3^-) não sofre oxidação nem redução em águas naturais, porém, pode precipitar com muita facilidade como bicarbonato de cálcio (CaCO_3). Varia entre 50 e 350 mg/L em águas doces, podendo chegar a 800 mg/L. A água do mar possui teores da ordem de 100 mg/L. Em águas naturais doces, a quantidade de bicarbonato será mais alta em comparação com a de carbonato.

Carbonato (CO_3^{-2}), a presença desse íon está relacionado ao pH e ao gás carbônico dissolvido. Normalmente, as águas naturais possuem pH entre 5,0 e 8,0 e nessas condições, o íon carbonato está ausente. Segundo Logan (1965), nas águas naturais o carbonato somente será superior às concentrações de bicarbonato quando o pH for igual ou superior a 10.

O Cloreto (Cl^-), em geral, é muito solúvel e muito estável em solução, logo, dificilmente precipita. Não oxida e nem se reduz em águas naturais. A alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo. As águas subterrâneas apresentam, geralmente, teores de cloretos inferiores a 100 mg/L. O cloreto também pode ser considerado um bom indicador de poluição para aterros sanitários e lixões.

Os Sulfatos (SO_4^{-2}) são sais moderadamente solúveis a muito solúveis. Originam-se da oxidação do enxofre presente nas rochas e da lixiviação de compostos sulfatados (gipsita e anidrita). As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de sulfatos inferiores a 100 mg/L, principalmente na forma de SO_4^{-2} e HSO_4^- .

Os **constituintes secundários** compõem cerca de 10% das substâncias dissolvidas nas águas naturais e normalmente se apresentam em concentrações inferiores a 1,0 mg/L (FETTER, 2001). São exemplos de relevantes constituintes secundários: Ferro, manganês, nitrato, boro, zinco, etc.

2.3.3 Classificação Hidroquímica das Águas Naturais

Os dados de análises de água podem ser interpretados com base em análises individuais ou a partir de um conjunto de dados referentes a uma área ou a um determinado aquífero. Para avaliar a variação de um conjunto de dados são utilizados métodos gráficos elaborados por *softwares* específicos. Tais representações podem ressaltar relações entre íons de uma mesma amostra e variações temporais e espaciais existentes. São úteis para

indicar a qualidade da água para um determinado uso, ilustrar variações na qualidade, enfatizar diferenças, similaridades e também para ajudar a detectar e identificar alguns dos processos de evolução hidroquímica. A seguir, são descritos os diagramas de Piper e de Stiff, utilizados nesta pesquisa .

O diagrama de Piper (1944) permite a classificação das águas considerando os íons dominantes em sua composição (Figura 3). Os constituintes catiônicos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) e aniônicos (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) são utilizados como variáveis, e apresentadas sob a forma de porcentagem em duas áreas de plotagem triangulares, onde os vértices dos triângulos representam 100% da concentração de determinado cátion ou ânion. Para plotar no diagrama, transforma-se separadamente o valor de cada íon expresso em meq/L em porcentagem dos totais de ânions e de cátions. A intersecção do prolongamento das retas paralelas às faces dos triângulos (Mg^{2+} e SO_4^{2-}) forma um losango superior, que fornece a classificação hidroquímica de determinada amostra (FETTER, 2001).

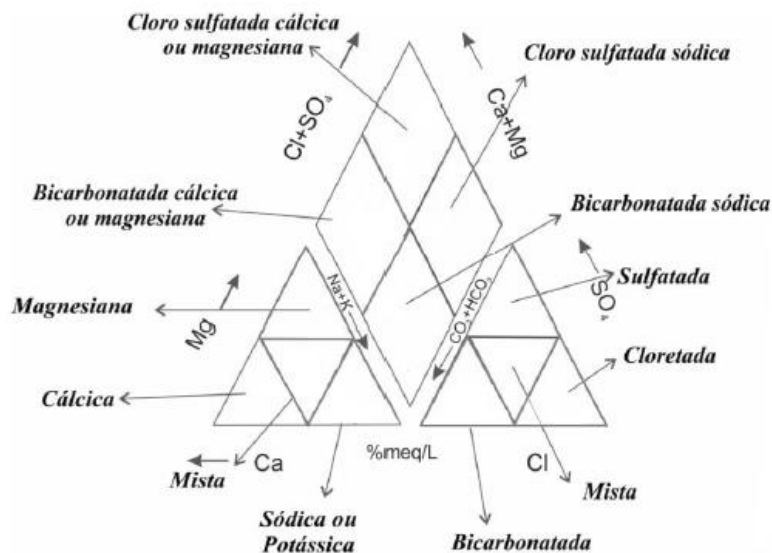


Figura 3. Representação do diagrama de Piper que permite a classificação das águas considerando os íons dominantes em sua composição.

O diagrama de Stiff utiliza, para a sua elaboração, quatro eixos horizontais paralelos, que se estendem nas duas direções a partir de um eixo central vertical (STIFF, 1951), permitindo visualizar, em função das formas geométricas formadas, a distribuição espacial das fácies hidroquímicas das águas subterrâneas. Além disso, é possível avaliar as diferenças de salinização das águas, uma vez que este diagrama representa as concentrações absolutas dos cátions e ânions principais.

As concentrações de cátions são plotadas, em meq/L ou % meq/L, à esquerda do eixo central vertical, e as concentrações de ânions à direita deste eixo (HEM, 1985; FETTER, 2001). Os pontos são então conectados, resultando em um polígono irregular cujo aspecto é apresentado na Figura 4.

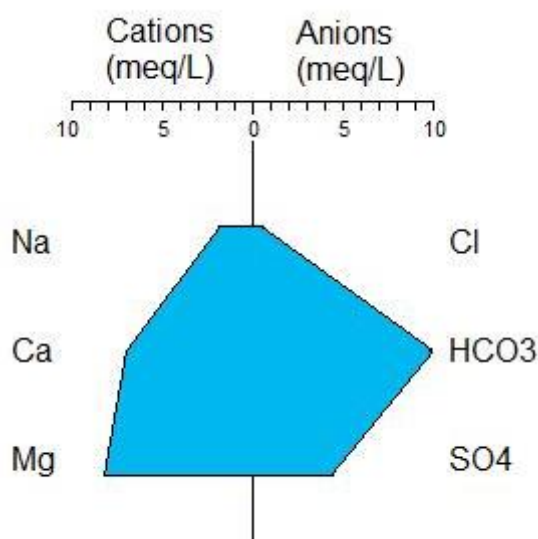


Figura 4. Representação do Diagrama de Stiff.

2.3.4 Normas e Padrões de Qualidade

No Brasil, alguns dispositivos legais versam sobre a qualidade das águas subterrâneas, definindo valores de referência norteadores para a gestão e uso desses recursos.

A Resolução nº 420 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 28 de dezembro de 2009 (BRASIL, 2009), dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo e da água subterrânea quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. O texto apresenta valores de investigação (VI) que consistem na concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Já a Resolução nº 888 do do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), trata sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, inclusive para substâncias químicas que representam risco à saúde.

Razão de Adsorção de Sódio – RAS

No tocante ao uso da água para agricultura, vale lembrar que os sais contidos na água usada para irrigação influenciam nas características físicas e químicas dos solos, inclusive na sua capacidade produtiva. A Razão de Adsorção de Sódio – RAS, é utilizada, juntamente com a condutividade elétrica, para a classificação da água para fins de irrigação, e quanto maior for o seu valor, menos apropriada a água será para irrigação, sendo atualmente o mais aceito e utilizado a classificação do *United States Salinity Laboratory – USSL*.

Esta classificação (Tabela 1) baseia-se na Razão de Adsorção de Sódio (RAS), como indicador do perigo de alcalinização ou sodificação do solo, e na condutividade elétrica da água (CE), como indicador do perigo de salinização do solo, para indicar o risco de

salinidade (C) – em uma escala crescente de 0 a 5 – e o risco de contaminação por sódio (S) – em uma escala crescente de 1 a 4. O RAS indica a percentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo e é calculado através da equação:

$$RAS = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{r(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} \quad (3)$$

onde r representa as concentrações de Na, Ca e Mg, em miliequivalente por litro (meq/L).

Tabela 1. Classificação para Risco de Salinidade

Risco de Salinidade	Características	Risco de Sódio	Características
C0	Águas de salinidade fraquíssima, que podem ser utilizadas sem restrições para irrigação.	S1	Águas fracamente sódicas. Podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de formação de teores nocivos de sódio susceptível de troca.
C1	Águas de salinidade fraca, CE compreendida entre 100 e 1000 μ mhos/cm a 25° C (sólidos dissolvidos: 64 a 160 mg/l). Podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas.	S2	Águas medianamente sódicas, apresentam perigo de sódio para solos de textura fina e forte capacidade de troca de cátions.
C2	Águas de salinidade média, CE entre 250 e 750 μ mhos/cm a 25°C (sólidos dissolvidos: 160 a 480 mg/l). Devem ser usadas com precaução.	S3	Águas altamente sódicas. Há perigo de formação de teores nocivos de sódio na maioria dos solos. Exigem tratamento especial do solo (boa drenagem, lixiviação e presença de matéria orgânica).

C3	Águas de alta salinidade, CE entre 750 e 2250 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25° C (sólidos dissolvidos: 480 a 1440 mg/l). Só Podem ser utilizadas em solos bem drenados.	S4	Águas extremamente sódicas, geralmente imprestáveis para a irrigação, salvo se a salinidade global for fraca, ou pelo menos média. Podem ser aplicadas em solos altamente drenáveis ricos em carbonatos.
C4	Águas de salinidade muito alta, com CE entre 2250 e 5000 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C (sólidos dissolvidos: 1440 a 3200 mg/l). Geralmente não servem para irrigação.		
C5	Águas de salinidade extremamente alta, CE entre 5000 e 20000 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25° C (sólidos dissolvidos: 3200 a 12800 mg/l). São águas utilizáveis apenas em solos excessivamente permeáveis e muito bem cuidados.		

Razões Iônicas

O cálculo das razões iônicas consiste em outra ferramenta de interpretação hidrogeoquímica para as águas subterrâneas, relacionado a atividades antropogênicas e processos naturais que podem ocorrer nos aquíferos. A Tabela 2 apresenta valores de razões iônicas, em meq/L, e interpretações dos resultados analíticos em diversas regiões do mundo (CRUZ, 2016).

Tabela 2. Análise das razões iônicas.

Razões iônicas	Variações teóricas	Significado
rMg/rCa	$>5^c$	Intrusão Marinha
	$>1^a$	Salmouras
	0,25 – 0,33 ^g 0,33 - 1,5 ^g	Circulação em rochas cristalinas Águas continentais
rK/rNa	0,02 – 0,025 ^g	Intrusão Marinha
	0,09 – 0,6 ^g	Circulação em rochas cristalinas

rSO4/rCl	0,05 ^{a,d}	Intrusão Marinha
	~0,05 ^{c,d}	Salmouras
	0,09 ^d	Águas residuais
	>0,05 ^f	Águas de irrigação
rNa/rCl	< 0,7 ^g	Precipitação de sais de Na+
	0,86 – 1 ^a	Intrusão Marinha
	~0,8 ^c / <0,86 ^{a,e} / 0,5 – 0,8 ^d	Salmouras
	1,1 ^d	Águas residuais
	>0,7 ^g	Circulação em rochas cristalinas
a – Vengosh and Rosenthal, 1994. b – Metcalf & Eddy Inc., 1991. c – Vengosh and Ben-Zvi, 1994. d – Vengosh et al., 1999. f – Vengosh et al., 2002. g – Hem, 1985.		

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV) que engloba os municípios da região serrana de Petrópolis, Teresópolis, Carmo, São José do Vale do Rio Preto, além de outros municípios como Sapucaia, Sumidouro, Areal, Três Rios, Paraíba do Sul, Paty dos Alferes. Essa região localiza-se entre a latitude $21^{\circ}47'21,717''\text{S}$ e $22^{\circ}33'5,428''\text{S}$ e longitudes $42^{\circ}27'27,047''\text{W}$ e $43^{\circ}22'48,537''\text{W}$ (Figura 5). A área estudada abrange cerca de 3.460 km^2 tendo as principais bacias hidrográficas da margem direita do Médio Inferior do Paraíba do Sul: bacia do rio Piabanha, sub-bacias dos rios Paquequer e Preto. (RIO DE JANEIRO, 2013).

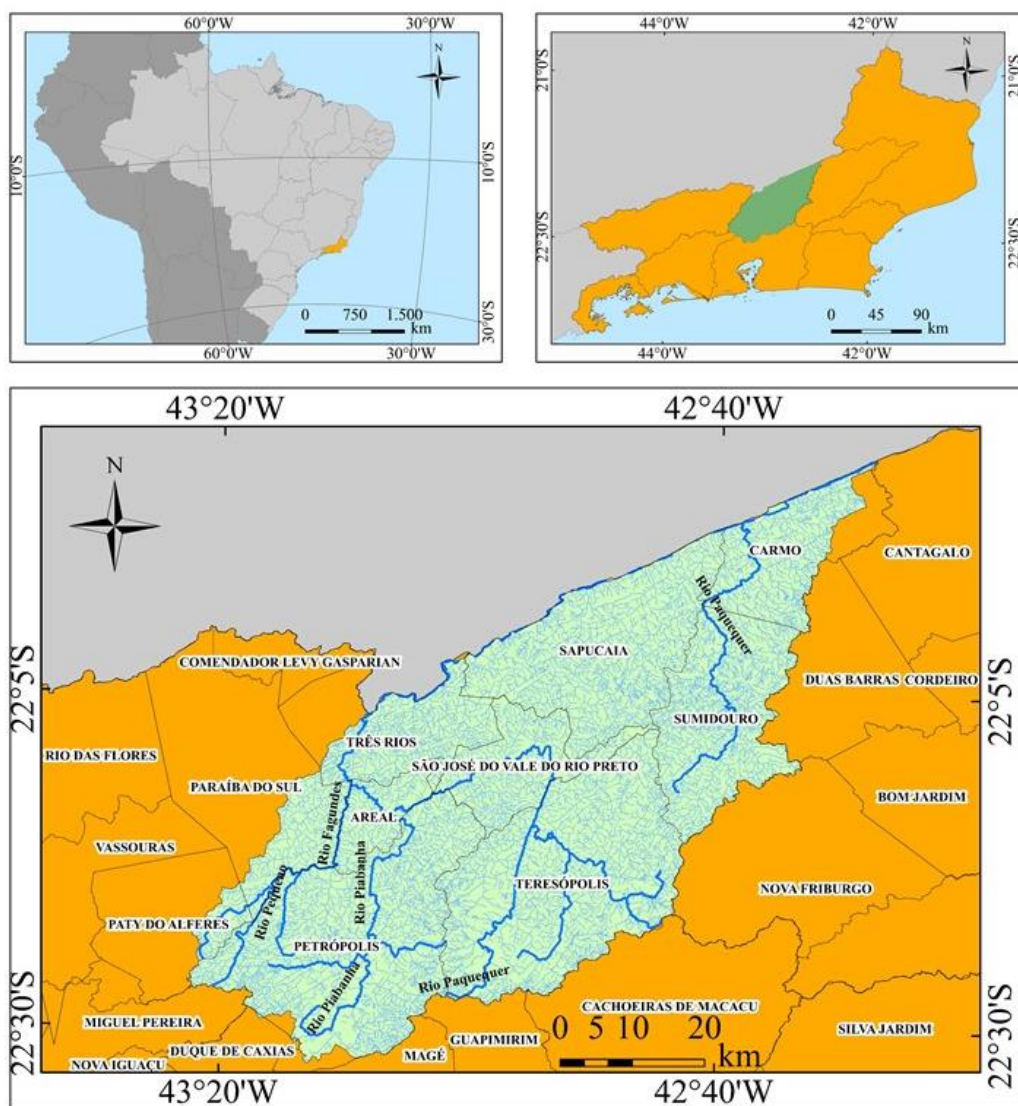


Figura 5. Mapa de localização da Região Hidrográfica do Piabanha (RH IV), no estado do Rio de Janeiro.

Em relação ao relevo, na região predominam terrenos escarpados. Na sequência, ressaltam-se a grande quantidade de terrenos colinosos. O relevo de planície fluvial, evidente principalmente na porção nordeste, possui característica mais plana e compreende cerca de 7% do território da RH-IV.

Com relevo heterogêneo e diversidade de uso do solo, a RH-IV também possui variáveis climáticas relevantes. O clima na RH-IV perpassa desde mesotérmico mediano, com temperaturas médias menores que 10°C a mesotérmico brando (temperaturas médias entre 10°C e 15°C), subquente (temperaturas médias entre 15°C e 18°C), e quente onde as maiores temperaturas médias são maiores que 18°C. De acordo com a série histórica de 1977 a 2006 (PINTO et al., 2011) a pluviometria varia entre 1.100 mm/ano a 3.000 mm/ano. As áreas com maior aporte pluviométrico (acima de 2.000mm) corresponderam às regiões da Serra dos Órgãos, nos municípios de Petrópolis e Teresópolis, com altitudes que podem alcançar 2.300 metros. Já para a porção central e noroeste, em que predominam menores altitudes e relevos menos acidentados, a média pluviométrica é reduzida, a exemplo do município de São José do Vale do Rio Preto, que possui relevantes eventos escassez hídrica e Areal, onde o aporte pluviométrico é de aproximadamente 1.160 mm/ano (Figura 6). Os meses de junho, julho e agosto mostram-se mais secos em toda a região, enquanto que o período entre dezembro e março concentram os maiores valores de precipitação (CBH-Piabanha, 2019).

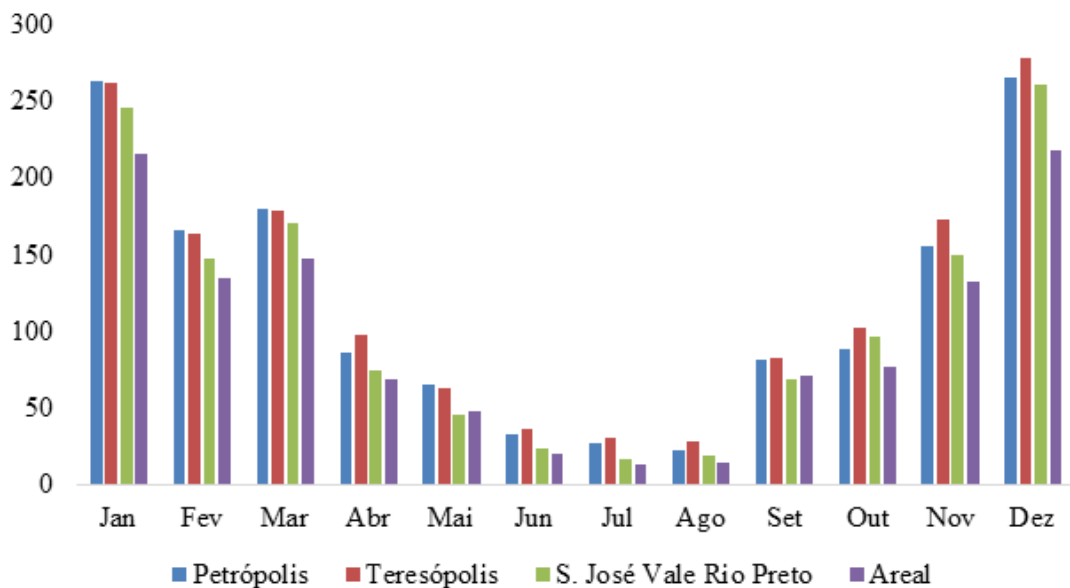


Figura 6. Pluviograma médio mensal (em mm), calculado a partir de dados da CPRM (2015), para os municípios de Petrópolis, Teresópolis, São José do Vale do Rio Preto e Areal, no estado do Rio de Janeiro.

3.1.1 Contexto Geológico

Compartimentação Tectônica Regional e Unidades Litoestratigráficas

No Rio de Janeiro, os aquíferos fraturados normalmente estão subordinados a eventos geotectônicos relacionados à Orogênese Brasileira, abordados em trabalhos como ALMEIDA (1967), ALMEIDA et al. (1977), DELGADO et al. (2003) e HEILBRON et al. (2004); e da Reativação Tectônica Jurássica que resultou na abertura do oceano Atlântico (ALMEIDA, 1976; RICCOMINI, 1989; ZALÁN & OLIVEIRA, 2005). Desta forma, uma breve revisão da compartimentação tectônica torna-se necessário.

A área de estudo encontra-se inserida na Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1977). Esta entidade geotectônica foi instalada a leste dos crátons São Francisco e Rio de La Plata/Paraná, ao final do Neoproterozóico e início do Paleozóico, representando, de acordo com ALMEIDA (1967) “o arcabouço pré-cambriano do sudeste brasileiro desenvolvido em resposta ao Ciclo Brasileiro”.

A província Mantiqueira é integrada por uma sucessão de cinturões de “empurrão e dobramento” controlados por distintos sistemas transpressivos de cavalgamento em direção às margens cratônicas (DELGADO et al., 2003). A amalgamação destes terrenos neoproterozóicos deformados durante a Colagem Orogênica Brasileira resultou na formação dos chamados orógenos colisionais (SENGÖR, 1990) associados à gênese do Supercontinente *Gondwana* Ocidental (DELGADO et al., 2003; HEILBRON et al., 2004).

Representando o segmento central da Província Mantiqueira, a Faixa Ribeira – terreno alongado de dobramentos com granitogênese e metamorfismo, que representa um desses orógenos colisionais compreende as rochas geradas no Ciclo Brasileiro, expostas na região entre São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (HASUY et al, 2012), o que inclui a área estudada nesta pesquisa.

De acordo com ALMEIDA et al. (2013), quatro terrenos tectonoestratigráficos compõem o segmento central da Faixa Ribeira: Terreno Ocidental, margem retrabalhada do Cráton do São Francisco, Klippe Paraíba do Sul, Terreno Oriental (Costeiro ou Serra do Mar) e Terreno Cabo Frio.

O Terreno Ocidental (TOC) é compartimentado em duas escamas de empurrão de escala crustal (domínios Andrelândia e Juiz de Fora), os quais se sobrepõem ao antepaís do Cráton do São Francisco (HEILBRON et al., 2000).

A Klippe Paraíba do Sul é a escama superior da pilha tectônica do segmento central da faixa Ribeira. Constituído por duas unidades - um embasamento ortognáissico (Complexo Quirino) e cobertura metassedimentar com intercalações de mármore e margas (Grupos Paraíba do Sul/Embú) (HEILBRON et al., 2013) - este terreno alongado está associada à Zona de Cisalhamento do Paraíba do Sul (HASUI & OLIVEIRA, 1984; EBERT & HASUI, 1998; HEILBRON et al., 2004).

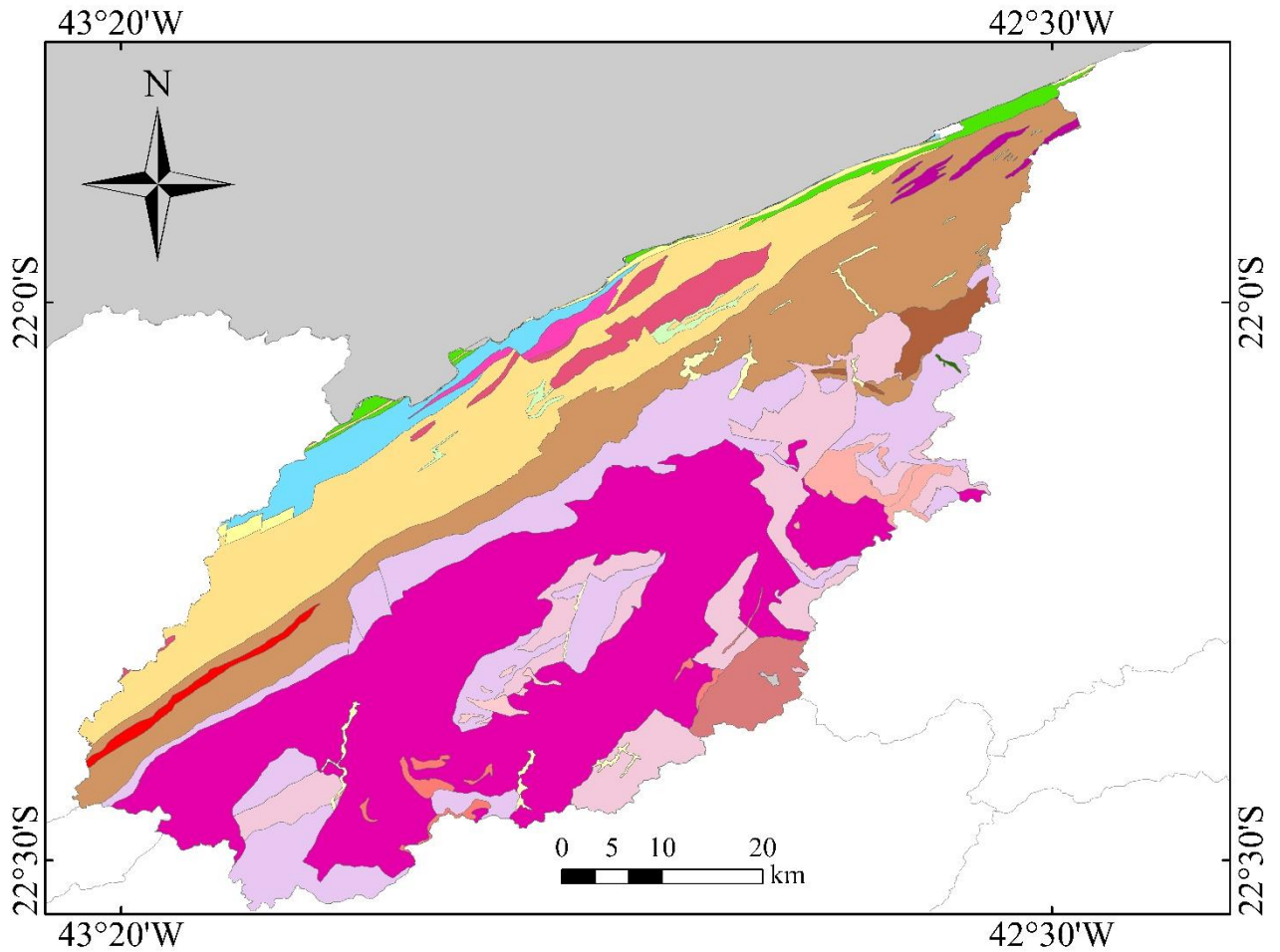
O Terreno Oriental é o local do Arco Magmático Rio Negro (TUPINAMBÁ et al., 1998), que compreende uma faixa de rochas ortoderivadas chamada Complexo Rio Negro/Batólito Serra dos Órgãos. Este terreno está associado a rochas metassedimentares (paragnaisses, quartzitos e rochas calcissilicáticas das Unidades São Fidélis, Santo Eduardo,

Catalunha e Grupo Italva) representando, segundo TUPINAMBÁ & HEILBRON (2002), “(...) um arco magmático maduro alojado em uma cobertura sedimentar de margem passiva.”

O Terreno Cabo Frio ocupa uma pequena área no litoral do estado do Rio de Janeiro. Difere dos outros terrenos do Setor Central da Faixa Ribeira por seu *trend* estrutural NW-SE, resultado da amalgamação tardia ao orógeno em cerca de 520 Ma. (SCHMITT et al., 2004; ALMEIDA et al., 2013).

A RH-IV perpassa pelo Domínio Juiz de Fora no Terreno Ocidental, pela Klippe Paraíba do Sul e pelo Complexo Rio Negro, no Terreno Oriental. A seguir será apresentada uma descrição das unidades litoestratigráficas que segundo HEILBRON et al. (2016) são representantes da área de estudos, bem como sua correlação com a compartimentação tectônica regional (Figura 7).

O Domínio Juiz de Fora, pertencente ao Terreno Ocidental, apresenta uma intercalação tectônica entre as rochas do embasamento pré-1,7 Ga, ortognaisses e metabasitos do Complexo Juiz de Fora, e os metassedimentos neoproterozóicos do Grupo Andrelândia, ambas em fácies granulito (DUARTE, 1998). A Suíte Rio Turvo tem sua origem a partir de leucogranitos sin-tectônicos encaixados em metassedimentos do grupo Andrelândia. Tratam-se de ortognaisses de granulação grossa e foliação descontínua marcada por agregados de biotita envolvendo megacristais arredondados de feldspato potássico. O Grupo Raposo caracteriza-se por uma associação de paragnaisses e intercalação de diversos litotipos supracrustais (quartzitos, calcissilicáticas, anfibolitos e gonditos) e a Unidade Conservatória corresponde a biotita gnaisses bandados e gnaisses pelíticos milonitizados, normalmente intercalados tectonicamente com os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora.



Unidades Litoestratigráficas

Andorinha	Depósitos gravitacionais (talús)	Quirino
Anta	Graminha	Raposos, quartzito
Arcádia Areal	Granito Frades	Rio Negro
Arcádia Areal, calcissilicáticas	Granito Nova Friburgo	Rio Negro, gabro
Conselheiro Paulino	Granito Teresópolis	Rio Turvo
Conservatória	Juiz de Fora, ortogranulitos	Serra da Bolívia
Cordeiro	Leucognaisses Domínio Costeiro	Serra dos Órgãos
Depósitos aluvionares	Paraíba do Sul	

Figura 7. Unidades litoestratigráficas mapeadas na Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV), RJ. Fonte: Adaptado de HEILBRON et al. (2016)(CPRM).

De acordo com HEILBRON et al. (2013), o embasamento pré-1,7 Ga no compartimento geotectônico denominado Terreno Paraíba do Sul é representado por biotita-hornblenda gnaisses de composição tonalítica a granítica e enclaves de rochas máficas e ultramáficas do Complexo Quirino que intercalam-se, para o topo da estrutura, com metassedimentos do Grupo Paraíba do Sul, sendo estes, principalmente, biotita gnaisses bandados, por vezes contendo sillimanita, com intercalações de mármore, quartzitos e

anfíbolitos. O Complexo Anta está encaixado em paragneisses no limite entre os Terrenos Ocidental e Paraíba Sul. Predominam granitos megaporfíricos, ocorrendo também sienogranitos e granodioritos.

As rochas migmatíticas do Complexo Rio Negro, pertencente ao Terreno Oriental, têm origem, segundo TUPINAMBÁ et al. (1996), em um conjunto de quatro rochas ortoderivadas, sendo elas: diorito, tonalito, leucogranito e gnaiss porfiróide; apresentando também numerosos corpos metabásicos, de composição gabroica e diorítica. A Suíte Serra dos Órgãos é intrusiva nas rochas do Complexo Rio Negro e nos gnaisses granitoides da Suíte Cordeiro. Corresponde a granodioritos e granitos grossos equigranulares (levemente porfíricos) com biotita e hornblenda. As rochas mostram foliação fraca concordante com a foliação principal regional das encaixantes. Na Suíte Cordeiro predomina o gnaiss granitoide leucocrático, de granulometria média a grossa, com foliação marcada pela orientação de biotita. A Suíte Serra da Bolívia ocorre como corpos plutônicos gnaissificados estirados entre as zonas de cisalhamento presentes na região. A Unidade Arcádia-Areal trata-se de uma sucessão de gnaisses bandados frequentemente milonitizados, com intercalações de quartzitos e rochas calcissilicáticas, sobrepostos às rochas do Complexo Rio Negro.

Os granitoides pós-tectônicos correspondem a um conjunto de rochas plutônicas ácidas geradas entre 535 e 490 M.a. (HEILBRON et al., 1995; TROUW et al., 2000; TEIXEIRA, 2010), fases D3 e D4 da Orogênese Brasileira onde, a partir de eventos magmáticos cambrianos a ordovicianos, obteve-se as rochas mais jovens da Faixa Ribeira. Fazem parte deste conjunto o Granito Andorinha, Granito Frade, Granito Nova Friburgo, Granito Teresópolis e Granito Conselheiro Paulino.

Eventualmente sobrepondo as unidades citadas estão os Depósitos Aluvionares de antigos terraços observados ao longo do Rio Paraíba do Sul, preenchidos quando da evolução do Rifte Continental do Sudeste do Brasil. Alguns outros, mais recentes, constituem depósitos de margens, fundos de canal, barras arenosas e planícies de inundação de rios e cascalheiras, constituindo importantes jazidas de argila e areia. Já os Depósitos de Tálus são depósitos gravitacionais, constituídos por blocos e matacões, de litotipos variados e com matrizes imaturas, geralmente associadas a encostas com elevado gradiente.

Aspectos Estruturais

A estruturação do Cinturão Ribeira apresenta deformações tangenciais e transcorrentes, resultantes de processos orogênicos brasileiros (DELGADO et al., 2003). Tais deformações marcaram fortemente o Cinturão Ribeira, com numerosos feixes de falhas predominantemente dextrais, que configuram um sistema de zonas de cisalhamentos com deslocamentos quilométricos (CAMPANHA, 2002). De acordo com HEILBRON et al. (2016), “o sistema de Zonas de Cisalhamento pode ser dividido em três setores no estado do Rio de Janeiro: sul, central e norte. De NW para SE, as principais Zonas de Cisalhamento são: Fumaça-Rio Preto, Quatis-Serra das Coroas, Valença, Arrozal-Vassouras (Paraíba do Sul) e Mambucaba-Arcádia (Arcádia-Areal)”. Além destas, atuam na porção sudeste do estado, as Zonas de Cisalhamento Santo Aleixo, Arpoador-Niterói e Serra do Segredo.

Estes sistemas transcorrentes tem direção NNE-SSW e infletem para NE-SW na porção noroeste do Estado, junto à fronteira com São Paulo e Minas Gerais (HEILBRON et al., 1982). A inflexão está relacionada aos deslocamentos dextrais dos Sistemas Transcorrentes / Zonas de Cisalhamento Paraíba do Sul e Arcádia-Real que formam, no Terreno Ocidental, um corredor de cisalhamento de direção ENE, atravessando o Estado de SW ao extremo norte (ALMEIDA & HEILBRON, 2016). Estas duas estruturas exercem influência direta sobre a área estudada.

A Zona de Cisalhamento Paraíba do Sul (ZCPS) foi descrita primeiramente por ALMEIDA et al. (1975), que a denominou como Lineamento de Além Paraíba, constituindo o trecho de cerca de 260 km de extensão e até 10 km de largura em que o rio Paraíba do Sul apresenta um traçado retilíneo ENE, mostrando-se adaptado a um expressivo lineamento estrutural que se destaca na paisagem da depressão topográfica do rio Paraíba do Sul.

Nesta zona de cisalhamento afloram ortognaisses migmatíticos, granitoides e metabasitos arqueanos a paleoproterozoicas (Complexo Mantiqueira), ortogranulitos arqueanos e paleoproterozoicos, granitos/granitoides e metabasitos (Complexo Juiz de Fora), granitoides tonalítico-granodioríticos, com enclaves de rochas metaultramáficas, metamáficas e cálcio-silicáticas (Complexo Quirino) (SILVA & MELLO, 2011).

Sobre as rochas do embasamento, encontram-se sucessões metassedimentares neoproterozoicas relacionadas à Megassequência Andrelândia (granada-biotita gnaisse com intercalações de anfibolitos, quartzitos, filitos, xistos e rochas cálcio-silicáticas) e ao Grupo Paraíba do Sul (granada-biotita gnaisse com intercalações carbonáticas e cálcio-silicáticas).

A intensa deformação, às quais essas rochas foram submetidas durante a Orogenia Brasileira, gerou foliações miloníticas com mergulho subvertical e tornou seus contatos paralelos (FERNANDES, 2009), formando claro bandamento tectônico. Sedimentos argilo-arenosos e areno-argilosos, de natureza coluvial e aluvial, de idade quaternária, ocorrem em toda a área de estudo, preenchendo fundo de vales e ocupando áreas ao sopé de encostas.

A zona de cisalhamento Arcádia-Areal (ZCAA) é considerada como a sutura principal da Faixa Ribeira (ALMEIDA, 2000; HEILBRON et al. 2000), denominada de Limite Tectônico Central (LTC). Essa zona justapõe os terrenos Ocidental e Oriental de HEILBRON et al. (2000). Os milonitos da ZCAA são posicionados preferencialmente na capa, ou Unidade Arcádia-Areal (Grupo Andrelândia), sobrepostos às rochas ortoderivadas do Complexo Rio Negro (VALLADARES et al., 2012).

No mapeamento da Folha Três Rios (VALLADARES et al., 2012), a constituição litológica da ZCAA é representada por “gnaisses porfiroblásticos com intercalações decimétricas a métricas de quartzitos e de rochas calcissilicáticas, geralmente apresentando feições miloníticas como foliação planar e lineação de estiramento bem marcada, além de porfiroclastos milimétricos a centimétricos de feldspatos. Intercaladas aos metassedimentos miloníticos ocorrem lentes alongadas de granitoides com biotita e hornblenda”.

A reativação tectônica manifestada a partir do Jurássico (ALMEIDA, 1976) resultou na abertura do oceano Atlântico e provocou o desenvolvimento de um conjunto bacias costeiras e continentais e de porções soerguidas adjacentes, que caracterizam as Serras do Mar e Mantiqueira. Esse conjunto de bacias continentais do sudeste brasileiro é chamado Rift Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI 1989).

Essa estrutura tectônica, originada pela atuação de um regime distensivo de direção NNW-SSE (relacionado à quebra do supercontinente Gondwana), se prolonga por cerca de 1.000km como uma depressão contínua, sendo responsável pela reativação zonas de cisalhamento brasileiro, e também associado a um abundante magmatismo de caráter básico a alcalino (ALMEIDA, 1976).

De acordo com ZALÁN & OLIVEIRA (2005), durante o período de reativação tectônica foi formado um megaplano de cerca de 300.000 km² (Serra do Mar Cretácea). Ao final de seu soerguimento, exatamente no limite Cretáceo/Terciário, uma superfície de aplainamento (Superfície Japi) nivelou-o em torno de 2.000 metros em relação ao nível do mar atual.

O colapso gravitacional do megaplano em direção às bacias de Santos e Campos iniciou-se devido à instabilidade isostática gerada na região. Durante esse processo, a crosta continental fendeu-se e afundou-se em diversas áreas lineares formando riftes paralelos à costa (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998; NASCIMENTO, 2012).

Os remanescentes topográficos deste megaplano atualmente constituem as partes altas das Serras do Mar e da Mantiqueira, com direção principal WSW-ENE, modificadas por soerguimento e basculamento de blocos escalonados.

A atual configuração morfoestrutural da área de estudo é resultado dos longos e complexos eventos tectônicos relacionados à orogênese brasileira (DELGADO et al., 2003; HEILBRON et al., 2004) e à reativação tectônica jurássica (ALMEIDA, 1976; RICCOMINI 1989; ZALÁN & OLIVEIRA, 2005). Em sua porção norte, próxima ao Rio Paraíba do Sul, a Região Hidrográfica IV constitui-se em uma depressão tectônica Mesozoica-Cenozoica, intensamente influenciada por Zonas de Cisalhamento dúcteis, constituindo um baixo estrutural. Já a região sul-sudoeste, representativa da maior parte da área, está inserida no Planalto Atlântico, mais precisamente na região de Planaltos e Escarpas da serra dos Órgãos, e constitui assim, um alto estrutural.

Aspectos Hidrogeológicos

Considerando a superfície da RH-IV, 6,6% do território constitui aquífero poroso formado a partir de depósitos aluvionares e 93,4% do terreno consiste em aquífero fraturado.

O meio fraturado configura um meio heterogêneo e anisotrópico, características que conferem atributos hidráulicos diversos, tendo em vista as tipologias de rochas e estruturas originárias de processos tectono-magmáticos. Essas características provocam variações na potencialidade dos aquíferos fraturados, que depende, principalmente, da abertura das fraturas e suas interconexões, porosidade e espessuras dos solos residuais (NASCIMENTO, 2012).

VALENTE et al. (2001) concluíram que as principais estruturas neotectônicas, da reativação de descontinuidades do embasamento são falhas normais, oriundas de um regime tectônico distensivo, em torno das principais direções: N50E, N75E e N50W e secundariamente nas direções N5E e N15W. Estas estruturas constituem os condutos que ligam os altos estruturais (zona de recarga) aos baixos estruturais (zonas de acumulação), que em conexão com as fraturas sub-horizontais, relacionado ao alívio de carga, representam

um meio de maior condutividade hidráulica, induzindo um maior fluxo de água subterrânea em direção aos baixos estruturais (Figura 8).

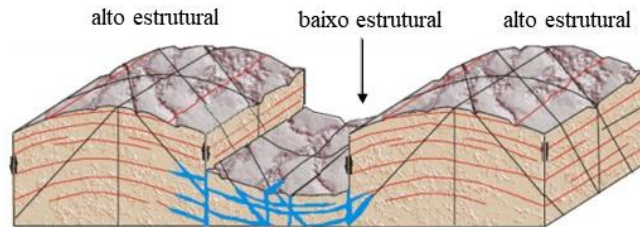


Figura 8. Bloco diagrama representativo de fraturas de alívio sub-horizontais controladas pelo flexuramento de rochas cristalinas através de uma tectônica de falhas de gravidade. Fonte: VALENTE et al. (2001).

Neste estudo, consideraremos cada unidade litológica representada no mapa geológico da CPRM/UERJ de HEILBRON et al., (2016) (ver Figura 7), como um sistema aquífero independente, avaliando, para além da constituição mineralógica e textural, as estruturas tectônicas existentes na área, bem como os contatos entre as mesmas; que possam oferecer algum incremento à disponibilidade de água subterrânea.

ALBUQUERQUE (2019) identificou 11 unidades geológicas com exploração de água subterrânea, sendo elas Complexo Graminha, Complexo Paraíba do Sul, Complexo Quirino, Complexo Rio Negro, Depósitos Aluvionares, Fácies Conservatória, Suíte Cordeiro, Suíte Rio Turvo, Suíte Serra dos Órgãos, Unidade Arcádia Areal e Unidade Juiz de Fora. A unidade hidroestratigráfica mais explorada compreende a Suíte Serra dos Órgãos, que corresponde a 70% dos poços outorgados, seguida pelo Complexo Rio Negro, que engloba aproximadamente 12% dos poços outorgados. Ambas as unidades correspondem a aquíferos fissurais. Para o uso insignificante, que corresponde a valores de volume diário de captação subterrânea inferior a 5.000 litros (5 m³/dia), a unidade mais explorada consiste o Complexo Rio Negro seguida da Suíte Serra dos Órgãos.

Verifica-se como mais representativa a finalidade de água subterrânea outorgada para a indústria, além de finalidades diversas para o uso insignificante (cadastro CNARH) que compreendem consumo humano; limpeza, lavagem de veículos, uso em hortas e jardins, hotéis e pousadas, lazer, pequenos comércios e postos de combustíveis. As áreas com adensamento de pontos outorgados, segundo ALBUQUERQUE (2019), compreendem a região central do município de Petrópolis e o norte do município de Teresópolis, correspondentes às unidades Serra dos Órgãos e Rio Negro, que possuem tanto a maior concentração de pontos de exploração outorgados, quanto as mais significativas vazões de captação. Essas vazões correspondem a uso industrial e uso industrial com consumo humano, sendo principalmente para os fins de fabricação de bebidas.

3.1.2 Características de Uso do Solo e Demanda Hídrica na RH-IV

Uma extensão pequena do uso do solo na RH-IV é dedicada às atividades agrícolas, compondo cerca de 3% de toda região. A maioria da área antropizada da RH-IV é composta por pastagens (43%), cerca de 3% consiste em áreas urbanas e formações florestais e vegetações arbóreas compõem cerca de 50% da RH-IV (CEIVAP, 2015). Entretanto, as atividades agrícolas, muitas vezes de característica familiar, demandam muita água na RH-IV e estão difundidas ao longo de toda a região. Apesar de a categoria pastagem ser preponderante espacialmente, a pecuária produtiva é pouco relevante na região, sendo a produção agrícola uma das atividades importantes para vários municípios da RH-IV sendo eles São José do Vale do Rio Preto, Sumidouro, Paty do Alferes, Teresópolis, Petrópolis e Areal.

Quanto ao uso da água, o expressivo setor de irrigação na região representa 37% das demandas hídricas totais hídricas, sendo dedicada a olericultura (verduras e legumes) a maior parte da produção agrícola (AGEVAP, 2021). Nessas atividades são utilizados sistemas de irrigação por aspersão, abastecidos principalmente pela retirada de água dos canais fluviais através de bombeamento (BRUM, 2010). Consta na base de cadastro de usuários do Comitê Piabanha 1544 pontos de interferência (pontos de captações ou lançamentos), sendo que a maioria desses pontos (30%) tem como finalidade a irrigação, seguido da categoria outras unidades (pousadas, postos de combustíveis, etc) com 19% e posteriormente a categoria consumo humano (17%). O setor industrial engloba 13% desses pontos de interferência e a atividade de criação animal apresentam 8% dos pontos de interferência.

Dados do Comitê Piabanha (2021) também apontam que os municípios de São José do Vale do Rio Preto e Sumidouro fazem uso da água subterrânea na irrigação.

Os pontos de interferência de captações superficiais, subterrâneas bem como pontos de lançamento podem servir como indicadores de atividades influenciadoras na qualidade das águas subterrâneas para a RH-IV, possibilitando perceber que as regiões que mais captam água principalmente para atividades como irrigação, consumo e industrial são: Sumidouro e São José do vale do Rio Preto, com intensa atividade para irrigação, além de Petrópolis e Teresópolis com captações mistas entre elas consumo, indústria, irrigação e etc. Quanto ao lançamento de efluentes, destaca-se o município de Petrópolis com lançamento de esgotamento sanitário. Para outros municípios de relevante porte populacional (Teresópolis e Três Rios) não estão elencados seus pontos para lançamento na RH-IV para efluentes de esgotamento sanitário.

3.2 Delimitação de Zona Potenciais para Aproveitamento de Água Subterrânea

A potencialidade da água subterrânea pode ser estimada através da integração e análise das características físicas da área de estudo. Essas informações foram atreladas a um sistema de informação geográfica (SIG) possibilitando uma análise hierárquica multicritério para as potencialidades dos aquíferos. Trata-se de uma metodologia inovadora, rápida e menos custosa.

O método AHP torna possível classificar e ordenar, através de pesos, a prioridade de critérios para uma determinada pesquisa (BRITO et al., 2019; OLIVIEIRA et al., 2020). Desenvolvido por Saaty (1977), o AHP propõe a definição de uma estrutura hierárquica para

os critérios relacionados ao problema analisado que possibilite a tomada de decisão e a escolha de uma alternativa (Figura 9).

ESTRUTURA DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (SAATY, 1977)

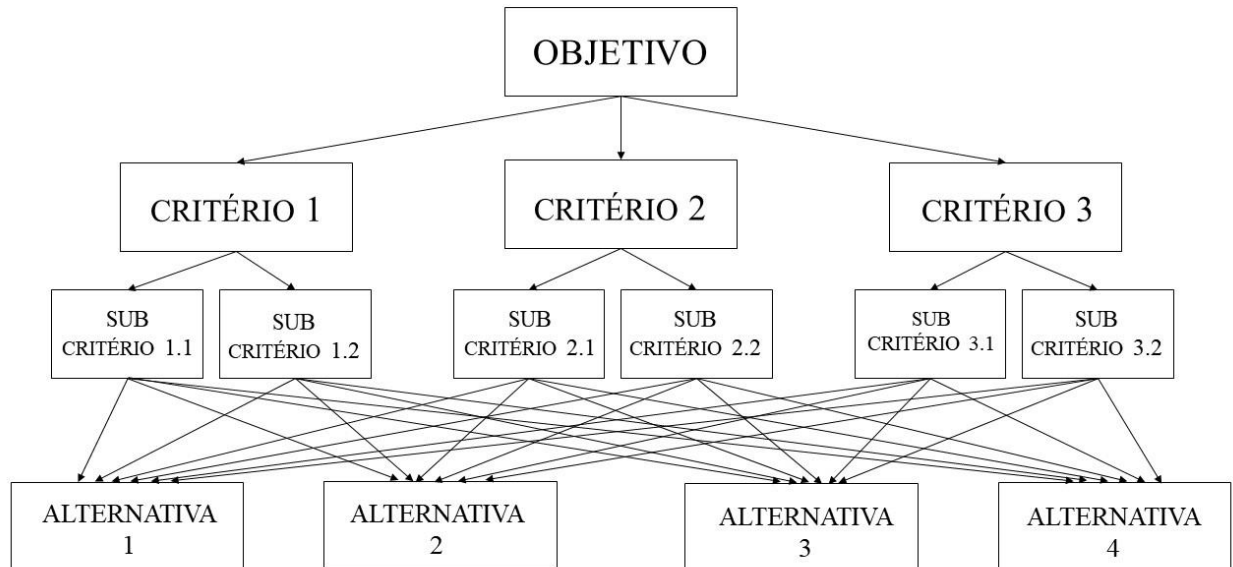


Figura 9. Estrutura do Processo Analítico Hierárquico. O objetivo ou problema é dividido em critérios hierarquizados. Os critérios são subdivididos e a sua importância para o problema também é analisada. A partir do julgamento de todos os elementos, a melhor alternativa é definida. Fonte: Adaptado de SAATY (1977).

Para a definição da hierarquia, é construída uma série de matrizes na qual todos os critérios são comparados entre si (par a par). Esse procedimento é feito para estimar o peso de cada critério, ou seja, para definir o quanto um critério contribui para a o problema analisado (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de comparação entre critérios para definição dos pesos de contribuição de cada critério utilizado.

CRITÉRIOS					
C R I T É R I O S	1	a_{12}	a_{13}	...	a_{1j}
	$1/a_{12}$	1	a_{23}	...	a_{2j}
	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	...	a_{3j}
	1	...
	$1/a_{1j}$	$1/a_{2j}$	$1/a_{3j}$...	1

Por meio da Escala Fundamental de Saaty (SAATY, 1991), os componentes das matrizes são avaliados de acordo com seu grau de importância dentro da hierarquia estabelecida (Tabela 4).

Tabela 4. Escala Fundamental de Saaty que define o grau de importância dos critérios utilizados.

Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena	O julgamento favorece levemente um critério em relação ao outro
5	Importância grande ou essencial	O julgamento favorece fortemente um critério em relação ao outro
7	Importância muito grande	Um critério é muito fortemente favorecido em relação ao outro
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação ao outro
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando há uma condição de compromisso entre as duas condições

A consistência da matriz é calculada a partir da Razão de Consistência (CR), que mede a aleatoriedade dos valores de comparação entre os critérios. Valores de CR maiores que 0,1 indicam que os valores de comparação atribuídos na construção da matriz não são confiáveis. Nesse caso, recomenda-se a reorganização da matriz, alterando os valores de comparação.

O cálculo da CR é feito, em uma primeira etapa, por meio do cálculo do autovalor máximo de cada critério na matriz de comparação. O autovalor é determinado pelo somatório

de cada linha da matriz dividido pelo seu peso normalizado. Os valores calculados são somados e o total obtido é dividido pelo número de critérios. A segunda etapa da verificação de consistência da matriz consiste no cálculo do índice de Consistência (CI), representado pela equação 1 (Saaty, 1980):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Onde n é o número de critérios e λ_{\max} é o autovalor máximo.

A terceira e última etapa de verificação consiste no cálculo da Razão de Consistência (CR), representada pela equação 2 (Saaty, 1980):

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (2)$$

Onde CI é o Índice de Consistência previamente calculado e o Índice de Consistência Randômico (RCI) é dado pela Escala de Saaty (Saaty, 1980) e varia o número de critérios envolvidos na análise (Tabela 5).

Tabela 5. Índice de Consistência Randômico (RCI) dado pela Escala de Saaty.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RCI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,58

Posteriormente, é feito o ranqueamento das classes (subcritérios) que compõem cada critério, sendo que as classes mais importantes para a resolução do problema recebem maiores valores no ranqueamento enquanto as menos influentes recebem valores menores.

Para finalizar os cálculos da análise, devem-se combinar as matrizes de comparação das alternativas (das classes de cada critério) com a matriz de importância dos critérios. Cada matriz de comparação deve ser multiplicada pelo peso calculado para os critérios (Tabela 6).

3.2.1 Mapas Temáticos para Análise Multicritério

Para estimar a potencialidade dos aquíferos foram analisados sete critérios conjugados que foram considerados responsáveis pela ocorrência das águas subterrâneas na RH-IV, sendo eles: solos, densidade de lineamentos, geologia, precipitação, densidade de drenagens, geomorfologia, declividade.

O mapa geológico utilizado nesta análise foi adaptado do trabalho Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro, em escala 1: 400.000, desenvolvido pela CPRM em parceria com a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (HEILBRON et al., 2016).

O mapa pluviométrico foi gerado a partir da interpolação (krigagem ordinária), em malha contínua com células de 30 metros, de isoietas de precipitação média anual do atlas pluviométrico na escala 1:5.000.000, disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (PINTO et al., 2011).

Já os mapas de solos e geomorfologia foram produzidos a partir da edição de arquivos em formato *shapefile* obtidos do Projeto Rio de Janeiro, uma parceria entre a EMBRAPA e a CPRM, onde CARVALHO FILHO et al. (2003) e DANTAS (2001) realizaram os estudos dos solos e de geomorfologia, respectivamente, na escala 1:500.000.

O Modelo Digital de Elevação foi obtido por meio de interpolação de camadas vetoriais da base cartográfica para o Estado do Rio de Janeiro em escala 1:25.000 (IBGE, 2006). A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), gerou-se mapa de declividade.

Os valores de declividade foram agrupados segundo os intervalos de classes propostos por EMBRAPA (1979). No geral, as regiões que apresentam declividades acentuadas, possuem alta perda de água por escoamento superficial, de modo que a recarga de água subterrânea se torna reduzida (DE REU et al., 2013; MAGESH et al. 2012). Por outro lado, áreas mais planas apresentam maiores perspectivas hidrogeológicas (YEH et al., 2008).

O mapa de densidade de lineamentos corresponde a zonas de falhas e fraturas que podem resultar no aumento da porosidade secundária e potencializar condições hidrodinâmicas dos aquíferos (YEH et al., 2016; SANDER, 2007). O cálculo da densidade de lineamentos, que corresponde ao comprimento do total de lineamentos por unidade de área, adotou os critérios utilizados por Liu (1984). Para esta análise não foram considerados os elementos topográficos positivos, tais como segmentos de escarpas e alinhamentos de cristas, mas somente as expressões de elementos topográficos retilíneos negativos, tais como vales e trechos de rios e depressões alongadas por serem essas estruturas acumuladoras de água. Estas feições foram destacadas em ambiente SIG na escala 1:100.000, sobre o MDE obtido para a área, a partir da interpolação de dados vetoriais.

A densidade de drenagens corresponde ao comprimento médio de canais de uma bacia por unidade de área é um dos principais parâmetros na análise morfométrica para bacias hidrográficas (HIRUMA & POÇANO, 1994). A densidade de drenagens foi calculada a partir de dados vetoriais da base cartográfica para o Estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2006).

Utilizou-se o software *ArcGIS Desktop*. v.10.6 para geração dos mapas temáticos, bem como a geração do modelo digital de elevação e os atributos derivados. Os arquivos em formato *shapefile*, originalmente representados no *datum* SIRGAS 2000 foram convertidos para o sistema *WGS 1984 Universal Transversa Mercator*, Zona 23S. A interpolação foi realizada pelo método *Topo to Raster*, adotando-se o valor de 30 metros de resolução espacial. Os arquivos que continham dados vetoriais foram convertidos em rasters e reclassificados. Dessa forma, todos os mapas finais tem resolução espacial de 30 metros.

Vale salientar que os dados disponíveis para a caracterização das variáveis encontram-se em diferentes escalas, resultando em diferentes níveis de detalhamento.

3.2.2 Aplicação do Método AHP e Atribuição de Pesos

A metodologia AHP aplicada nesta pesquisa com auxílio de SIG está demonstrada no fluxograma a seguir (Figura 10).

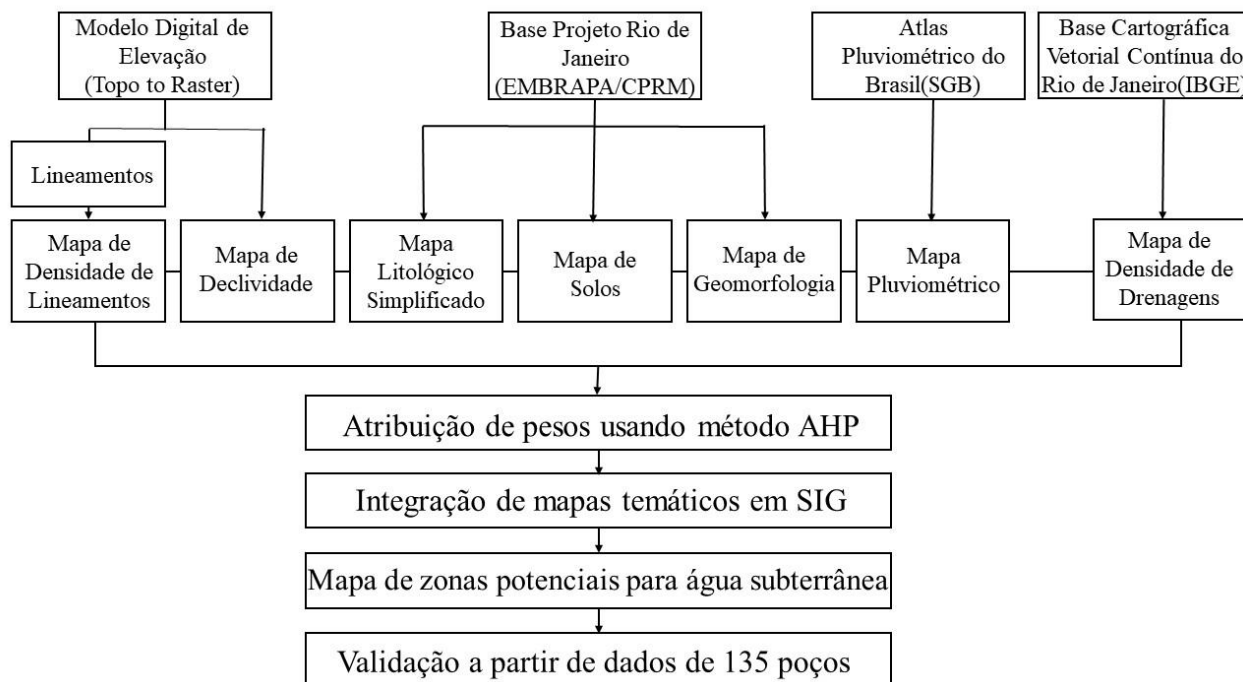


Figura 10. Fluxograma de metodologia para determinação de zonas potenciais de água subterrânea.

Aos mapas foram atribuídos pesos de acordo com a importância do critério relacionado e as classes (subcritérios) de cada um dos critérios, sendo ranqueadas também de acordo com a influência que exercem sobre a ocorrência de água subterrânea.

Para a definição da hierarquia, foi construída uma série de matrizes na qual todos os critérios são comparados entre si. Por meio da Escala Fundamental de Saaty (1980), os componentes das matrizes são avaliados, segundo sua importância. Os valores de importância relativa são determinados usando a escala 1 a 9 de Saaty (1980), onde uma pontuação de 1 representa influência igual entre os dois mapas temáticos e uma pontuação de 9 indica a influência extrema de um mapa temático em comparação com outro (PINTO et al., 2017; DAS, 2017). Saaty (2008) enfatiza: ainda que ao utilizar uma escala de preferência objetiva, a avaliação e as preferências por parte do analista possuem caráter subjetivo, já que os pesos são proporcionais ao grau de importância dado a elas.

Tabela 6. Atribuição de pesos para critérios e subcritérios.

Critério	Peso	Classe	Ranqueamento Classes
----------	------	--------	----------------------

Solos	0,3097	Neossolo Flúvico/ Gleissolo Háptico	8	
		Latossolo Vermelho Amarelo/ Vermelho	7	
		Argissolo Vermelho Amarelo/ Vermelho	6	
		Cambissolo Háptico	5	
		Neossolo Litólico	4	
		Afloramento de rocha	3	
		Área Urbana	2	
		Corpo de Água/ Ilha	1	
Densidade Lineamentos (km/km²)	0,2348	0 - 0,14	Baixa	1
		0,14 - 0,29	Média	2
		0,29 - 0,46	Alta	3
		0,46 - 0,97	Muito Alta	4
Geologia	0,1794	Unidades Juiz de fora, Rio turvo, Raposo, Conservatória, Quirino, Paraíba do sul, Anta, Rio Negro, Cordeiro, Serra da Bolívia, Arcádia areal	Gnaisses	1
		Granito Andorinha, Frade, Nova Friburgo, Teresópolis, Conselheiro Paulino	Granitos	2
		Planícies aluvionares/	Planícies aluvionares	3
Pluviometria (mm/ano)	0,1356	1055 - 1400	Baixa	1
		1400 - 1800	Média	2
		1800 - 2200		
		2200 - 2600	Alta	3
		2600 - 2973		
Densidade Drenagem (km/km²)	0,0583	0,222098 - 1,19	Baixa	4
		1,19 - 2,16	Média	3
		2,16 - 3,13	Alta	2
		3,13 - 4,10	Muito Alta	1
Geomorfologia	0,0505	Planícies fluviais		4
		Morros		3
		Colinas		2
		Serras isoladas e locais		1
		Serras escarpadas		1

Declividade (%)	0,0315	0 - 3	Plano	6
		3 a 8	Suave Ondulado	5
		8 a 20	Ondulado	4
		20 - 45	Forte Ondulado	3
		45 - 75	Montanhoso	2
		> 75	Escarpado	1

3.2.3 Produção do Mapa de Zonas Potenciais

Todos os sete mapas temáticos foram integrados considerando os respectivos pesos, e ambiente SIG sendo utilizada a seguinte formulação: Mapa de Potencial para Água Subterrânea = (Mapa Solos x 0,3097 × Classes de Solos x Ranking de cada classe) + (Mapa Densidade de Lineamentos x 0,2348 × Classes de Densidade de Lineamento x Ranking de cada classe) + (Mapa Geologia x 0,1794 × Classes de Geologia x Ranking de cada classe) + (Mapa Pluviometria x 0,1356 × Classes de Pluviometria x Ranking de cada classe) + (Mapa Densidade de drenagens x 0,0583 × Classes de Densidade de drenagens x Ranking de cada classe) + (Mapa Geomorfologia x 0,0505 × Classes de Geomorfologia x Ranking de cada classe) + (Mapa Declividade x 0,0315 × Classes de Declividade x Ranking de cada classe).

A sobreposição ponderada dos mapas temáticos utilizou a ferramenta *Weighted Overlay*, baseada no método Álgebra de Mapas. O mapa potencial de águas subterrâneas foi categorizado em cinco classes: muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa. A validação da análise baseou-se em dados de produção das águas subterrâneas, representada pelo parâmetro capacidade específica (m³/h/m) para a Região Hidrográfica do Piabonha considerando 135 poços tubulares cadastrados pelo INEA e SIAGAS/CPRM.

3.3 Levantamento e Análise dos Dados de Captações de Águas Subterrâneas (poços)

As análises hidrogeológicas desta pesquisa basearam-se em dados pré-existentes. Foram considerados dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e dados do SIAGAS (Serviço Geológico do Brasil) para a RH-IV, totalizando 43 amostras que apresentaram balanços iônicos consistentes para classificação hidroquímica e elaboração dos diagramas hidroquímicos e análises estatísticas complementares, 175 dados de poços para análise da carga hidráulica e fluxo da água subterrânea e 60 dados de poços utilizados nos cálculos das razões iônicas, sendo que as análises foram separadas em período de seca e período de chuva. Considerando os dados hidrogeológicos pré-existentes de fontes diversas, foi realizado um minucioso controle de qualidade dos dados dos dados secundários.

Esta pesquisa teve caráter descritivo em virtude da quanti-qualificação dos dados hidrogeológicos pré-existentes. Tal pesquisa possui natureza aplicada no âmbito regional, já

que considerou a Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV), localizada na região central do estado do Rio de Janeiro.

3.3.1 Caracterização da Carga Hidráulica e Fluxo de Água Subterrânea

Para o mapa de carga hidráulica e delimitação do fluxo de água subterrânea, bem como a localização geográfica dos poços e de dados de qualidade de água foi utilizado o *software ArcGis 10.3 GIS®* desenvolvido pela *ESRI*. Foi gerado o Modelo Digital de Elevação para a área, com resolução espacial de 30 metros, obtido por meio de interpolação de camadas vetoriais da base cartográfica para o Estado do Rio de Janeiro em escala 1: 25.000 (IBGE, 2006). As unidades litológicas e estruturais foram obtidas a partir do mapa geológico em escala 1: 400.000, digitalizado e georreferenciado pelo CPRM (Serviço Geológico do Brasil) (HEILBRON et al., 2016).

O método de krigagem ordinária foi utilizado na definição de fluxo, que estabeleceu como carga hidráulica a diferença entre a cota altimétrica apresentada pelo poço (obtida a partir do Modelo Digital de Elevação) e o nível estático, em metros. Vale salientar que o regime dinâmico (cargas hidráulicas) para a água subterrânea estabelecido na RH-IV, a partir deste trabalho foi estimado de maneira generalizada, considerando dados de níveis estáticos de poços para diversos períodos de suas instalações. Tratando-se, portanto, de um modelo basal que deve ser melhorado em pesquisas futuras. Entretanto, ainda que generalista, o modelo cumpriu o papel de fornecer subsídios para análise dos dados hidroquímicos, esclarecendo sobre os cenários de qualidade de água, definindo áreas de recargas e locais de prováveis conflitos hídricos.

3.3.2 Análise dos Dados Hidroquímicos

A partir da análise dos íons principais, que precisam estar em equilíbrio (balanço iônico), a fim de assegurar que as análises químicas representem a ambiência do meio coletado, as tipologias hidroquímicas para as águas subterrâneas na RH-IV foram estimadas, considerando os diagramas de Piper e Stiff. As análises dos diagramas possibilitaram conjecturar sobre tempo de permanência das águas nos aquíferos, processos de salinização e outros aspectos de evolução hidroquímica. O software utilizado na elaboração dos diagramas, bem como análise para cálculo do risco de salinidade (Razão de Adsorção de Sódio) foi o Qualigraf®, gratuito e elaborado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos - FUNCENE.

Tanto os cálculos das razões iônicas quanto a estatística descritiva considerando os principais parâmetros físico-químicos foram elaborados a partir de planilha Excel®.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carga Hidráulica e Circulação da Água Subterrânea – Modelo Preliminar

Além das particularidades geológicas, o nível d'água nos poços é influenciado por diversos fatores como topografia, precipitação, uso do solo e características construtivas (MOON et al., 2004). Dados do nível d'água e da cota altimétrica do ponto medido são básicos para definição da carga hidráulica e, por conseguinte do fluxo de água subterrânea.

Vale lembrar que a RH-IV é composta por diversas rochas cristalinas que configuram aquíferos fraturados distintos, além dos depósitos aluvionares e gravitacionais que constituem meios porosos, configurando um terreno heterogêneo e anisotrópico, com atributos hidráulicos diversificados.

O modelo adotado mostra que os poços com maior carga hidráulica, ou seja, com menor diferença entre cota altimétrica e nível estático, localizam-se na porção SE da área, que corresponde principalmente com municípios de Petrópolis e Teresópolis (principais áreas de recarga). Os menores valores de carga hidráulica localizam-se nas cidades de Carmo, Sapucaia e Três Rios, que constituem as áreas com menor elevação da área, limítrofes à calha do Rio Paraíba do Sul (áreas de descarga). O modelo preliminar de fluxo subterrâneo aponta para uma amplitude de quase 900 metros de superfície potenciométrica, com o fluxo de água subterrânea sendo majoritariamente de SE para NW, em direção do Rio Paraíba do Sul, principal corpo hídrico de descarga das águas subterrâneas (Figura 11).

A recarga do sistema subterrâneo na área de estudo ocorre principalmente pela infiltração das águas das chuvas. Essa área corresponde, principalmente, à região da Serra dos Órgãos, nos municípios de Petrópolis e Teresópolis, onde a altitude chega a 2.300 metros e a precipitação média anual é mais alta, atingindo os 3.000 mm/ano. Os municípios de Sumidouro e Paty do Alferes também apresentam áreas de recarga importantes para a RH IV.

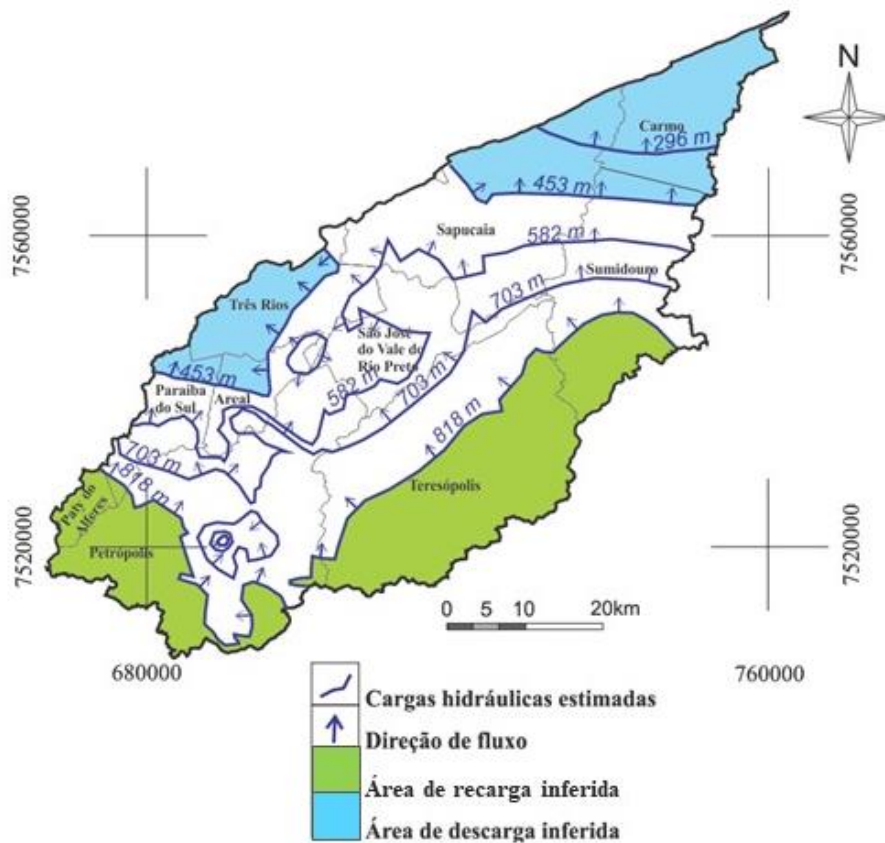


Figura 11. Modelo Preliminar de isolinhas de carga hidráulica, fluxo, áreas de recarga e descarga principais.

4.2 Delineação de zonas potenciais para águas subterrâneas da Região Hidrográfica do Piauí

Buscando minimizar a subjetividade, além da experiência das pesquisadoras na área, as classificações dos critérios também consideraram análises comparativas entre os intervalos de classes de pesquisas para diversas regiões do mundo. Desta forma, as análises basearam-se no grau de importância dentro da hierarquia das condicionantes físicas que mais possuem capacidade de disponibilizar água subterrânea. Os pesos calculados para cada critério estão na Tabela 7:

Tabela 7. Matriz de comparação entre critérios.

Critérios	Solos	Lineamentos	Geologia	Precipitação	Drenagens	Geomorfologia	Declividade	Peso Normalizado
Solos	1	2	2	3	5	5	6	0,3097
Lineamentos	1/2	1	2	2	4	5	7	0,2348
Geologia	1/2	1/2	1	2	4	4	5	0,1794
Precipitação	1/3	1/3	1/2	1	3	4	5	0,1356
Drenagens	1/5	1/5	1/4	1/3	1	1	3	0,0583
Geomorfologia	1/5	1/5	1/4	1/4	1	1	2	0,0505
Declividade	1/6	1/6	1/5	1/5	1/3	1/2	1	0,0315

A coerência da matriz foi calculada a partir da Razão de Consistência (CR), que mede a aleatoriedade dos valores de comparação entre os critérios. Valores de CR maiores que 0,1 indicam que os valores de comparação atribuídos na construção da matriz não são confiáveis. Nesse caso, recomenda-se a reorganização da matriz, alterando os valores de comparação.

O cálculo da CR foi feito por meio do cálculo do autovalor máximo de cada critério na matriz de comparação. O autovalor foi determinado pelo somatório de cada linha dividido pelo seu peso normalizado. Os valores calculados foram somados e o total obtido foi dividido pelo número de critérios. O autovalor máximo obtido foi 7,23. Posteriormente foi realizada a verificação da consistência da matriz com o cálculo do índice de Consistência (CI), cujo valor foi 0,038. O valor de CR obtido foi 0,027 e, portanto, a matriz de comparação entre os critérios provou-se consistente.

Posteriormente foi feito o ranqueamento das classes de cada critério, sendo que as classes mais favoráveis para a ocorrência de água subterrânea receberam maiores valores no ranqueamento, enquanto as menos influentes receberam valores menores. A Tabela 8 apresenta os pesos atribuídos para cada critério e o ranqueamento para os subcritérios, isto é, para as diferentes classes de cada mapa temático:

Tabela 8. Ranqueamento para as classes de cada critério

Critério	Peso	Classe	Ranqueamento Classes
Solos	0,3097	Neossolo Flúvico/ Gleissolo Háptico	8
		Latossolo Vermelho Amarelo/ Vermelho	7

		Argissolo Vermelho Amarelo/ Vermelho	6	
		Cambissolo Háplico	5	
		Neossolo Litólico	4	
		Afloramento de rocha	3	
		Área Urbana	2	
		Corpo de Água/ Ilha	1	
Densidade Lineamentos (km/km²)	0,2348	0 - 0,14	Baixa	1
		0,14 - 0,29	Média	2
		0,29 - 0,46	Alta	3
		0,46 - 0,97	Muito Alta	4
Geologia	0,1794	Unidades Juiz de fora, Rio turvo, Raposo, Conservatória, Quirino, Paraíba do sul, Anta, Rio Negro, Cordeiro, Serra da Bolívia, Arcádia areal	Gnaisses	1
		Granito Andorinha, Frade, Nova Friburgo, Teresópolis, Conselheiro Paulino	Granitos	2
		Planícies aluvionares/	Planícies aluvionares	3
Pluviometria (mm/ano)	0,1356	1055 - 1400	Baixa	1
		1400 - 1800	Média	2
		1800 - 2200		
		2200 - 2600	Alta	3
		2600 - 2973		
Densidade Drenagem (km/km²)	0,0583	0,222098 - 1,19	Baixa	4
		1,19 - 2,16	Média	3
		2,16 - 3,13	Alta	2
		3,13 - 4,10	Muito Alta	1
Geomorfologia	0,0505	Planícies fluviais		4
		Morros		
		Colinas		3
		Serras isoladas e locais		2
		Serras escarpadas		1
Declividade (%)	0,0315	0 - 3	Plano	6
		3 a 8	Suave Ondulado	5
		8 a 20	Ondulado	4

20 - 45	Forte Ondulado	3
45 - 75	Montanhoso	2
> 75	Escarpado	1

A Tabela 9 apresenta a distribuição das classes (subcritérios) e a Figura 11 os mapas temáticos utilizados para estimativa das zonas potenciais para águas subterrâneas na RH-IV. As respectivas interpretações foram discutidas nos tópicos adiante.

Tabela 9. Distribuição dos subcritérios que compõem cada mapa temático.

Critério	Subcritério/Classe	Área km²	Área %	
Densidade de Lineamentos	0 - 0,14 km/km ²	Baixa	911,27	26,33%
	0,14 - 0,29 km/km ²	Média	1.316,16	38,03%
	0,29 - 0,46 km/km ²	Alta	851,85	24,62%
	0,46 - 0,97 km/km ²	Muito Alta	381,21	11,02%
Declividade	0 - 3 %	Plano	54,81	1,58%
	3 - 8%	Suave	122,40	3,54%
		Ondulado		
	8 - 20%	Ondulado	463,90	13,41%
	20 - 45%	Forte	1.665,72	48,14%
	Ondulado			
	45 - 75%	Montanhoso	1.021,01	29,51%
	> 75%	Escarpado	132,59	3,83%
Geomorfologia	Planícies fluviais		129,15	3,75%
	Morros		1.393,54	40,41%
	Colinas			
	Serras isoladas e locais		1.059,37	30,72%
	Serras escarpadas		866,44	25,13%
Precipitação	1055 - 1400 mm	Baixa	2.015,27	58,24%
	1400 - 1800 mm	Média	1.158,42	33,48%
	1800 - 2200 mm			
	2200 - 2600 mm	Alta	286,76	8,29%
	2600 - 2973 mm			
Solos	Neossolo Flúvico/ Gleissolo Háplico		8,55	0,25%
	Latosolo Vermelho/ Vermelho Amarelo		1.257,40	36,44%
	Argissolo Vermelho Amarelo/ Vermelho		739,93	21,44%
	Cambissolo Háplico		1.039,22	30,12%
	Neossolo Litólico		39,29	1,14%
	Afloramento de rocha		315,75	9,15%
	Área Urbana		42,46	1,23%

		Corpo de Água/ Ilha	7,89	0,23%
Densidade de Drenagens	0,22 - 1,19 km/km ²	Baixa	64,57	1,87%
	1,19 - 2,16 km/km ²	Média	905,00	26,15%
	2,16 - 3,13 km/km ²	Alta	2.331,83	67,38%
	3,13 - 4,10 km/km ²	Muito Alta	159,081	4,60%
Geologia	Unidades Juiz de Fora, Leucognaisses Domínio Costeiro, Rio Turvo, Raposo, Conservatória, Quirino, Paraíba do Sul, Anta, Rio Negro, Cordeiro, Serra da Bolívia, Arcádia	Gnaisses	2.222,34	64,29%
	Granito Andorinha, Graminha, Frade, Nova Friburgo, Teresópolis, Conselheiro Paulino, Suíte Serra dos Órgãos	Granitos	1.209,94	35,00%
	Depósitos Aluvionares	Depósitos aluvionares	24,42	0,71%

a) *Solos*

Os solos podem condicionar a quantidade de água infiltrada nos sistemas aquíferos e, portanto, influenciar sobremaneira as condições de recarga das águas subterrâneas (DAS, 2017). A figura 12 indica que predominam na RH-IV os Latossolos (36%) distribuídos ao longo de toda a RH-IV, seguidos de Cambissolos (30%) concentrados na região sudoeste e sudeste, além de Argissolos (21%), nas porções noroeste e nordeste. Os Neossolos dividem-se em flúvicos e litólicos, tendo comportamentos distintos quanto ao potencial das águas subterrâneas.

Solos com alta capacidade de infiltração, profundos e com boa drenagem favorecem a recarga dos aquíferos, enquanto solos mal estruturados e com camadas impermeáveis favorecem o escoamento superficial e processos erosivos (NETO et al., 2013). Desta forma, os Latossolos foram considerados com boas perspectivas para a ocorrência de água subterrânea, por serem solos profundos, bem drenados e permeáveis. Os Argissolos apesar de profundos, relevantemente intemperizados possuem maior fração de argila se comparado aos Latossolos, fato que reduz a taxa de infiltração (EMBRAPA, 2018). Na categoria de solos pouco profundos, decorrentes do baixo grau de intemperismo encontram-se os Neossolos Litólicos e os Cambissolos. Esses, juntamente com os Gleissolos, apresentam uma capacidade de infiltração menor. Já os Neossolos Flúvicos, formados por ambientes aluvionares, estão localizados em relevos planos que favorecem a descarga da água subterrânea.

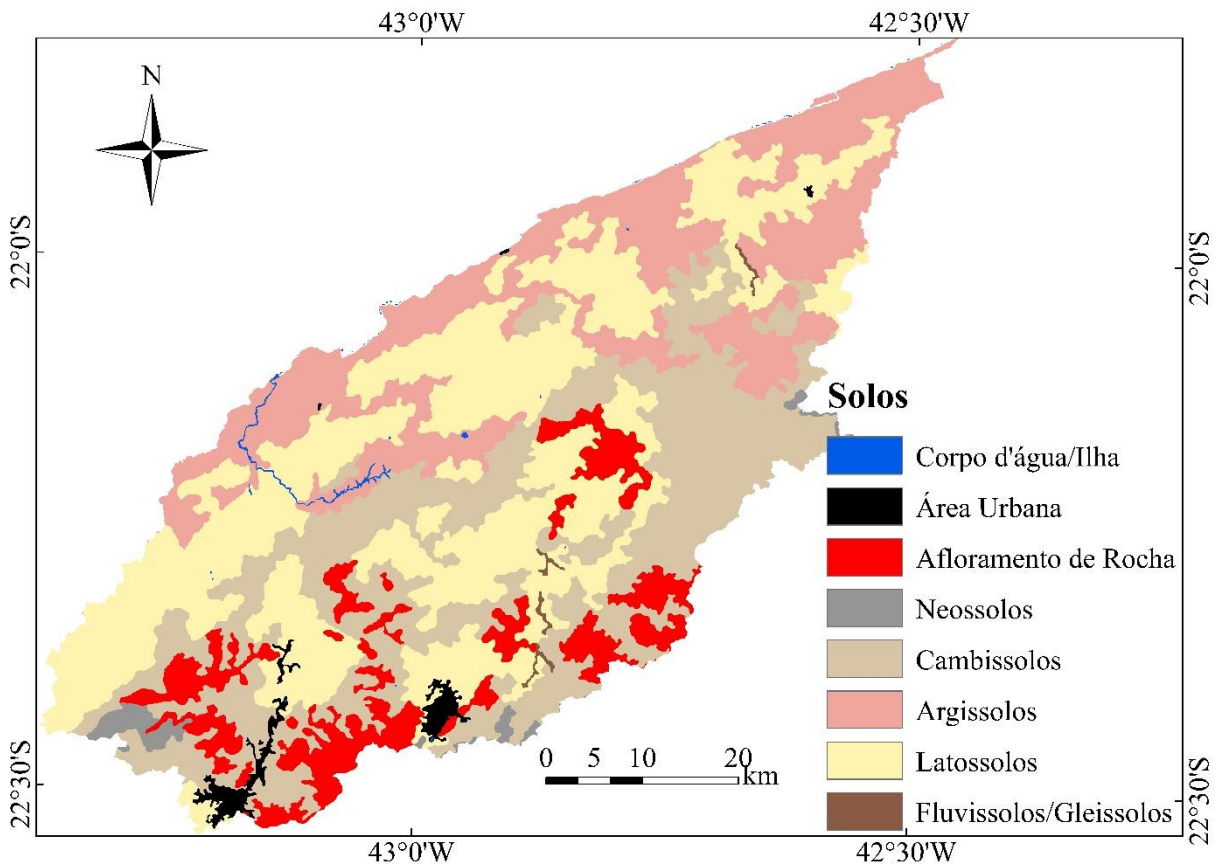


Figura 12. Mapa de Solos da área de estudos. Predominam Latossolos e Argissolos, ocorrendo também Cambissolos e Solos Hidromórficos (Fluviissolos e Gleissolos). Na região da Serra dos Órgãos há ocorrências importantes de Neossolos e afloramentos rochosos.

b) *Geomorfologia*

No mapa da Figura 13, as feições geomorfológicas que existem na região hidrográfica Piabanha foram separadas em quatro classes: sendo as categorias serras escarpadas, serras isoladas, morros e colinas além das planícies fluviais. A região apresenta predomínio de serras (isoladas ou escarpadas), que compõem cerca de 56% do território. Na sequência, ressalta-se a grande quantidade de terrenos colinosos (40%), com relevos mais suaves que os ambientes serranos, presentes também por toda a região. A categoria planície fluvial está pontuada a nordeste da RH-IV, compreendendo apenas 4% do território.

Considerando somente a análise dos relevos serranos, não seriam boas as perspectivas para a ocorrência de água subterrânea, já que o ambiente serrano favorece o escoamento superficial em detrimento da infiltração. A categoria planície fluvial por ser plana constituiriam as áreas com maior potencial para água subterrânea, compreendendo zonas de descargas.

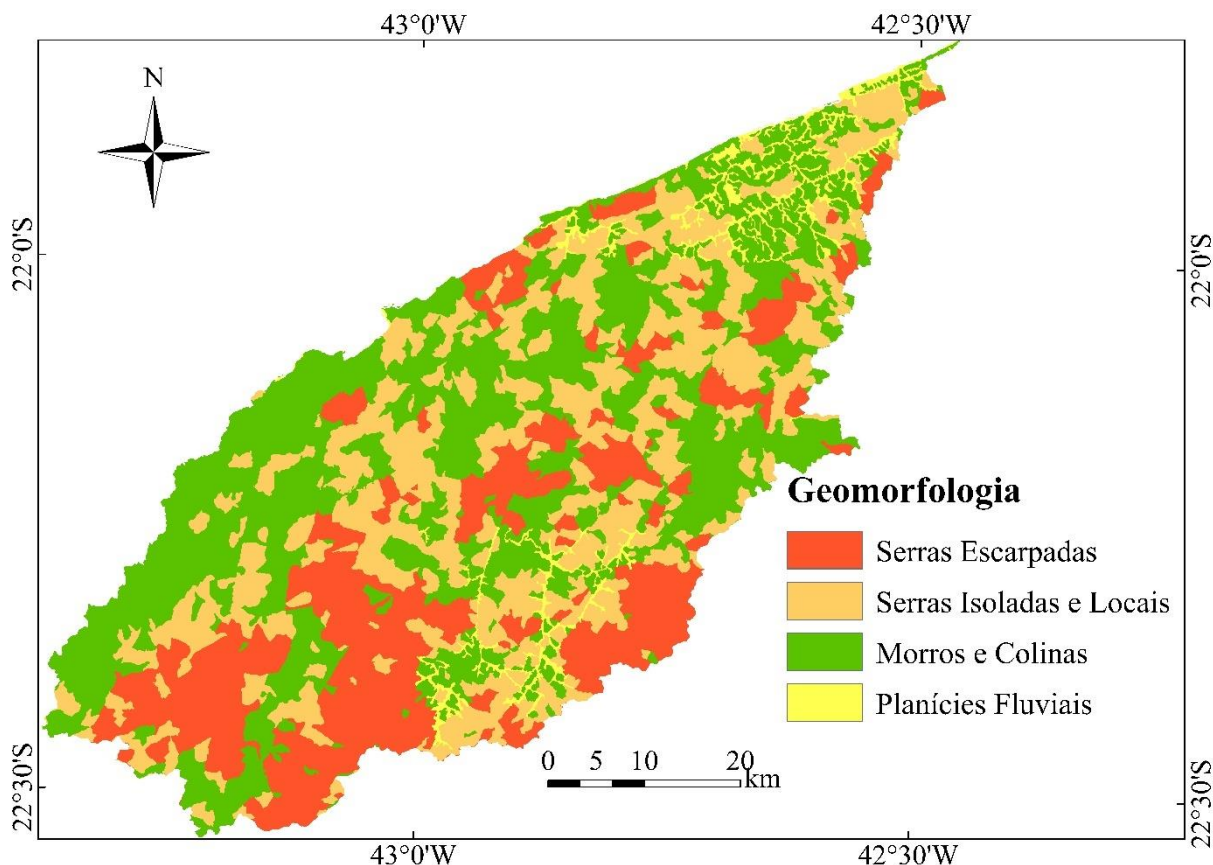


Figura 13. Mapa Geomorfológico da área de estudos. Predominam feições escarpadas na região da Serra dos Órgãos. Na porção NE observam-se planícies fluviais, que constituem ambientes geomorfológicos mais favoráveis ao acúmulo de água subterrânea.

c) *Densidade de Drenagens*

A densidade de drenagens na Região Hidrográfica Piabanha variou 0,22 - 4,1 km/km², que foram subdivididas em 4 classes de densidades de lineamentos (Figura 14). Cerca de 5% do território é classificado com densidade muito alta (3,13 - 4,10 km/km²), e cerca de 67% com densidade alta (2,16 - 3,13 km/km²), categoria amplamente disseminada ao longo da região. A densidade média consistiu o intervalo de 1,19 - 2,16 km/km², que recobre cerca 26% da região, sendo predominante nas bordas da RH-IV. A densidade baixa, em áreas limítrofes da RH-IV, possui intervalo de 0,22 a 1,19 km/km², e recobre apenas 2% da área.

Quanto mais baixo a categoria, maior a capacidade de infiltração que potencializaria a recarga dos sistemas aquíferos, já que a densidade de lineamentos apresenta uma relação inversamente proporcional com a permeabilidade do terreno (YEH et al., 2016; ARULBALAJI, 2019). Baseando-se na análise da densidade de drenagens as áreas com as maiores capacidades de infiltração estão restritas à periferia da RH-IV (Figura 14).

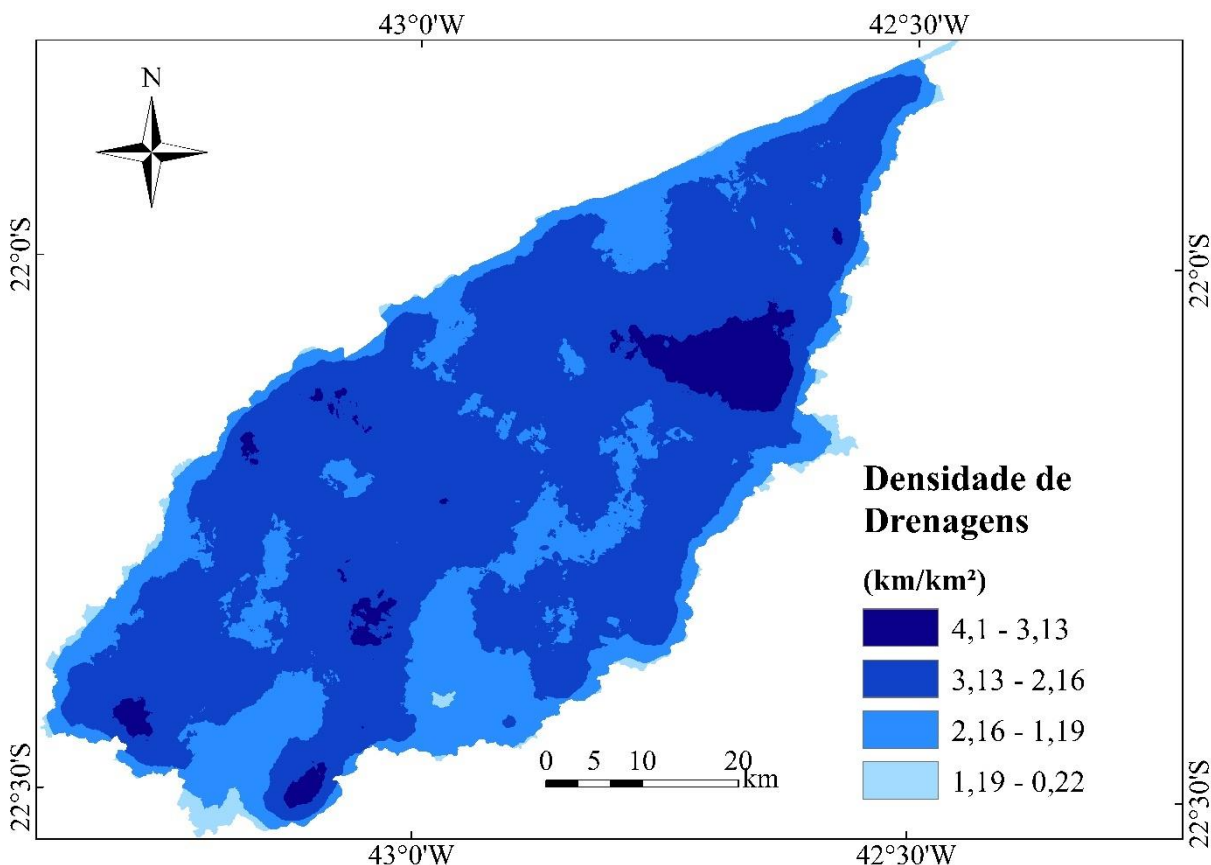


Figura 14. Mapa de Densidade de Drenagens da área de estudos. Predominam densidades altas, entre 3,13 e 2,16 km/km². As menores densidades, mais favoráveis do ponto de vista hidrogeológico, encontram-se nas bordas da área.

d) *Densidade de Lineamentos*

A densidade de lineamentos na região hidrográfica Piabanha variou entre 0 e 0,97 km/km², estando delimitadas no mapa quatro classes: regiões com baixa densidade (0 - 0,14 km/km²), média (0,14 - 0,29 km/km²), alta (0,29 - 0,46 km/km²) e muito alta (0,46 - 0,97 km/km²). As categorias muito alta e alta densidade de lineamentos representaram cerca de 36% da RH-IV e predominaram nas regiões sul e sudoeste (Figura 15). A categoria média densidade de lineamentos equivalem a 38% do território, estando distribuída por toda a RH-IV. A categoria baixa densidade pode ser verificada principalmente na região nordeste da área de estudos, correspondendo a 26% do território.

Os valores mais altos dessa variável indicam a preferência da trajetória da água subterrânea e consequentemente aspectos de produtividade dos poços (MAGESH et al. 2012). Desta forma, as zonas de maior densidade de lineamentos estariam relacionadas com o domínio morfoestrutural de serras e planaltos da Serra do Mar. Os lineamentos possuem, predominantemente, direções NE-SW, NW-SE e, secundariamente, direções N-S e E-W (Figura 16). A partir da localização das categorias alta e muito alta densidade de lineamentos no mapa (Figura 14), foi possível relacionar esses lineamentos com a reativações tectônicas, resultantes

inclusive da abertura do oceano Atlântico. Não obstante, as rochas do Complexo Rio Negro, que são ortognaisses e granodioritos, além dos granitos da Suíte Serra dos Órgãos, influenciadas por essa reativação e pertencentes ao Planalto Atlântico, correspondem às unidades hidroestratigráficas mais exploradas para água subterrânea na região.

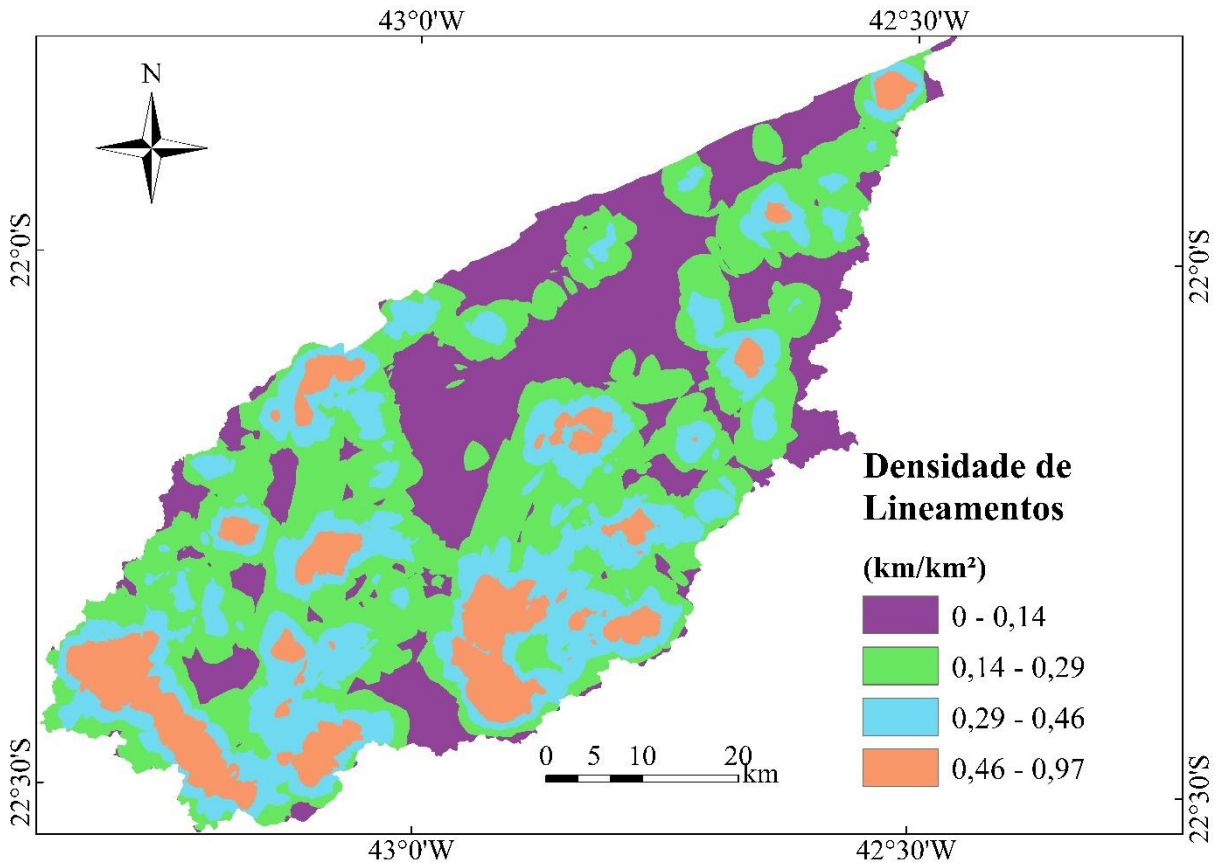


Figura 15. Mapa de Densidade de Lineamentos da área de estudos. Há importantes núcleos de maior densidade na porção S-SW, sendo essas regiões as mais favoráveis para a infiltração de água.

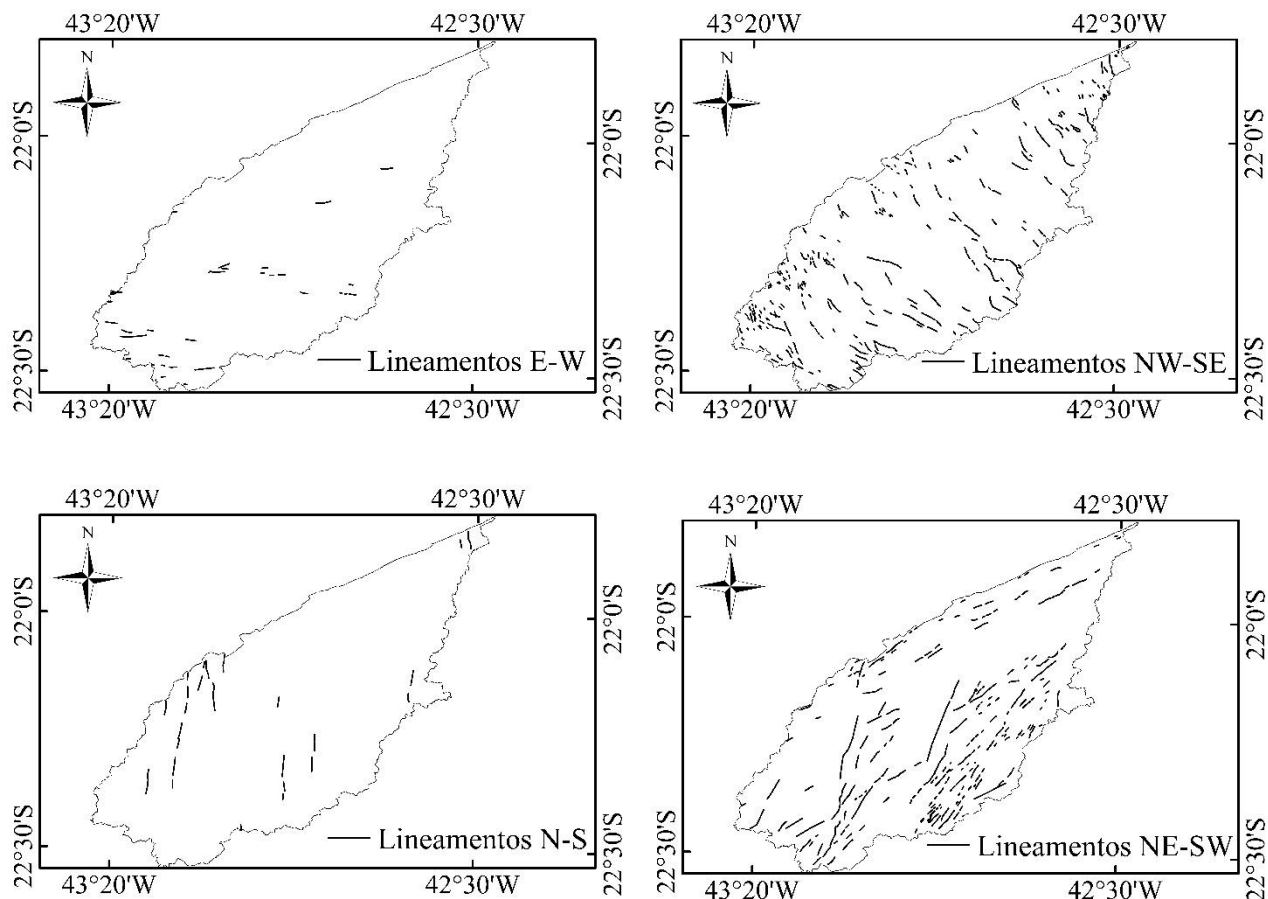


Figura 16. Lineamentos morfoestruturais destacados, a partir de fotointerpretação em SIG, em quatro direções azimutais (0°, 45°, 90° e 135°). Os lineamentos de direção NE-SW refletem as zonas de cisalhamento dúcteis resultantes do Ciclo Brasileiro. As estruturas de direção NW-SE revelam a reativação dessas zonas de cisalhamento, iniciada a partir da atuação de um regime distensivo de direção NNW-SSE relacionado à quebra do supercontinente Gondwana.

e) Declividade

A Figura 17 mostra a área ocupada por cada classe considerada no mapa de declividade. Foram utilizadas 6 categorias, sendo as declividades escarpadas e montanhosas responsáveis por 33% do território, forte ondulado e ondulado por 62% e suave ondulado e plano por 5% da região.

No geral, as regiões que apresentam declividades acentuadas, possuem alta perda de água por escoamento superficial, de modo que a recarga de água subterrânea se torna reduzida (DE REU et al., 2013; MAGESH et al., 2012). Por outro lado, áreas mais planas apresentam maiores perspectivas hidrogeológicas (YEH et al., 2008).

Na RH-IV predominam relevos declivosos, ou seja, relevos que em períodos de chuvas tendem a promover maior escoamento superficial, sendo a taxa de infiltração influenciada pela inclinação da superfície, conforme afirma ARULBALAJI (2019). Tal fato é corroborado na RH-IV pelos altos valores da densidade de drenagens.

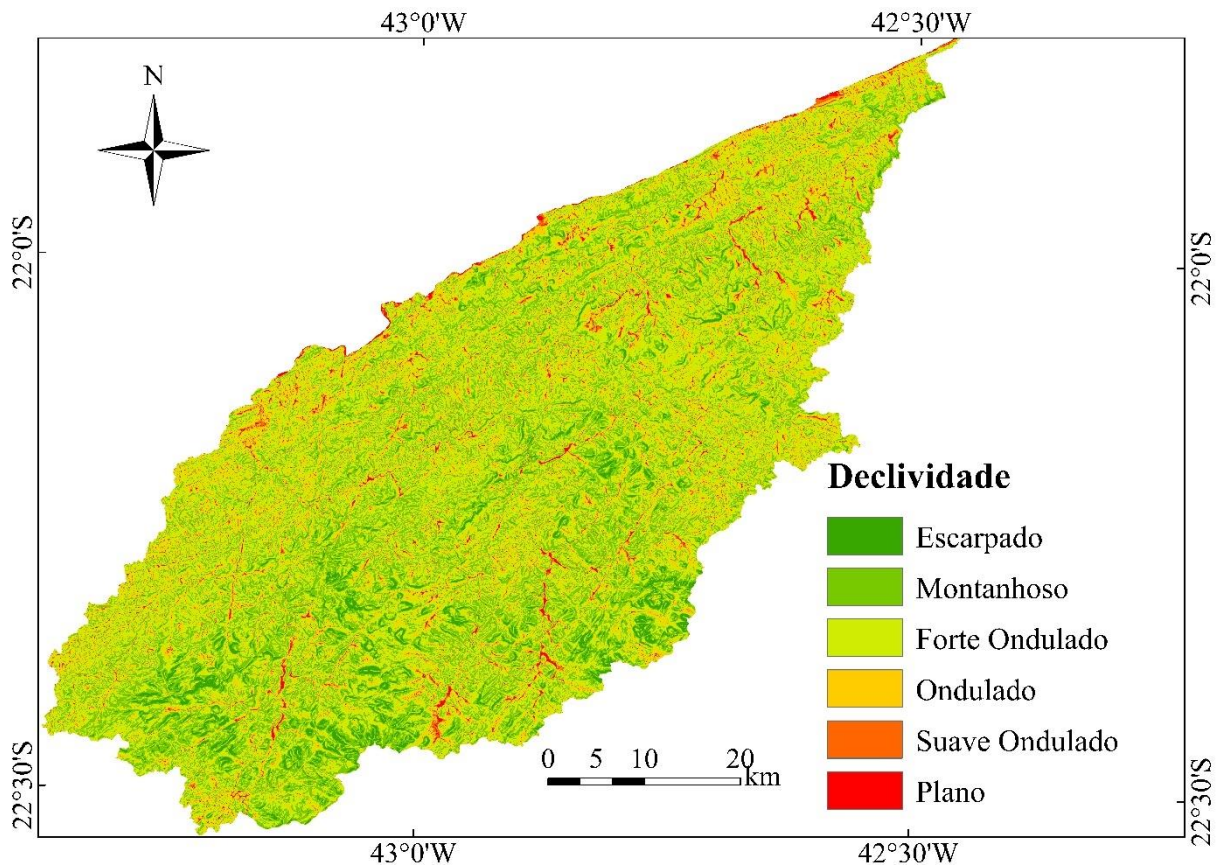


Figura 17. Mapa de Declividade da área de estudos. Predominam os terrenos escarpados, montanhosos e fortemente ondulados. As áreas planas restringem-se a menos de 2% do total.

f) *Geologia simplificada*

Devido a diversidade litológica, o mapa temático geologia foisimplificado (Figura 18). As unidades compreenderam rochas graníticas que equivalem a granitos e granitóides (35%), rochas gnáissicas (64%) e, em áreas restritas, depósitos aluvionares (1%). Os granitos estão localizados na porção central da RH-IV, em terrenos mais altos, enquanto os gnaisses estão localizados principalmente nas porções noroeste e nordeste.

Autores como Sever (1964) e Brito et al (2019) afirmam que o gnaisse é considerado o melhor litotipo, dentre as rochas cristalinas, quanto ao potencial para água subterrânea. A suíte Serra dos Órgãos, aquífero cristalino intensamente explorado na área, apesar de inserido na categoria granito e, portanto, considerado um litotipo pouco relevante para exploração das águas subterrâneas possui intensa influência rúptil mesozóico-cenozóica (HARTWIG & RICCOMINI, 2010), que ocasionou uma diversidade de lineamentos tornando-o um dos principais sistemas aquíferos explorados na RH-IV.

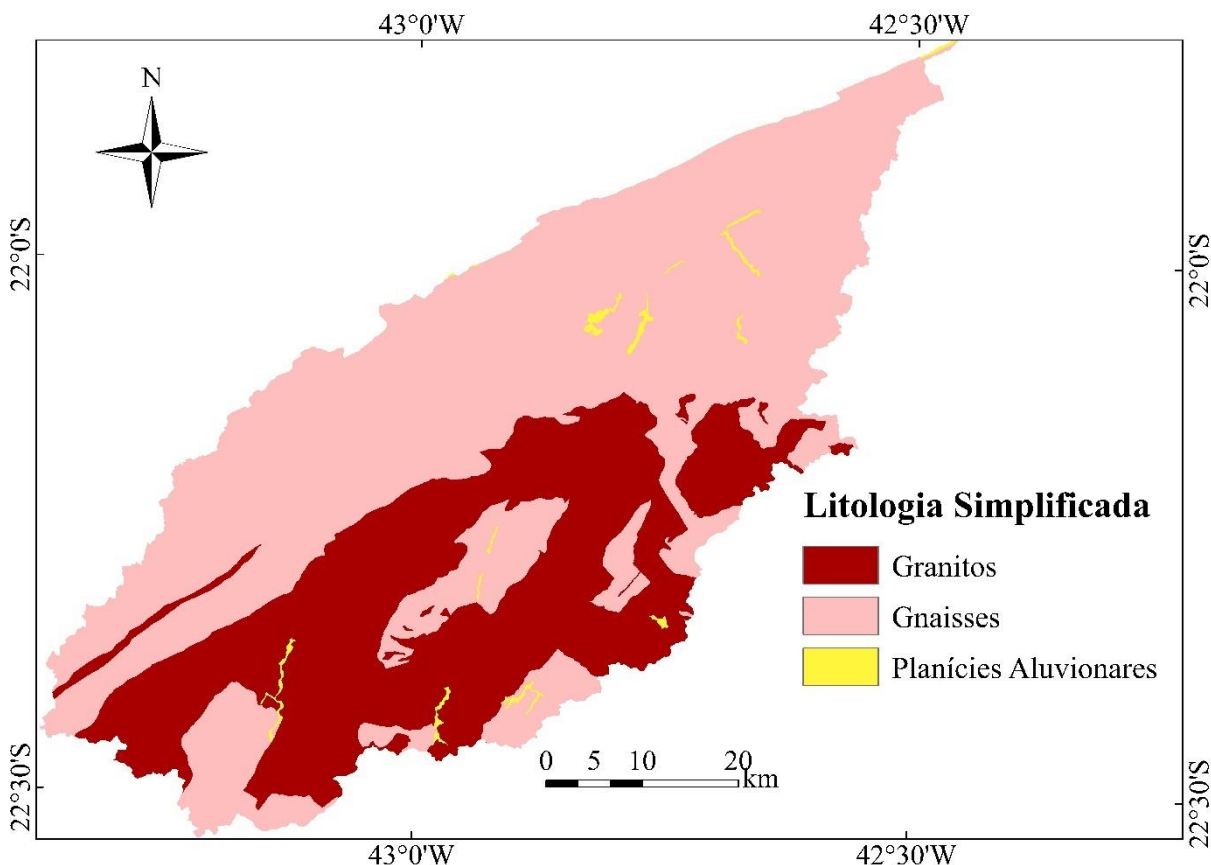


Figura 18. Mapa Litológico simplificado da área de estudos. Predominam rochas gnáissicas na porção norte e graníticas na porção sul. Minoritariamente, observa-se planícies aluvionares ao longo da área, sendo essas litologias as mais favoráveis à infiltração de água.

g) *Precipitação*

Foram categorizados 3 intervalos para os índices pluviométricas, sendo a categoria precipitação baixa de 1055 a 1400 mm, que ocorre de noroeste a nordeste da RH-IV (Figura 19), precipitação média para intervalos de 1400 a 1800 mm que acontece na região central da área de estudo e altos índices de precipitação que variam de 1800 até 2976 mm, com ocorrências que vão do extremo sudeste até o extremo sudoeste.

Para a RH-IV, as áreas com maior aporte pluviométrico corresponderam às regiões da Serra dos Órgãos, nos municípios de Petrópolis e Teresópolis, com altitudes que podem alcançar 2300 metros. Já para a porção central e noroeste, em que predominam menores altitudes e relevos menos acidentados, a média pluviométrica é reduzida, a exemplo do município de São José do Vale do Rio Preto, que possui relevantes eventos escassez hídrica.

Considerando que precipitação é a principal fonte de recarga das águas subterrâneas (SHEKHAR & PANDEY, 2015), essa variável é também um importante diferencial no cálculo da potencialidade da água subterrânea na RH-IV.

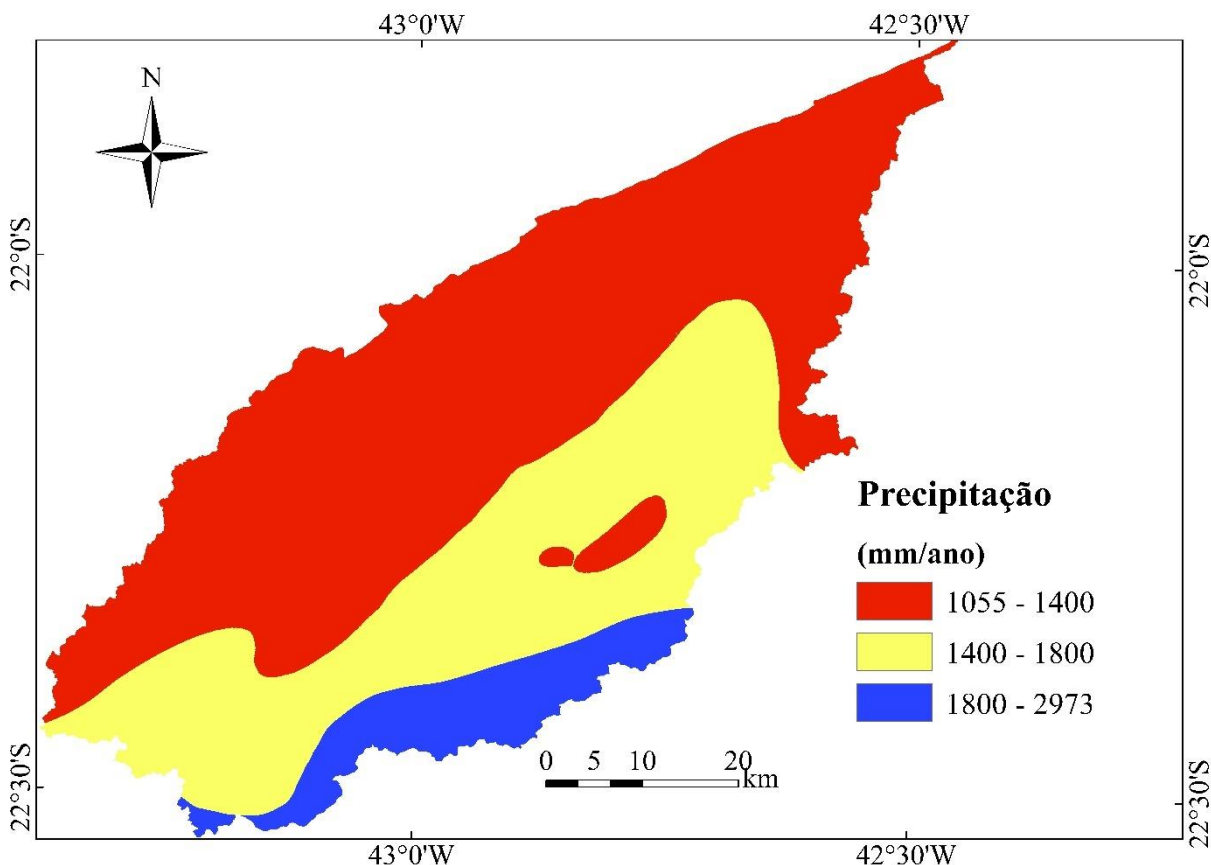


Figura 19. Mapa de precipitação pluviométrica da área de estudos. Os maiores valores ocorrem na porção sul, que coincide com a Serra dos Órgãos; decrescendo em direção ao norte, onde as perspectivas hidrogeológicas são menores devido à baixa precipitação.

4.1.1 Zonas Potenciais Para Aproveitamento de Água Subterrânea

Baseando-se na análise, integração e hierarquização dos mapas temáticos foram estimadas as zonas potenciais para águas subterrâneas, sendo os níveis classificados como: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto (Figura 20). Os valores foram classificados em intervalos diferentes, como mostra a Tabela 10, usando o método de classificação de quebras naturais *Jenks* no *ArcGIS*, conforme feito anteriormente por Shekhar & Pandey (2015) e Anduaem & Demeke (2019).

Tabela 10. Zonas potenciais para água subterrânea na área de estudos.

Potencial	Intervalo	Área km ²	Área Classes %
Muito Baixo	1,22 – 2,48	222,52	6,46%
Baixo	2,49 – 3,01	578,60	16,80%
Moderada	3,02 – 3,43	1001,79	29,09%
Alta	3,44 – 3,83	1101,32	31,98%
Muito Alta	3,84 – 4,93	539,26	15,66%

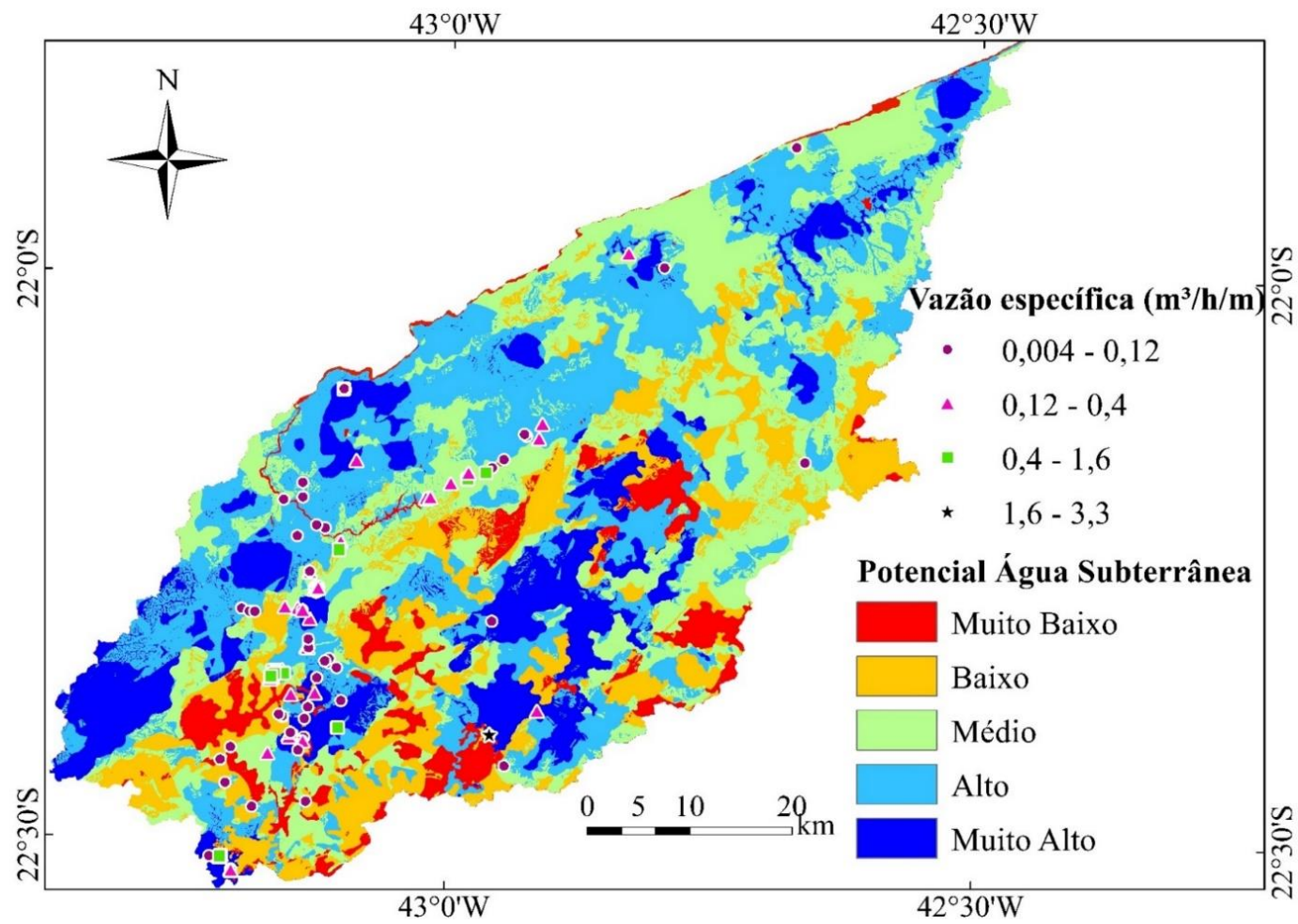


Figura 20. Zonas potenciais para água subterrânea na Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV) e classes de valores de vazão específica para 135 poços.

A área foi considerada com uma produtividade relevante para água subterrânea, tendo altas potencialidades em mais de 48% da RH-IV. Chama a atenção uma distribuição diversificada das melhores potencialidades para a região, sendo mais relevantes no extremo nordeste, centro-sul e sudoeste da região. Os municípios com maiores potenciais compreenderam Teresópolis, Paty do Alferes, Paraíba do Sul, Três Rios e Carmo. As cidades com relevantes restrições para água subterrânea compreenderam São José do Vale do Rio Preto, Sumidouro e grande parte do território de Petrópolis.

As áreas de aluvião, no extremo nordeste da RH-IV (Carmo), apontaram um potencial alto ou muito alto, confirmando a importância dos depósitos aluvionares nas produtividades dos restritos aquífero granulares.

As áreas ocupadas por granitos apresentaram potencial heterogêneo para água subterrânea, variando de muito baixo (Petrópolis) a muito alto como no município de Teresópolis. O município de Teresópolis conta com grande parcela de Latossolos recobrando seu território, relevante densidade de lineamentos e altas taxas de precipitação. No caso de Petrópolis, apesar dos altos índices de precipitação, os baixos valores para o potencial estariam subordinados aos frequentes afloramentos de rochas, solos pouco relevantes para infiltração como Neossolos Litólicos e Cambissolos mais relevantes para o escoamento superficial.

Percebe-se ainda que as áreas compostas por rochas gnáissicas com coberturas de Latossolos e Argissolos apresentaram maior homogeneidade quanto ao potencial, que se mostraram principalmente como alto e muito alto. Esses fatores associados aos relevos morros e colinas dos municípios Três Rios, Paraíba do Sul e Paty do Alferes, constituíram feições favoráveis ao acúmulo de água subterrânea. Já essa mesma morfologia recoberta por Cambissolos Háplicos tende a apresentar baixo a moderado potencial para água subterrânea, como a porção sul do município de Sumidouro.

Adicionalmente aos altos potenciais dos municípios de Três Rios e Paty do Alferes destacam-se as altas densidades de lineamentos. Importante lembrar que por Três Rios passa o leito do Rio Paraíba Sul, principal corpo hídrico que recebe a descarga das águas subterrâneas na área de estudo. Sendo, portanto, relevante para água subterrânea a feição estrutural da Zona de Cisalhamento Paraíba do Sul (ZCPS). Pontualmente, também foram observadas pequenas áreas com alto potencial para água subterrânea com altas densidades de lineamentos estruturais a nordeste na área de estudos.

No Rio de Janeiro, os aquíferos fraturados normalmente estão subordinados a eventos geotectônicos relacionados à Orogênese Brasileira, abordados em trabalhos como de Delgado et al. (2003) e Heilbron et al. (2004); e da Reativação Tectônica Jurássica resultante abertura do oceano Atlântico (ALMEIDA, 1976; RICCOMINI 1989; ZALÁN & OLIVEIRA, 2005).

Os centros urbanos dos municípios corresponderam majoritariamente a áreas de potencial baixo ou muito baixo, já que a infiltração fica prejudicada pela frequente impermeabilização do terreno

4.1.2 Validação dos Resultados do Zoneamento

A validação do zoneamento para água subterrânea foi realizado a partir de dados de capacidades específicas para 135 poços (Figura 20 e 21), tendo em vista a importância desse parâmetro no monitoramento de poços. A capacidade (ou vazão) específica de um poço é obtida pela divisão simples entre a vazão extraída e o rebaixamento produzido, e é expressa pela unidade $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$. As profundidades de captação variaram de 3 a 12 metros para poços instalados em sedimentos e perfurações de 8 a 300 metros para poços instalados nos aquíferos fraturados.

Os dados de capacidade específica foram classificados, em termos de produtividade, de acordo com o Mapa Hidrogeológico da Região Sudeste (IBGE, 2016) que define como produtividade muito fraca (valores menores que $0,12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), produtividade fraca (valores entre $0,12$ e $0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), produtividade moderada (valores entre $0,4$ e $1,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), produtividade elevada (valores entre $1,6$ e $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) e produtividade muito elevada (valores acima de $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$). A maioria dos poços analisados na RH-IV consiste em poços pouco produtivos, com valores de capacidade específica inferiores a $0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Figura 21), representando 90% do número total. Vale ressaltar que a capacidade de produção para um poço de exploração de água subterrânea não é dependente apenas das características dos aquíferos, mas também das condições de perfuração e revestimento dos poços tubulares.

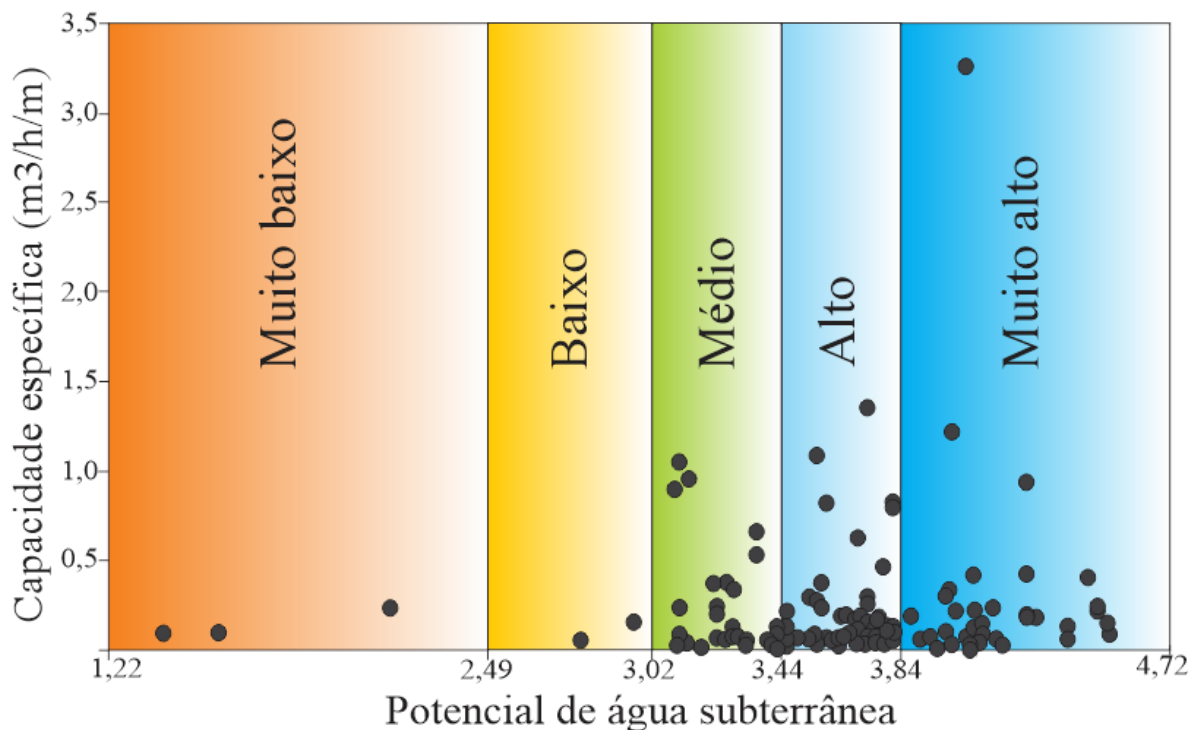


Figura 21. Dispersão dos dados apresentando a correlação entre valores de capacidade específica de 135 poços tubulares e classes potenciais para ocorrência de água subterrânea na Região Hidrográfica do Piabanha.

Quanto aos maiores valores de vazão específica por zona potencial de água subterrânea, foi verificado que para a zona de potencial muito baixa a maior vazão foi de 0,24 m³/h/m. Para zona potencial baixa foram identificados apenas dois poços, sendo o maior valor de vazão específica de 0,15 m³/h/m. As classes de potencial muito baixa e baixa englobaram apenas 5 dos 135 poços usados para a validação e seus valores de capacidade específica não ultrapassaram o valor de produtividade fraca (0,4 m³/h/m). Quanto ao potencial moderado foram identificados 35 poços e a vazão máxima foi de 1,05 m³/h/m, estando dentro do limite de produtividade moderada. Estão sobre as áreas de zona potencial alta 51 poços, com um limite máximo de vazão de 1,35 m³/h/m e para a zona potencial mais alta foram identificados 41 poços, sendo que a maior vazão específica identificada que foi de 3,26 m³/h/m, ambas classes de poços inseridas do padrão de produtividade elevada. Não foram identificados poços de produção muito elevada, fato esperado em se tratando de um ambiente majoritariamente fraturado.

Importante destacar que classes de potencial alta e muito alta englobaram 68% dos poços com dados de vazões específicas verificadas na RH-IV, abrangendo os poços mais produtivos e indicando que o volume de poços explorados, a hierarquia dos critérios utilizada e as tendências observadas na modelagem condizem com a realidade.

4.3 Unidades Hidroestratigráficas Exploradas

Foram caracterizadas 10 unidades hidroestratigráficas exploradas para águas subterrâneas com disponibilidade de dados de vazão, nível d'água e compostos iônicos, a partir de 117 poços que integram o cadastro de outorga do INEA e 43 poços pertencentes ao cadastro do SIAGAS/CPRM.

A unidade Rio Negro é formada por rochas migmatíticas pertencente ao Terreno Oriental, e têm origem, segundo TUPINAMBÁ et al. (1996), em um conjunto de quatro rochas ortoderivadas (diorito, tonalito, leucogranito e gnaiss porfiroide), apresentando também numerosos corpos metabásicos, de composição gabroica e diorítica. Foram observados 37 poços identificados nesta unidade, sendo 7,7 metros seu nível d'água médio, com mediana de 4,45 metros. A vazão média obtida foi 5,9 m³/h, sendo os valores mínimo e máximo, 0,5 e 18 m³/h, respectivamente. A mediana da vazão foi 4,9 m³/h. Há presença dos íons nitrato, ferro e manganês além dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420 (CONAMA, 2009). Foram observados poços com valores de urânio superiores a 30 µg/L⁻¹ (Godoy et al. 2019), limite estabelecido para consumo humano pela Resolução nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), em terrenos onde afloram essa unidade aquífera. Segundo GOMES (2013), existem fortes evidências de que o urânio natural seja nefrotóxico, ou seja, cause danos aos rins em seres humanos a partir de ingestão de águas de poços contaminados. Além do mais, rochas contendo o urânio natural apresentam também níveis de rádio, que acometem, principalmente, a estrutura óssea.

A unidade Serra dos Órgãos corresponde a granodioritos e granitos grossos equigranulares (levemente porfíricos) com biotita e hornblenda (HEILBRON et al., 2013). As rochas mostram foliação fraca concordante com a foliação principal regional das encaixantes. Há 65 poços identificados na unidade Serra dos Órgãos, revelando um nível

d'água médio de 20,3 metros, com mediana de 4,5 metros. A vazão média obtida foi 8,7 m³/h, com valores mínimo e máximo, 0,2 e 50 m³/h, respectivamente. A mediana da vazão foi 4,5 m³/h. Há presença de nitrato, cádmio e manganês, além dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420. Além disso, Godoy et al. (2019) analisou a água de um poço no distrito de Nogueira, em Petrópolis, com teor de urânio de 640 µg/L em terreno onde a unidade Serra dos Órgãos apresenta-se na superfície, além de valores relevantes dos radionuclídeos Rn²²⁶ e Rn²²⁸.

Os Depósitos Aluvionares de antigos terraços observados ao longo do Rio Paraíba do Sul estão eventualmente sobrepostos às demais unidades descritas. Alguns, mais recentes, constituem depósitos de margens, fundos de canal, barras arenosas e planícies de inundação de rios e cascalheiras, constituindo importantes jazidas de argila e areia (HEILBRON et al., 2016). Apesar da ausência de poços outorgados nesta unidade, Godoy et al. (2019) descreveu um poço localizado em uma quinta de cavalos na cidade de Teresópolis cujo teor de urânio chegou a 270 µg/L, nove vezes maior que o limite estabelecido. Acredita-se que esse poço também receba contribuições de águas do aquífero fraturado, de onde se originaria os altos valores de urânio.

Na unidade Cordeiro predomina o gnaiss granitoide leucocrático, de granulometria média a grossa, com foliação marcada pela orientação de biotita (HEILBRON et al., 2016). Podem ocorrer intrusões dos granitoides da unidade Serra dos Órgãos. Há 5 poços outorgados na unidade Cordeiro, revelando um nível d'água médio de 6,54 metros, com mediana de 3,64 metros. A vazão média obtida foi 2,31 m³/h, com valores mínimo e máximo, 0,52 e 7,2 m³/h, respectivamente. A mediana da vazão foi 1,5 m³/h. Há presença de fluoreto, alumínio e ferro além dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 420 (CONAMA, 2009).

A unidade Arcádia-Areal trata-se de uma sucessão de gnaisses bandados frequentemente milonitizados, com intercalações de quartzitos e rochas calcissilicáticas, sobrepostos às rochas do Complexo Rio Negro (HEILBRON et al., 2016). Foram observados 30 poços outorgados nesta unidade, sendo 7,5 metros seu nível d'água médio, com mediana de 5,98 metros. A vazão média obtida foi 4,35 m³/h, sendo os valores mínimo e máximo, 0,4 e 11 m³/h, respectivamente. A mediana da vazão foi 4,12 m³/h. Há presença de ferro e manganês além dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 420 (CONAMA, 2009).

A unidade Conservatória que corresponde a biotita gnaisses bandados e gnaisses pelíticos milonitizados, normalmente intercalados tectonicamente com os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora (HEILBRON et al., 2016). Há 7 poços outorgados nesta unidade, revelando um nível d'água médio de 34,31 metros, com mediana de 31 metros. A vazão média obtida foi 6,4 m³/h, com valores mínimo e máximo, 1,63 e 14 m³/h, respectivamente. A mediana da vazão foi 4,9 m³/h.

A unidade Paraíba do Sul corresponde a metassedimentos, sendo estes, principalmente, biotita gnaisses bandados, por vezes contendo sillimanita, com intercalações de mármore, quartzitos e anfibolitos (EIRADO et al., 2006). Foram observados 3 poços outorgados, sendo 6,6 metros seu nível d'água médio, com mediana de 4,73 metros. A vazão média obtida foi 6,2 m³/h, sendo os valores mínimo e máximo, 5 e 7 m³/h, respectivamente. A mediana da vazão foi 6,6 m³/h.

A unidade Juiz de Fora é composta por ortognaisses e metabasitos em fácies granulito (DUARTE, 1998). Há 2 poços outorgados na unidade Juiz de Fora, revelando valor médio e mediano do nível d'água em 30,7 metros. A vazão média foi 1,4 m³/h, com valores mínimo e máximo, 1,1 e 1,7 m³/h, respectivamente. Há presença do íon ferro além dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420 (CONAMA, 2009).

A unidade Graminha que é formada por hornblenda-biotita gnaisses com enclaves anfibolíticos (Dios, 1995). Nessa unidade há apenas um poço, cuja vazão mediu 0,57 m³/h e não foram observados valores anômalos para parâmetros químicos.

A unidade Quirino que é representado por biotita-hornblenda gnaisses de composição tonalítica a granítica e enclaves de rochas máficas e ultramáficas (HEILBRON et al., 2016). Para essa unidade não foram observados poços subterrâneos outorgados nos órgãos ambientais competentes. No entanto, Godoy et al. (2019) descreveram dois poços instalados em terrenos onde a unidade Quirino aflora, que apresentaram 52 e 390 µg/L de urânio na água, caracterizando situação anômala para este elemento.

As análises dos poços desta pesquisa corroboram os resultados obtidos por ALBUQUERQUE (2019) sendo a unidade aquífera Serra dos Órgãos a mais explorada na região, com maior número de captações subterrâneas. A finalidade desses recursos hídricos corresponde a uso industrial e consumo humano, além de captações insignificantes (aquelas cujas vazões não superam 5m³/dia).

A unidade Rio Negro apresenta o segundo maior número de poços e destaca-se pela quantidade de captações de uso insignificante, principalmente na área urbana de Petrópolis. Vale ressaltar também a importância desta unidade aquífera para o abastecimento do setor industrial da RH-IV.

Nas demais litoestratigrafias referentes à Suíte Rio Turvo, Domínio Costeiro, Raposo, Anta, Serra da Bolívia, Granito Andorinha, Frade, Nova Friburgo, Teresópolis e Conselheiro Paulino não foram identificados poços de exploração de água subterrânea, que fundamentassem a caracterização de unidades hidroestratigráficas, tendo em vista os dados secundários analisados.

4.4 Análise e Evolução Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas

4.4.1 Parâmetros Físico-Químicos

Quanto aos parâmetros físico-químicos pré-existentes, têm-se que a temperatura oscilou entre 14 e 27,6°C e o pH entre 5,2 a 8,2 para as águas subterrâneas. A condutividade elétrica nas águas dos poços variou de 14,5 a 986 µS/cm, uma amplitude relevante, quanto mais em aquíferos predominantemente fraturados. Não foram identificadas relações entre temperatura, pH, condutividade, profundidade dos poços e níveis estáticos ou dinâmicos.

Para as unidades Serra dos Órgãos, Arcádia-Areal e Juiz de Fora predominam águas com pH acima de 7,0 e inferiores a 8,0. Para as unidades Rio Negro, Cordeiro, Paraíba do Sul e Conservatória predominam águas pouco ácidas, superiores a 6,0 e inferiores a 7,0. Os valores do pH estão dentro das expectativas para águas subterrâneas (FEITOSA et al., 2008).

A condutividade elétrica (CE) é um parâmetro que permite estimar a quantidade de sais presentes na água subterrânea. Rochas com litologias ígneas e metamórficas como as que predominam na RH-IV tendem a fornecer poucos componentes iônicos ao meio aquífero (SILVA et al., 2003) e, portanto, valores baixos de condutividade. Para a RH-IV o valor médio de CE encontrado foi 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a maioria dos valores são inferiores a 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 22). Reginato et al. (2012) identificaram uma condutividade elétrica média de 138 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o aquífero fraturado da Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul, sendo o valor máximo encontrado de 253 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cavalcante et al. (1998), para aquíferos fraturados na região de Atibaia (SP) identificaram valores de condutividade elétrica que não ultrapassaram 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Valores superiores a 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, poucos comuns para aquíferos fraturados, foram encontrados em 8% das amostras da RH-IV, uma região hidrográfica interiorana, sem influência direta de ambiente marinho. Tal fato foi aprofundado, tendo em vista possibilidade de salinização por influência antrópica.

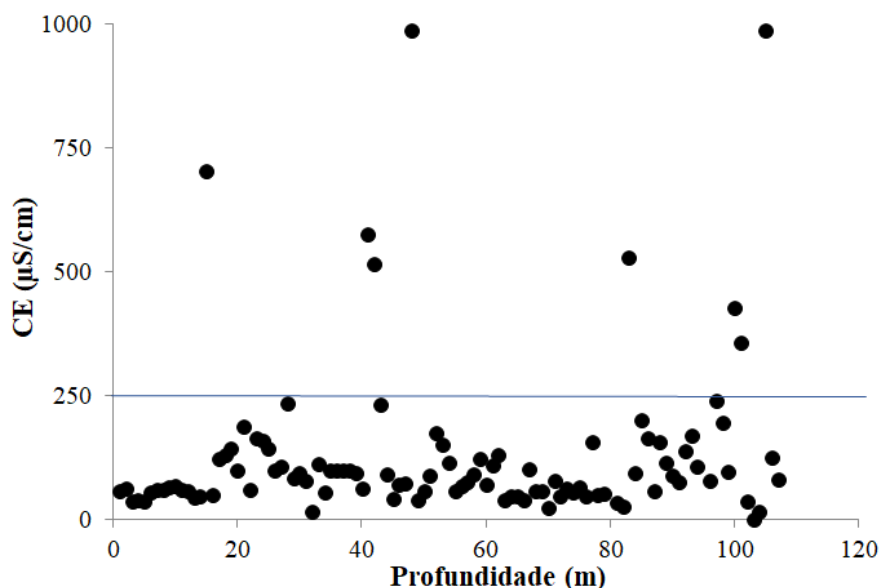


Figura 22. Profundidade dos Poços versus Condutividade Elétrica para a Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV), RJ.

Quanto a dureza, de acordo com a Portaria N° 888/21 (BRASIL, 2021), o limite de dureza para águas destinadas ao consumo humano é de 500 mg/L. Nenhuma unidade apresentou valores superiores a este limite, apresentando, majoritariamente águas moles (até 50 mg/L). Cerca de 18 amostras foram classificadas como águas moderadamente duras (entre 50 e 150 mg/L), concentradas nas unidades Arcádia Areal (8 poços) e Serra dos Órgãos (6 poços), além de 2 poços na unidade Rio Negro, um poço na unidade Conservatória e um poço na unidade Juiz de Fora.

4.4.2 Análise dos Constituintes

Em relação aos cátions principais, não há concentrações relevantes para potabilidade dos cátions Ca^{2+} e K^{+} para nenhuma unidade aquífera. Quanto ao sódio (Na^{+}), também não

apresentou valores acima do esperado para consumo de águas subterrâneas. Em relação ao magnésio (Mg^{+2}), esse íon variou de 0,04 a 33,3 mg/L, estando dentro dos valores para águas subterrâneas. Nenhum poço apresentou concentração de cloreto superior a 250 mg L⁻¹, que corresponde ao limite de potabilidade estabelecido pela Portaria 888/21 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), muito embora dois poços da unidade Serra dos Órgãos tenham apresentado valores discrepantes de 67,9 e 87,1 mg/L. Os poços correspondem a um empreendimento imobiliário e um matadouro que poderiam estar sob influência antrópica. Os cloretos são altamente solúveis, muito estáveis e dificilmente se precipitam. De acordo com SILVA & MIGLIORINI (2014), há um aumento gradativo do teor dos cloretos em direção as áreas de descarga, causado pela alta solubilidade e o lento movimento das águas subterrâneas. Quanto ao sulfato, CELLIGOI (1999) explica que para águas subterrâneas circulantes em rochas ígneas, a concentração de sulfato é baixa (< 30 mg/L). De fato, a maioria dos valores de sulfato na RH-IV apresentou baixas concentrações, mas 3 poços na unidade Serra dos Órgãos (Petrópolis) e 1 poço na unidade Arcádia Areal (São José do Vale do Rio Preto) apresentaram valores acima de 30 mg/L. Para a legislação brasileira, é preciso que a água tenha teor de sulfato menor que 250 mg/L para ser considerada potável (BRASIL, 2004).

4.4.3 Classificação Hidroquímica

A análise a partir do diagrama trilinear de Piper foi realizada com 42 amostras que estavam adequadas ao balanço iônico. A partir dessas amostras, foi possível identificar 6 tipos de água na área de estudos, sendo predominante as águas bicarbonatadas cálcicas (48%), seguida de bicarbonatadas sódicas (29%). Águas bicarbonatadas magnesianas (10%) e cloretadas sódicas (10%), além de bicarbonatada mista (2%) e sulfatada magnesiana (2%) que também foram encontradas.

No Aquífero Serra dos Órgãos predominaram águas bicarbonatadas cálcicas (8 amostras), seguida de bicarbonatadas sódicas (5 amostras), uma amostra de bicarbonatada mista e outra bicarbonatada magnesiana. No Aquífero Rio Negro foi evidenciado águas bicarbonatadas cálcicas (7 poços) e bicarbonatadas sódicas (também 7 poços), além de 3 poços com cloretadas sódicas e um com bicarbonatada magnesiana (Figura 23)

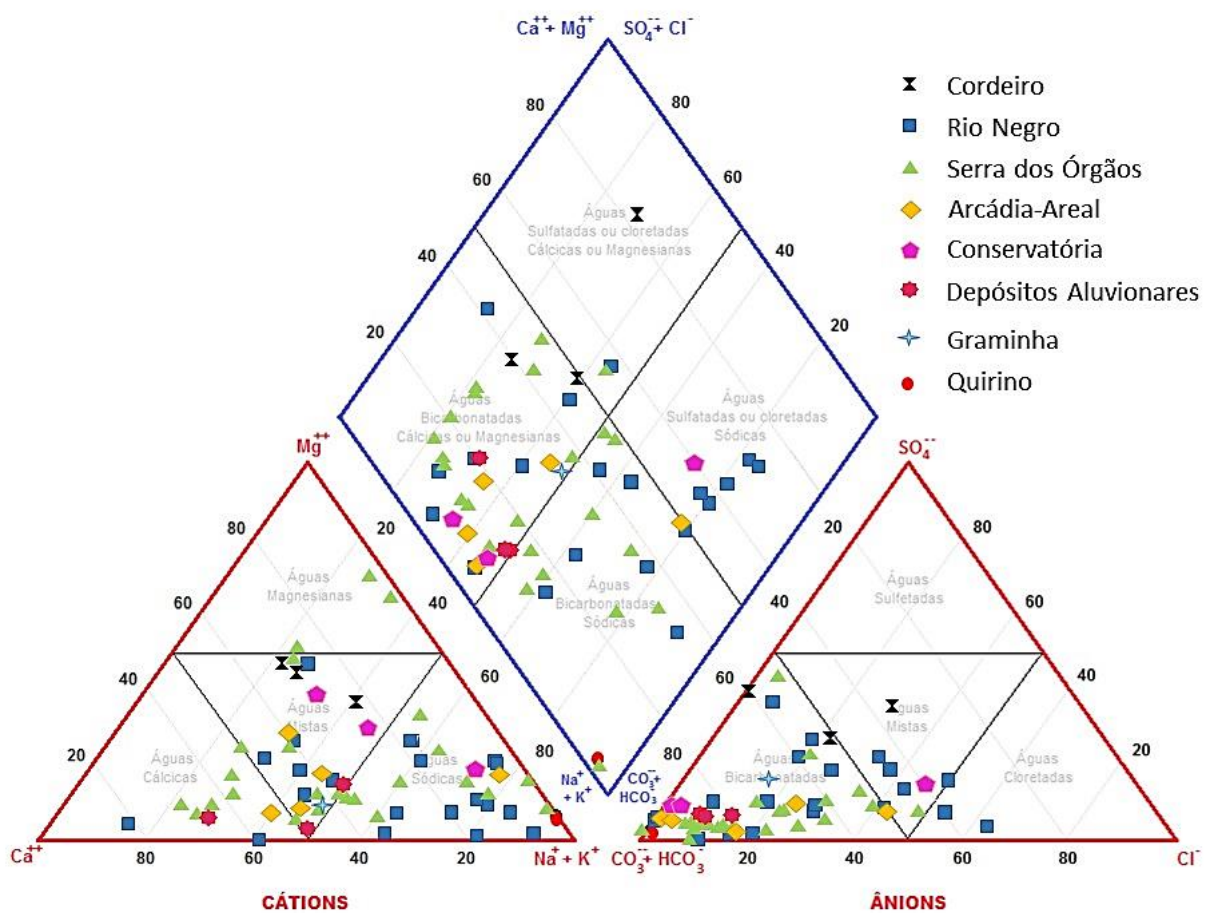


Figura 23. Diagrama de Piper para Classificação Hidroquímica das Unidades Hidroestratigráficas mapeadas.

Na unidade aquífera Arcádia-Areal foram observadas somente águas bicarbonatadas cálcicas (3 poços). No Aquífero Cordeiro temos uma amostra de bicarbonatada magnesianas e outra de sulfatada magnesianas. Na unidade Conservatória há um poço com água bicarbonatada sódica, um com cloretada sódica e outra bicarbonatada magnesianas. A única amostra no aquífero Graminha habilitada para esse tipo de análise foi caracterizada como bicarbonatada cálcica.

A partir de 26 amostras que possuíam datas de coletas foi possível identificar que na época de chuva (novembro a março) prevaleceram as tipologias de águas bicarbonatadas cálcicas (5 poços) e bicarbonatadas sódicas (5 poços), já na estação seca (maio a agosto) as predominâncias foram para águas bicarbonatadas sódicas (5 poços) e cloretadas sódicas (3 poços). Considerando os dados de condutividades elétricas, já discutidos, e a análise sazonal da tipologia das águas, acentua uma tendência de maior incremento de sais nas águas subterrâneas para a RH-IV em épocas de seca, fato que merece ser aprofundado.

Visando compreender ainda mais a questão hidroquímica dos aquíferos fraturados, a figura 24 apresenta um mapa com diagramas de Stiffs, a partir de amostras que apresentaram

um balanço iônico satisfatório. Para a referida análise, a área foi dividida em zonas de hidroquímicas distintas (A1, A2, A3, A4).

Zona A1: Nessa zona, inserida no município de Petrópolis, encontram-se 16 poços (Figura 24) com predominância de águas bicarbonatadas sódicas em relação às bicarbonatadas cálcicas. Trata-se de uma área de aproximadamente 100 Km², urbanizada, onde prevalecem as rochas metamórficas do Complexo Rio Negro (ortognaisses). Em relação à fisiografia, trata-se de uma zona onde as altimetrias variam de 691 a 912 metros. Essa área está localizada em uma zona de recarga da RH-IV e possui predominância de águas bicarbonatadas sódicas em detrimento as bicarbonatadas cálcicas, que seriam mais comuns em áreas de recarga de regiões fraturadas, fato que pode ser um alerta para influência antrópica nessas águas. O conjunto de poços apresentados nessa área (~100km²) exploram vazões $\geq 75\text{m}^3/\text{h}$ ($\geq 0,75\text{m}^3/\text{h}/\text{km}^2$). Para esses poços, a condutividade elétrica variou entre 38 e 156 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dentro, portanto, das expectativas de CE para aquíferos fraturados. A maioria das coletas realizadas nessa área foi em época de seca, fato que também poderia justificar a predominância de águas bicarbonatadas sódicas. Os poços são utilizados para empreendimentos como: pedreira, condomínios, empresa alimentícia e empresa eletromecânica.

Zona A2: Para essa zona, também inserida no município de Petrópolis, foram analisados 13 poços (Figura 24), onde predominam águas bicarbonatadas cálcicas (7 poços) em relação as bicarbonatadas sódicas (5 poços). Trata-se de uma área de aproximadamente 125 Km², menos urbanizada que a A1, onde prevalecem rochas ígneas da Suíte Serra dos Órgãos formada por granodioritos e granitos. Em relação à fisiografia, o intervalo de altimetria varia entre 452 a 912 metros. Nessa área (~125km²), o grupo de poços na Figura 18 exploram vazões $\geq 74\text{m}^3/\text{h}$ ($\geq 0,59\text{m}^3/\text{h}/\text{km}^2$). A condutividade elétrica variou entre 57 e 986 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com média de 181 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nessa zona encontra-se o poço com o maior valor de CE (986 $\mu\text{S}/\text{cm}$) verificado para todos os aquíferos fraturados da região. Através do mapa preliminar de fluxo foi possível perceber uma diminuição relevante da carga hidráulica (rebaixamento) nessa zona, que ocasionam implicações relevantes nas características hidrodinâmicas e provavelmente hidroquímicas do aquífero Serra dos Órgãos, para a área em questão. Existem poucos poços com datas de coleta, fato que não permitiu estimar os períodos predominantes de amostragens. Os poços são utilizados por empresas de cerveja (8) e condomínios de sítios.

A zona A3, nos arredores de Areal, é formada por 7 poços, numa área de contato entre Complexo Graminha (hornblenda-biotita gnaisses), Arcádia Areal (granada-biotita-gnaiss com rochas calcicicláticas), além do Complexo Rio Negro (ortognaisses). A área de abrangência dos poços é de aproximadamente 75 Km² onde predominam águas bicarbonatadas cálcicas (Figura 24). A altimetria está no intervalo de 452 a 691 metros. Nessa área (~75km²), o conjunto de poços apresentados exploram vazões $\geq 24\text{m}^3/\text{h}$ ($\geq 0,32\text{m}^3/\text{h}/\text{km}^2$). A condutividade elétrica variou entre 70 e 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com média de 123 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os poços são utilizados predominantemente por condomínios.

Zona A4: para a área próxima a Três Rios, os poços instalados na Unidade Conservatória correspondente a gnaisses intercalados tectonicamente com os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora apresentaram águas bicarbonatadas sódicas, em altimetrias entre

72 e 452 metros, compreendendo uma área aproximada de 50 Km², onde um grupo de 3 poços exploram vazões $\geq 12\text{m}^3/\text{h}$ ($\geq 0,32\text{m}^3/\text{h}/\text{km}^2$). A condutividade elétrica variou entre 70 e 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com média de 123 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os poços são utilizados predominantemente por condomínios.

Apesar dos baixos valores de CE, as amostras do aquífero Cordeiro (poços 10 e 11) possuem valores relevantes de sulfato e magnésio, que as tornam distintas dos demais sistemas aquíferos em relação a esses íons maiores. As causas dos valores relevantes de sulfato e magnésio nessa região merecem ser aprofundados. De acordo com o mapa de fluxo, são águas localizadas na zona de recarga, pertencentes a uma empresa da construção civil. Em se tratando de áreas de recarga, as relevâncias naturais de magnésio e sulfato deveriam ser menores, tendo em vista que normalmente a contribuição desses íons possui relação com maior tempo de residência nos aquíferos.

Ainda de acordo com a Figura 24, os poços 34 e 46 em Teresópolis apresentaram águas bicarbonatadas sódicas, com valores de condutividade de 111,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 92,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e são explorados por um sítio e uma empresa de lazer. As respectivas vazões identificadas foram 4,5 e 2,6 m^3/h .

Vale ressaltar que cada região possui mais poços que os referendados na análise de Stiff, que não foram abarcados nessa análise em virtude da inconsistência dos dados analíticos.

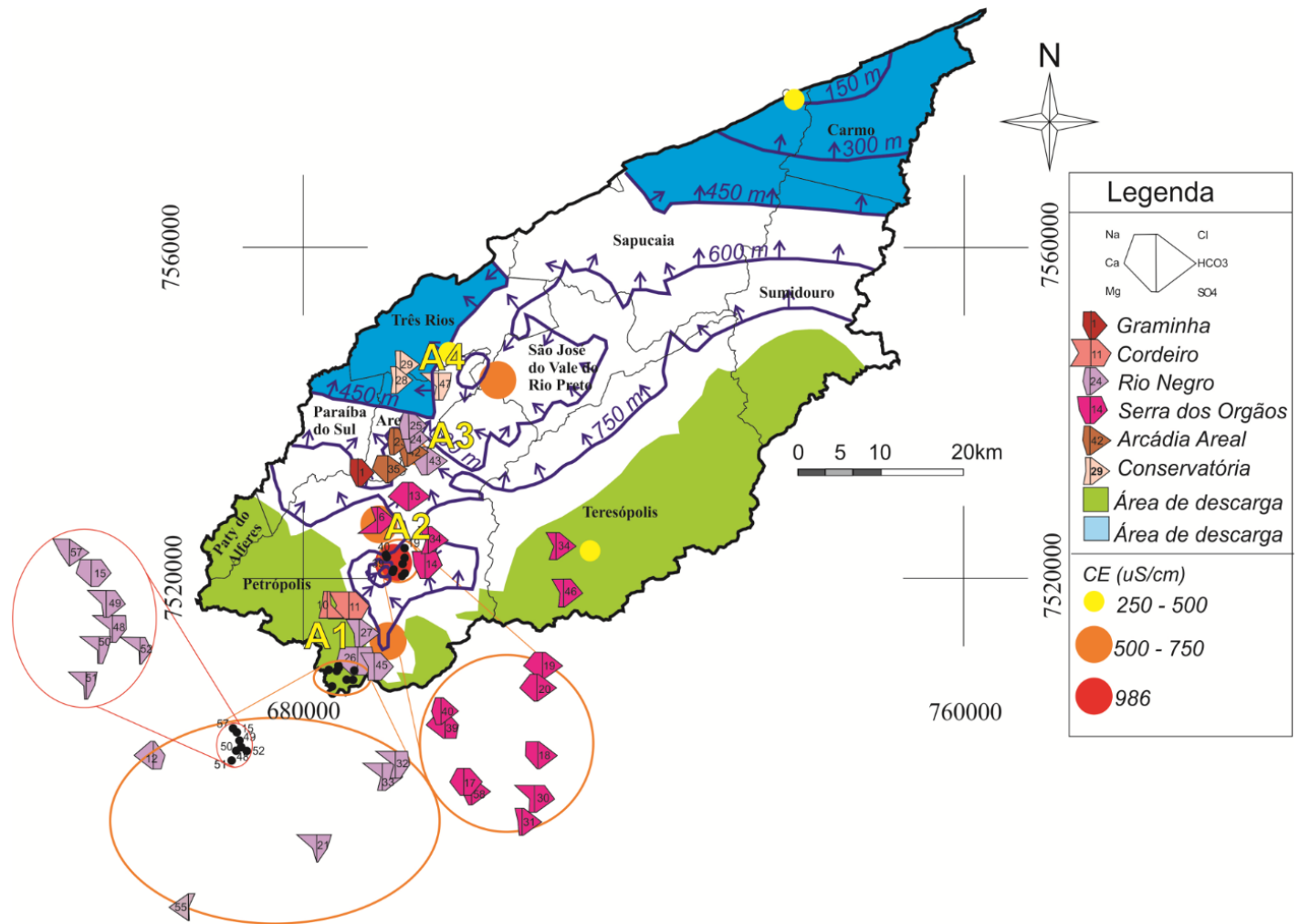


Figura 24. Diagramas de Stiff e delimitação de zonas hidroquímicas (A1, A2, A3, A4).

4.4.4 Razões Iônicas

O cálculo das razões iônicas constitui ferramenta útil para a interpretação hidrogeoquímica de águas subterrâneas e a origem de solutos. Para este estudo foram selecionadas as razões rMg/Ca e rSO_4/Cl , considerando 52 amostras em Areal, Petrópolis, Teresópolis e Três Rios.

Considerando a aptidão agrícola de toda a área, a rK/Na não foi aplicada, tendo em vista práticas de utilização de fertilizantes, como NPK e o padrão de comportamento geoquímico do potássio, que poderia dificultar essa interpretação. A rCl/HCO_3 é outra ferramenta utilizada na compreensão da concentração dos sais nas águas subterrâneas. Normalmente, para as águas subterrâneas numa mesma unidade territorial ambiental, os valores de HCO_3 são constantes, já que a principal fonte do HCO_3 é a água da chuva. Dessa forma, o aumento desse índice indicaria acúmulo de cloreto, que é um íon conservativo. Considerando que a principal fonte do HCO_3 é a água da chuva e que a RH-IV possui índices pluviométricos diversos, essa análise também não foi considerada nesta pesquisa. Outra questão que poderia mascarar a análise dessa razão se dá pelo fato de existirem lentes calcissilicáticas em diversas litologias da área de estudo, que também poderiam disponibilizar HCO_3 nas águas subterrâneas.

Também as interpretações das razões iônicas foram realizadas para amostras com CEs inferiores a $250 \mu S/cm$, tendo em vista a possibilidade de relevante influência antrópica em poços com maiores condutividades, fato que poderia mascarar as interpretações desse método, que prioriza uma análise da evolução hidroquímica natural dos aquíferos.

As representações da razão rMg/Ca (Figura 25) tratam de relações que tem como principal característica a troca de base com o material geológico (sistemas aquíferos), ao longo da trajetória da água subterrânea. Para a rMg/Ca , os valores para as águas continentais normalmente oscilam de 0,2 a 1,5 (HEM, 1985). Os valores acima de 5,0 podem ter maiores influências de atividades antrópicas, como o uso de fertilizantes e efluentes domésticos e industriais. O magnésio tende a se concentrar em águas subterrâneas nas áreas de descarga, enquanto o cálcio tende a se adsorver no material geológico ao longo da trajetória da água subterrânea. Desta forma, a água mais jovem normalmente possui menor rMg/Ca . Para a RH-IV, poços representantes do aquífero Rio Negro e Serra dos Órgãos (pontos 12, 15, 21, 27 e 57), na cidade de Petrópolis, integrantes da A1 (Figura 24) possuem as menores rMg/Ca , ratificando o modelo de circulação da água subterrânea que indica a área urbana de Petrópolis como uma das zonas de recargas da RH-IV. Quanto a poços com indicativos de maior residência das águas subterrâneas destacam-se os poços do aquífero Conservatória, com relevantes valores de CE e rMg/Ca . Esses poços encontram-se na cidade de Areal e Três Rios, que consiste numa zona de descarga, também apontada pelo mapa de fluxo.

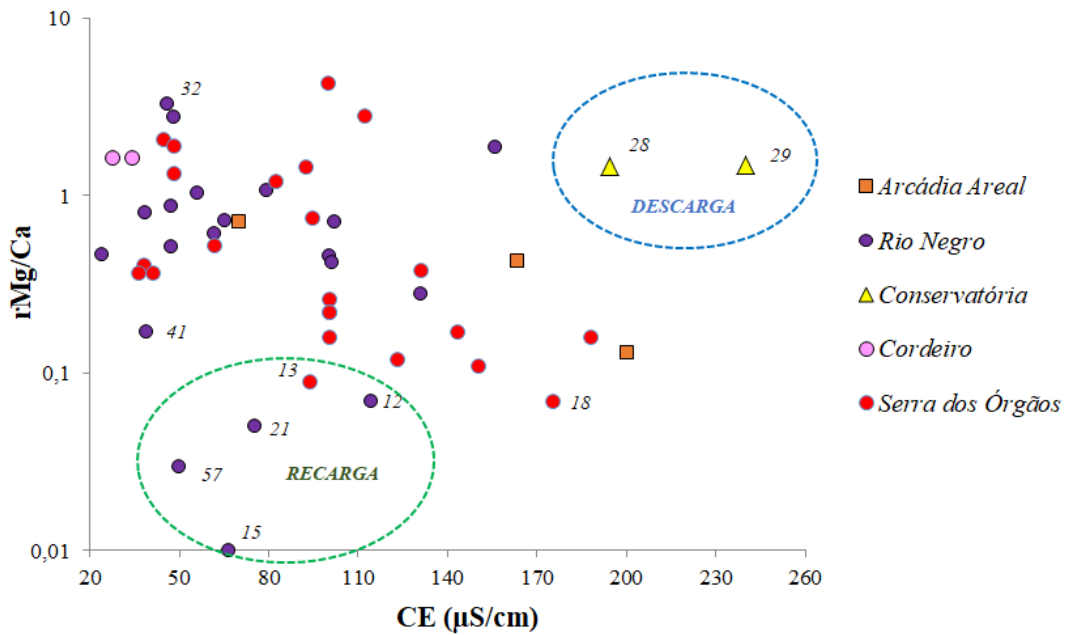


Figura 25. Gráfico rMg/Ca versus Condutividade Elétrica (CE) nas águas subterrâneas da Região Hidrográfica do Piabanha, RH-IV. Poços representantes do aquífero Rio Negro e Serra dos Órgãos (pontos 12, 15, 21, 27 e 57) possuem as menores rMg/Ca, o que indica a área urbana de Petrópolis como uma zona de recarga. Os poços do aquífero Conservatória (pontos 28 e 29), com altas rMg/Ca representam numa zona de descarga.

A rSO_4/Cl também pode auxiliar no entendimento de processos geoquímicos que ocorram nos sistemas aquíferos, sendo a relação aumento da rSO_4/Cl e maior tempo de residência das águas subterrâneas (acúmulo de sais) uma das interpretações entretanto, se ocorrem processos redutores de sulfatos nessas águas, essa associação deve ser considerada com ressalvas (ESCALANTE, 2009). A Figura 26, apresenta o gráfico da rSO_4/Cl com a condutividade elétrica. Comparando os gráficos da Figura 25 e 26, os poços apresentados com as menores rSO_4/Cl não são os mesmos com as menores rMg/Ca logo, os poços com as menores rSO_4/Cl não estão intimamente relacionados com áreas de recarga, mas sim com processos geoquímicos redutores de sulfato. Já os poços definidos em áreas de descarga pela Figura 24, com valores altos de rMg/Ca e pertencentes ao aquífero Conservatória, também possuem relevantes rSO_4/Cl , permitindo estimar que essas águas estão sob processos oxidantes do sulfato e são representativas de zona de descarga.

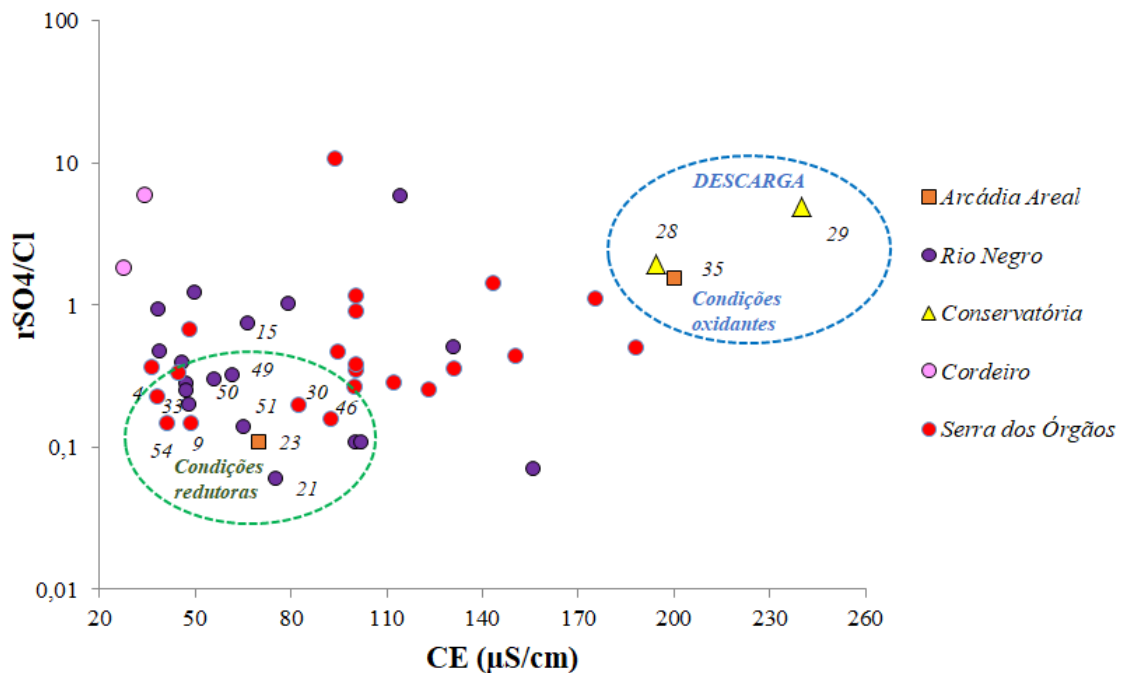


Figura 26. Gráfico rSO_4/Cl versus CE nas águas subterrâneas da RH-IV. Observa-se que os poços com baixas rSO_4/Cl não coincidem com os poços com baixas rMg/Ca , o que torna improvável a relação daqueles com as áreas de recarga de água subterrânea.

4.4.5 Razão de Adsorção de Sódio

Sabendo que a RH-IV utiliza grande parcela dos seus recursos hídricos na atividade de irrigação (37%) e que esse processo pode salinizar os sistemas aquíferos, cálculos da Razão de Adsorção do Sódio foram realizadas para as águas subterrâneas.

Do total de 102 amostras analisadas na classificação USSL (Figura 27), 98% apresentaram baixo risco de sódio. Duas amostras foram encontradas na classe S4, sendo águas extremamente sódicas, geralmente imprestáveis para a irrigação. Os teores de Na^{2+} nesses poços foi de 451 e 692 mg/L. Ambos os poços localizam-se na cidade de Areal, em um condomínio equestre. Vale ressaltar que Areal tem relevante produção de olerícolas.

Quanto ao risco de salinização, 66% das amostras não apresentaram qualquer risco e 27% apresentaram risco baixo, podendo ser utilizadas sem restrições para fins de irrigação.

Seis amostras, que corresponderam a 6% do total analisado, apresentaram risco médio de salinização. Um poço pertence a uma cervejaria localizada no município de Petrópolis apresentou 702 µS/cm de CE. Em São José do Vale do Rio Preto e em Três Rios foram observados dois poços com médio risco de salinização em abatedouros de aves, bovinos e suínos. Estas amostras apresentaram, além dos relevantes valores de CE (527,7 e 425,5 µS/cm), os maiores valores de Cálcio entre as amostras (44 e 39,8 mg/L). Sabe-se que uma das substâncias utilizadas na sepsia de abatedouros e aviários consiste no Hipoclorito de Cálcio, o que poderia ser uma causa antrópica para presença de valores altos desse íon, mas que precisa de maiores investigações.

Um condomínio residencial em Sapucaia também se enquadrou em risco médio de salinização, devido ao seu relevante valor de CE (355 µS/cm) e Cálcio (34,82 mg/L). Dois

poços na área urbana de Petrópolis mostraram altas concentrações de Sódio (106 e 101 mg/L), além de importantes valores de CE (575 e 516 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Vale destacar que estes dois poços são do tipo cacimba, com profundidades de 3 e 3,5 metros, fato que facilitaria possíveis contaminações antrópicas.

Uma única amostra foi enquadrada na classe C3, ou seja, com alto risco de salinização. A amostra corresponde a uma cervejaria em Petrópolis, e apresentou CE de 986 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor evidenciado por sua alta concentração de STD (790 mg/L).

Tendo em vista a análise de RAS e o conhecimento do comportamento da CE na RH-IV, medidas iniciais de condutividade elétrica consistem em importantes indicadores de possíveis salinizações na região para pesquisas futuras.

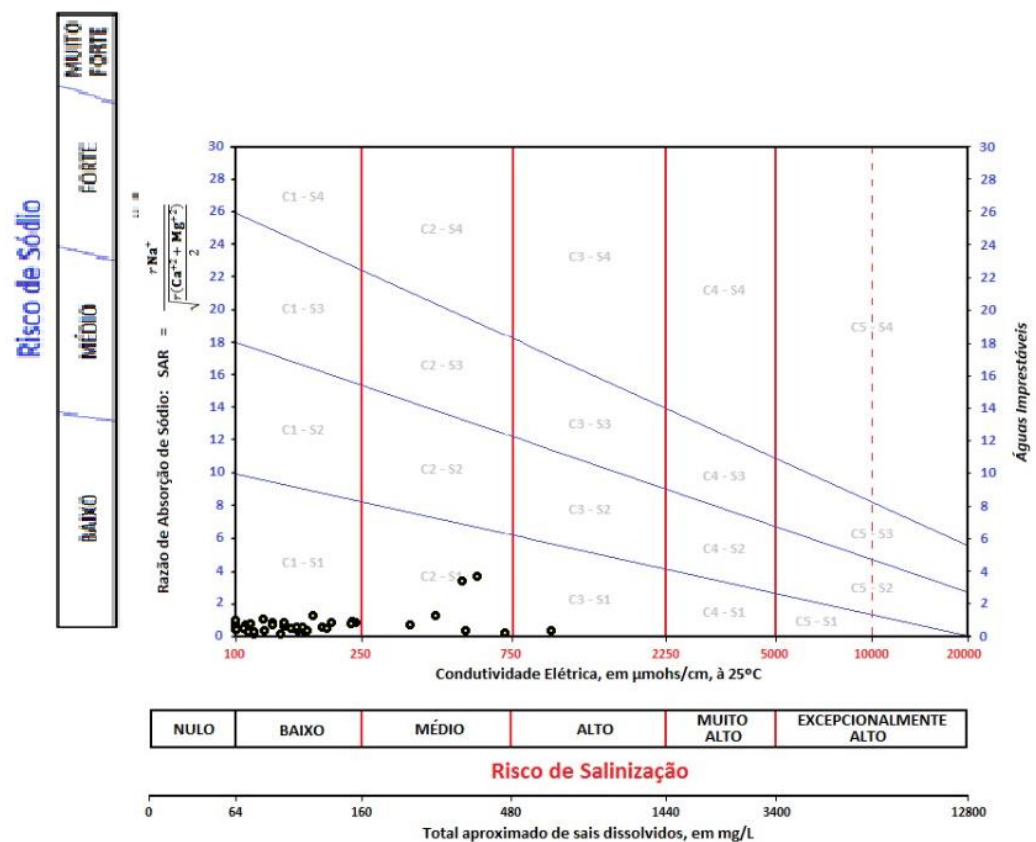


Figura 27. Classificação RAS/USSL para a RH-IV. Foram analisadas 102 amostras, dentre as quais todas apresentaram risco de sódio baixo. Quanto ao risco de salinização, 95 amostras apresentaram risco baixo, 6 tiveram risco médio e 1 amostra apresentou alto risco.

5. CONCLUSÕES

A estimativa da disponibilidade da água subterrânea foi eficiente considerando a integração e análise das características físicas da área de estudo. Essas informações, tratadas a partir do Sistema de Informação Geográfica possibilitaram através da análise hierárquica multicritério apresentar um diagnóstico que pode auxiliar tomada de decisões sobre a gestão do recurso hídrico subterrâneo para a RH-IV.

A análise revela que para uma área de 3.460 km², referente a RH-IV, onde predominam aquíferos fraturados e com distribuição de chuvas heterogêneas, as zonas potenciais mais altas e altas compreenderam 48% da região e estão localizadas principalmente na parte extremo nordeste, centro-sul e sudoeste da RH-IV. Os maiores exploradores de água subterrânea são Petrópolis e Teresópolis que apresentaram um potencial bastante heterogêneo, possuindo inclusive nos seus territórios as zonas de mais baixo potencial para exploração de água subterrânea. As zonas potenciais mais baixas e baixas foram equivalentes a 23% do território.

A análise permitiu inferir que o potencial de águas subterrâneas na RH-IV é controlado em ordem decrescente de importância pelos critérios como Solos, Densidade de Lineamentos, Geologia, Precipitação, Densidade de Drenagens, Geomorfologia e Declividade.

O mapa de zoneamento do potencial de água subterrânea foi comparado com a capacidade específica dos poços de água subterrânea, sendo verificada congruência com a produtividade e demanda de poços em virtude das classes de potencialidade elaboradas para a área de estudos.

A metodologia de delimitação de zonas de potencial para águas subterrâneas pode facilmente ser extrapolada para outras áreas no Estado do Rio de Janeiro, visto que todas as bases de dados espaciais utilizadas nesta pesquisa abrangem todo o território estadual. Os dados de poços, disponíveis na plataforma SIAGAS e no INEA, permitem a composição de um cadastro de poços regularizados para qualquer região do estado.

O modelo preliminar de fluxo subterrâneo apontou o fluxo de água subterrânea majoritariamente em sentido SE para NW, em direção do Rio Paraíba do Sul, principal corpo hídrico de descarga das águas subterrâneas. Esta definição foi consistente, pois espera-se que o fluxo avance em direção a áreas topograficamente mais baixas. Também ficou definido que a região da Serra dos Órgãos, nos municípios de Petrópolis e Teresópolis, constitui a principal zona de recarga da região, principalmente devido à sua altitude e aos altos índices de precipitação. Os baixos valores de rMg/Ca observados nos poços representantes do aquífero Rio Negro e Serra dos Órgãos confirmaram a validade desta análise.

Possível notar que a análise dos dados hidroquímicos encontra-se majoritariamente direcionada para a área da bacia do Piabanha, compreendendo a parte sul da RH-IV. Este fato se dá muito mais pela disponibilidade de dados que pela distribuição de poços. A maioria dos poços na região não está regulamentada e, por conseguinte não há disponibilidade de análises químicas consistentes, bem como dados de perfis dos poços.

Foi possível identificar 6 tipos de água na área de estudos, sendo predominante águas bicarbonatadas cálcicas, seguida de bicarbonatadas sódicas. Águas bicarbonatadas magnesianas e cloretadas sódicas, além de bicarbonatada mista e sulfatada magnesiana que

também foram encontradas. Em época de chuva (novembro a março) prevaleceram as tipologias de águas bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas, já na estação seca (maio a agosto) as predominâncias foram para águas bicarbonatadas sódicas e cloretadas sódicas.

Do total de 102 amostras analisadas na classificação USSL, 98% apresentaram baixo risco de sódio. Quanto ao risco de salinização, 94% das amostras apresentaram risco nulo ou baixo, podendo ser utilizadas sem restrições para fins de irrigação. Todos os poços observados que apresentaram risco de salinização médio ou alto estavam em área urbana ou sob influência antrópica direta. Tendo em vista a análise de RAS e o conhecimento do comportamento da CE na RH-IV, medidas iniciais de condutividade elétrica consistem em importantes indicadores de possíveis salinizações na região para pesquisas futuras.

No intuito de prevenir contaminações nos aquíferos, recomenda-se práticas conservacionistas de uso do solo, principalmente em áreas agrícolas e urbanas, onde a interação humana parece ser a principal causa das anomalias na evolução hidroquímica das águas. Salienta-se também a importância da proteção das áreas de recarga, sendo que a principal delas corresponde justamente ao Parque Nacional da Serra dos Órgãos, situado em Petrópolis e Teresópolis. A conservação dessa e também de outras áreas similares é fundamental para a boa gestão hidrogeológica da Região Hidrográfica do Piabanha.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Águas subterrâneas, o que são?** Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso em: abril 2021.

AGEVAP. PF-05 – Plano de Bacia Hidrográfica da RH-IV. Relatório Técnico do Comitê Piabanha. Elaborado por PROFILL. 498p. 2021.

ALBUQUERQUE, Y. M. **Cenário do Uso dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Hidrográfica do Piabanha (RH-IV)**. 2019. 73f. Monografia (Bacharelado em Gestão Ambiental). Departamento de Ciências do Meio Ambiente, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Três Rios, RJ, 2019.

ALMEIDA, F. F. M. & CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28(2): p. 135-150, 1998.

ALMEIDA, F. F. M. **Origem e Evolução da plataforma brasileira**. Rio de Janeiro, DNPM, 36 p., Boletim 241, 1967.

ALMEIDA, F. F. M. **The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, vol. 48, [S.N.], p. 15-26, [s.m.], 1976. (Suplemento).

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. & CARNEIRO, C. D. R. **Lineamento de Além Paraíba**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 47, n. (3/4): 575, 1975.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. 1977. **Províncias Estruturais Brasileiras**. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, v. 8, Atas, p. 363-391, Campina Grande, PB, 1977.

ALMEIDA, J. C H; HEILBRON, M. Geologia estrutural. In: HEILBRON, M.; VALERIANO, C. M.; ALMEIDA, A.; EIRADO SILVA, L. G. (Org.). **Geologia e Recursos Minerais do estado do Rio de Janeiro**. 1ed. Belo Horizonte: CPRM, v. 1, p. 33-42, 2016

ALMEIDA, J. C. H. de. **Zonas de cisalhamento dúctil de alto grau do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Rio Claro, SP, 2000**. 190 p. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro, SP, 2000.

ALMEIDA, J. C.; HEILBRON, M.; SCHMITT, R. S.; VALERIANO, C. M.; RUBIM, I. N.; MOHRIAK, W.; MACHADO JUNIOR, D. L.; TETZNER, W. **Guia de campo na Área Continental do Alto de Cabo Frio**. Boletim de Geociências da PETROBRAS (Impresso). v. 21, p. 325-355, 2013.

ALVES, M. G.; COSTA, A. N.; POLIVANOV, H.; SILVA JUNIOR, G. C.; COSTA, M. C. O. **Qualidade das águas de poços rasos provenientes de áreas urbanas e rurais de campos dos Goytacazes (RJ)**. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Luís, 2010.

ANDUALEM, T.G.; DEMEKE, G.G. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, n. 24, p. 1-13, 2019.

ARULBALAJI, P.; PADMALAL, D. & SREELASH, K. GIS e AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. **Scientific Reports**, v. 9, p. 2082-2082, 2019.

BARRETO A. B. da C.; MONSORES A. L. M.; LEAL A. de S.; PIMENTEL J. **Estudo geoambiental do Estado do Rio de Janeiro - Higrogeologia do Estado do Rio de Janeiro**. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2000.

BISWAS, A. Delineation of Groundwater potential zones using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques: A case study from Ganjam district, Orissa. **Research Journal of Recent Sciences** 2277-2502. 1. p. 59-66, 2012.

BRASIL. **Carta das águas subterrâneas do Paraná: resumo executivo**. Ministério de Meio Ambiente - Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. 337p., 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Publicada no DOU nº 85, de 7 de maio de 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.. Publicada no DOU nº 249, de 30 de dezembro de 2009.

BRITO, THAÍS P.; BACELLAR, LUIS A. P.; BARBOSA, MARIA SÍLVIA C.; BARELLA, CESAR F. Assessment of the groundwater favorability of fractured aquifers from the southeastern Brazil crystalline basement. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 3, p. 442-454, 2019.

BRUM, L. B. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências Departamento de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. O Uso da Água pela Agricultura Irrigada na Região Serrana do Rio de Janeiro: Bacia do Córrego Sujo. Teresópolis, 2010.

CAINE, J. S.; FORSTER, C. B. Fault Zone Architecture and Fluid Flow; Insights From Field Data and Numerical Modeling. **Geophysical Monograph Series**, v. 113, p. 101-127, 1999.

CAMPANHA, G. A. **O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira**, 2002. 105 p. (Tese de Livre Docência). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CAPUTO H. P. **Mecânica de solos e suas aplicações – Fundamentos**, v. 1, 6ª edição – Livros Técnicos e Científicos editora, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.

CAVALCANTE, I. N. **Estudo Hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo - Área Piloto de Atibaia (SP)**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1990.

CAVALCANTE, I. N.; SANTIAGO, M. M. F; REBOUÇAS, A. DA C. Hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Manto de Intemperismo e Meio Fraturado na Região de Atibaia, Estado de São Paulo. **Revista de Geologia**, v. 11, p. 31-39, 1998.

CEIVAP, Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes**. Relatório de Diagnóstico. Tomo III, cap. 6, p. 532-739, 2015.

CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Geografia**, v. 8, n. 1, 1999, p. 91-97.

CHENINI, I.; MAMMOU, A. B. & EL MAY, M. Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). **Water Resources Management**, v. 24, p. 921–939, 2010.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIABANHA E DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PAQUEQUER E PRETO. **Atlas da Região Hidrográfica do Piabanha. Petrópolis, Rio de Janeiro, 2019**. Disponível em: <http://www.comitepiabanha.org.br/atlas.php>. Acesso em 4 de abril de 2020.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIABANHA E DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PAQUEQUER E PRETO. **Cadastro de usuários da RH-IV, 2021**. Disponível em: <https://comitepiabanha.org.br/cadastro-de-usuarios.php> acesso em 25 de abril de 2021.

CRUZ, I. F. D. da. **Modelagem hidrogeoquímica das águas minerais do Parque Salutaris, Paraíba do Sul, RJ**. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica Ambiental), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016. 121 p.

CUSTODIO, E. Y.; LLAMAS, M. R. **Hidrología Subterránea**. 2. ed. Barcelona: Omega, 1996.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología subterranea**. Barcelona: Ediciones Omega, 2 v., 2350 p., 1983.

DAS, S. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 3, p. 1589–1599, 2017.

DE REU, BOURGEOIS, J.J., BATS, M. ZWERTVAEGHER, A., GELORINI, V., SMEDT, P., CHU, W., ANTROP, M., MAEYER, P., FINKE, P., MEIRVENNE, M. V., VERNIERS, J., CROMBÉ, P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes, *Geomorphology*, v. 186, p. 39-49, 2013.

DELGADO, I. de M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L. C.; SILVEIRA FILHO, N. C.; SANTOS, R. A.; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T.; ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; LACERDA FILHO, J. V.; VALESTE, C. R. PERROTTA, M. M.; HEINECK, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SHOBHENHAUS C.; VIDDOTI, R. M.; GO NÇALVES, J. H. (Org.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, cap. V, p. 227-334, 2003.

DIAS DA CRUZ, I. **Modelagem hidrogeoquímica das águas minerais do Parque Salutaris, Paraíba do Sul, RJ**. 2016. 123f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Química, Programa de Pós Graduação em Geociências. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2016.

DREVER, J. I. **The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments**. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 436 p., 1997.

DRM – RJ - Departamento de Recursos Minerais, 2001, **Poços Tubulares e outras Captações de Águas Subterrâneas – Orientações aos Usuários**, disponível em <http://www.drm.rj.gov.br>, acessada em abril de 2021.

DUARTE B. P. **Evolução tectônica dos ortognaisses dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na região de Juiz de Fora, MG: Geologia, petrologia e geoquímica**, 1998. 280 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1998.

EBERT H. D. A.; HASUI Y. Transpressional tectonics and strain partitioning during oblique collision between three plates in the precambrian of south-east Brazil. In: R E. HÖLDSWORTH, R. A. STRACHAN, J. F. DEWEY (ed.s.) *Continental Transpressional Tectonics and Transensional Tectonics*. London, **Geological Society Special Publication**, v. 135, p. 231 – 252, 1998.

EIRADO SILVA, L.G.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.C.H. Os terrenos tectônicos da Faixa Ribeira na Serra da Bocaina e na Baía da Ilha Grande, sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 36: p. 426-436, 2006.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, 10, 1979, Rio de Janeiro. Súmula...Rio de Janeiro, 1979. 83p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos** - 5ª ed. 2018.

ENGELBRECHT, B. Z. **Modelo conceitual de circulação de água subterrânea em aquífero cristalino no município de Itu,SP**, 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. São Paulo, Rio Claro, 2017.

ESCALANTE, E. F. **Los Hidrogramas Y Otros Sistemas de Representación Del Quimismo De Las Aguas**. 2ª edicion. Serie Hidrogeologia Hoy. 2009

FEITOSA F. A. C.; MANOEL FILHO J.; FEITOSA E. C.; DEMETRIO J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**, módulo 3, cap. 3.1, p. 97-117, 3º ed, CPRM. Revisado e ampliado, Rio de Janeiro: CPRM. 812p., 2008.

FEITOSA F. A. C.; MANOEL FILHO J.; FEITOSA E. C.; DEMETRIO J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**, módulo 5, cap. 5.1, p. 325-357, 3º ed, CPRM. Revisado e ampliado, Rio de Janeiro: CPRM. 812p., 2008.

FERNANDES A. J.; PERROTTA M. M.; SALVADOR E. D.; AZEVEDO S. G. DE; FILHO A. G.; STEFANI F. L.; PAULON, N. Aquíferos Fraturados. In: G. ROCHA, A. J. FERNANDES, M. MANCUSO (Ed) **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo em 1:1.000.000. Nota Explicativa**, DAEE/IGSMA/IPT/CPRM, 66-84 p, 2005.

FERNANDES, A. J.; CHRISTOFOLLETTI, C.; PINO, D.; SIMONATO, M. D.; PINHATTI, A.; CONICELLI, B. P.; HIRATA, R.; BERTOLO, R. A. **Avaliação regional e identificação de critérios para locação de poços nos aquíferos fraturados da RMSP**. In: Anais XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 20-23 Campinas, SP, 2001.

FERNANDES, A.; RUDOLPH, D.L. The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 9, p. 151–167, 2001.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4th ed. [S. l.]: Publisher Pearson, 2001. 598 p.

FOSSSEN, H. **Structural geology**. Cambridge University Press; 2nd ed., 524 p., 2016.

GAMVROULA D.; ALEXAKIS D.; STAMATIS G. Diagnosis of groundwater quality and assessment of contamination sources in the Megara basin (Attica, Greece). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 6(7), p. 2367–2381, 2013.

GODOY, J.M.; FERREIRA, P. R.; SOUZA, E. M.; SILVA, L. I.; BITTENCOURT, I. C. S.; FRAIFELD, F. High Uranium Concentrations in the Groundwater of the Rio de Janeiro State, Brazil, Mountainous Region. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo , v. 30, n. 2, p. 224-233, 2019.

GOMES, G. S. **Exposição a urânio natural em águas subterrâneas e efeitos renais: uma revisão de literatura**. 2013. 41 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Medicina, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

GOMES, O. V. O.; MARQUES, E. D.; KÜTTER, V. T.; AIRES, J. R.; TRAVI, Y.; SILVA-FILHO, E. V. Origin of salinity and hydrogeochemical features of porous aquifers from northeastern Guanabara Bay, Rio de Janeiro, SE - Brazil. **Journal Of Hydrology: Regional Studies** , v. 22, 100601, 2019.

HARTWIG, M. & RICCOMINI, C. Análise Morfotectônica da Região da Serra dos Órgãos, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 11, 2010.

HASUI Y & OLIVEIRA M. A. F. A Província Mantiqueira - Setor Central. In: F. F. M. ALMEIDA & Y. HASUI (coord.) **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo, Ed Edgard Blücher, 378 p, 1984.

HASUI, Y.; CARNEIRO C. D. R.; ALMEIDA F. F. M. de; BARTORELLI A. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Ed. Beca. 900p., 2012.

HEATH, R. C. Hidrologia Básica de Água Subterrânea. **Geological Survey Water Supply Paper**. Trad. WREGE, M. & POTTER, P. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas Núcleo Sul-ABAS, 1982.

HEILBRON M.; VALERIANO C.; VALLADARES C.; MACHADO N. A orogênese Brasileira no segmento Central da Faixa Ribeira, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**. V. 25 (4), p. 249-266, 1995.

HEILBRON, M, VALERIANO, C. M., ALMEIDA, A., EIRADO SILVA, L. G.(Org.). **Geologia e Recursos Minerais do estado do Rio de Janeiro**. 1ed. Belo Horizonte: CPRM, v. 1, 2016.

HEILBRON, M.; EUZÉBIO, R.; PEIXOTO, C. de A.; TUPINAMBÁ, M.; GUIA, C. da; PETERNEL, R.; EIRADO SILVA, L. G.; RAGATKI, C. D. **O Complexo Juiz de Fora na**

Folha Santo Antônio de Pádua 1:100.000: Geologia e Geoquímica. Geociências (São Paulo. Impresso), v. 32, p. 10-23, 2013.

HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C. M.; MILANI, E.; ALMEIDA, J. C. H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the south-eastern continental margin of Brazil. In: TALWANI, M.; MOHRIAK, W. (Ed.). **Atlantic rifts and continental margins**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 1-34, 2000. (Geophysical Monograph Series, 115)

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Eds.) **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, p. 203-234, 2004.

HEILBRON, M.; SIMÕES, L. S. A.; ALVES, R. P.; CHRISPIM, S. J. **Geologia do Cabo dos Búzios**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 54, n.3, p. 553-562, 1982.

HEM, J. D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. USA: Geological Survey Water-supply, 1985. 254 p.

HIRUMA, S.T. & PONÇANO, W. L. Densidade de drenagem e sua relação com fatores geomorfológicos na área do alto rio Pardo, SP e MG. **Revista do Instituto Geológico**, 15(1/2): p. 49 – 57, 1994.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base Cartográfica Contínua do Estado do Rio de Janeiro na Escala 1:25.000** - BC25_RJ, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2016. **Mapa Hidrogeológico da Região Sudeste, escala: 1:1.800.000 (shp)**. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências (DGC) / Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (CREN).

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico, 2010**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em janeiro de 2021.

JOHNSON, B. C. D. **Effects of Lithology and Fracture Characteristics on Hydraulic Properties in Crystalline Rock: Mirror Lake Research Site , Grafton County , New Hampshire**. U.S. Geological Survey Toxic Substances Hydrology Program Technical Meeting, p. volume 3, 1998.

JOTHIBASU, A.; ANBAZHAGAN, S. Hydrogeological assessment of the groundwater aquifers for sustainability state and development planning. **Environment Earth Sciences** 77, 88, 2018.

LEMOS, M.C.; MARQUES, E. D.; GOMES, O.V.O. Concentrações Anômalas de Bário Identificadas em Três Rios para Solos e Água Superficial. **8º Anais Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade**, ISSN 2525-4928. Três Rios, RJ, 2019.

LIU, C. C. **Análise Estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro**, 157p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, 1984.

LOGAN, J. **Interpretação e análises químicas de águas**. Recife: U.S. Agency International Development, 1965. 67 p.

MADRUCCI, V.; TAIOLI, F., & ARAÚJO, C. C. Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, São Paulo State, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 357, n. (3/4), p. 153-173, 2008.

MAGESH N. S., CHANDRASEKAR N., SOUNDANAYAGAM J. P. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. **Geoscience Frontiers**. 3: p. 189–196, 2012.

MARGAT, J.; GUN, J. V. D. **Groundwater around the World: A Geographic Synopsis**. CRC Press. A Balkema Book. 376p. ISBN: 978-0-203-77214-0. New York, NY, 2013.

MARQUES, E. D.; SELLA, S. M.; BIDONE, E. D.; SILVA-FILHO, E. V. Geochemical behavior and dissolved species control in acid sand pit lakes, Sepetiba sedimentary basin, Rio de Janeiro, SE – Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 30, n. 3-4, p. 176-188, 2010.

MARTINS A. M.; CAPUCCI E.; CAETANO L. C.; CARDOSO G.; BARRETO A. B. C.; MONSORES A. L. M.; LEAL A. S.; VIANNA P. **Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro, Síntese do estágio atual do conhecimento**. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 1, 2, 12–14, 2006.

MARTINS SILVA, H. **Macrodrenagem Aplicada à Sustentabilidade Municipal em Cenários de Mudanças Climáticas. Aspectos geoquímicos, hidrológicos e socioambientais. Caso da bacia do Purys**. 2018. 169 f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Química, Programa de Pós Graduação em Geociências. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2018.

METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 1991

MOURÃO, M. A. A.; SOARES, A. G.; SIMÕES, E. J., M.; OLIVEIRA, E. S. ; BRITO, R. M. D. A.; BEATO, D. A. C.; VIANA, H. S. **Caracterização hidroquímica e avaliação de uso**

das águas subterrâneas na microrregião de Unaí, Bacia do São Francisco, NW de Minas Gerais - Brasil. 1st Joint World Congress on Groundwater, 2000, Fortaleza.

NASCIMENTO, F. M. F. **Geotectônica e hidrogeologia do estado do Rio de Janeiro: síntese dos conhecimentos até 2012.** Relatório Técnico. Belo Horizonte: CPRM, 2012.

NETO, J. O. M.; CHAGAS, R. M.; JUNIOR, A. V. M. Delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe. *Revista Scientia Plena*, V. 9 n. 7, 2013.

NEVES, M. A. **Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP).** Rio Claro, 2005. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 2005.

NEVES, M.A.; MORALES, N. Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 15, p. 471–482, 2007.

NITHYA, C. N.; SRINIVAS, Y.; MAGESH, N. S.; KALIRAJ, S. Assessment of groundwater potential zones in Chittar basin, Southern India using GIS based AHP technique. *Remote Sensing Applications: Society and Environment (Elsevier)*, v. 15, 100248, 2019.

OLIVIEIRA, N. C. M.; BACELLAR, L. A. P.; FIUME, B.; BARELLA C. F.; NOLA I. T. S. Aplicação do método AHP para confecção de modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 90-102, 2020. PETERSEN-PERLMAN, J. D.; VEILLEUX, J. C.; WOLF, A. T. International water conflict and cooperation: challenges and opportunities. **Water International**, v. 42, n. 2, p. 105–120, 2017.

PINTO, E. J. de A.; AZAMBUJA, A. M. S. de; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. P. de B.; PICKBRENNER, K. (Coords.). **Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos.** Brasília: CPRM, 2011. 1 DVD. Escala 1.5:000.000.

PIPER, A. M. A Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Reprinted: **American Geophysical Union Transactions**. v. 25, p. 914-923, 1944.

PIRES, C. A. **Condicionantes Litoestruturais na Exploração do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino, Paraná, Brasil, 2020.** 96f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2020.

RAMKUMAR G.; SRINIVASARAO K.; MOHAN K. M.; SUDARSHAN I., SIVARANJANI A. K. P.; GOPALAKRISHNA K.; NEERAJA C. N.; BALACHANDRAN S. M.; SUNDARAM R. M.; PRASAD M. S.; RANI N. S.; PRASAD A. M. R.; VIRAKTAMATH B. C.; MADHAV M. S. Development and validation of functional marker targeting an InDel in the major rice blast disease resistance gene Pi54 (Pikh). **Molecular Breeding**, v. 27, p. 129–135, 2011.

REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUCAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**; cap. 1, p. 1-37. Editora Escrituras , São Paulo, SP, 2002.

REBOUÇAS, A. da C. Groundwater in Brazil. **Episodes**, v. 11, n. 3, p. 209–214, 1988.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT , S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre localizado no manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v. 7, n.2, 2012.

RICCOMINI, C. **O rift continental do sudeste do Brasil**. 1989. 256 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1989.

RIO DE JANEIRO, INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE – INEA. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CERHI. **Resolução CERHI-RJ N° 107 de 22 de Maio de 2013**. Aprova nova definição das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro d Revoga d Resolução CERHI N° 18 de 08 de Novembro de 2006.

SAATY, T. L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron Books, 1991.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. McGraw-Hill, 278 p. New York, 1980.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. McGraw-Hill, 278 p. New York, 1980.

SAATY, T. L., **Método de Análise Hierárquica**, McGraw-Hill-Makron, São Paulo SP, Brás, 1991. (Versão ampliada e revisada por Wainer da Silveira e Silva, do original em inglês *The Analytic Hierarquic Process*, Pittsburg, USA: R WS Publications, 1980.

SANDER, P. Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. **Hydrogeology Journal**, v. 15, p. 71–74, 2007.

SCHMITT R. S.; TROUW R. A. J.; VAN SCHMUS W. R., Pimentel, M. M. Late amalgamation in the central part of Western Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collision orogeny in the Ribeira belt (SE Brazil). **Precambrian Research**, v. 133, p. 29-61, 2004.

SENA, S. F. M.; **Estudo Hidroquímico da Água Produzida em um Determinado Campo de Petróleo da Bacia Potiguar**. 2011. 126f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Natal, RN.

SENGÖR, A. M. C. Plate Tectonics and orogenic research after 25 years: a Tethyan perspective. **Earth Science Reviews**, v. 27(1-2), p. 1-201, 1990.

SEVER, C.W., 1964. Geology and ground-water resources of crystalline rocks. U. S. Geological Survey, Information Circular 30.

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 (4), p. 402–421, 2015.

SILVA, J. J. F.; MIGLIORINI, R. B. Caracterização das águas subterrâneas do Aquífero Furnas na região sul do Estado de Mato Grosso. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 33, p. 261-277, 2014.

SILVA, T. P., MELLO, C. L. Reativações Neotectônicas na Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul (Sudeste do Brasil). **Revista do Instituto de Geociências – Geologia USP, Série científica**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 95-111, 2011.

SINGH, L. K., JHA, M. K., CHOWDARY, V. M. Assessing the accuracy of GIS-based MultiCriteria Decision Analysis approaches for mapping groundwater potential. **Ecological Indicators**, v. 91, p. 24–37, 2018.

SINGHAL, B.B.S.; GUPTA, R.P. 1999. **Applied Hydrogeology of Fractured Rocks**. 2nd ed. Springer Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 408 p.

STIFF, H. A., JR. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns: *Journal of Petroleum Technology*, v. 3, no. 10, p. 15–17, 1951.

TEIXEIRA A. P. G. **Estudos geoquímicos comparativos de granitos tardi a pós-colisionais no segmento central do Orógeno Ribeira no Estado do Rio de Janeiro**. 45 p. Monografia (Bacharelado em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TEIXEIRA, J.; CHAMINÉ, H. I.; ESPINHA MARQUES, J.; CARVALHO J. M.; PEREIRA A. J.; CARVALHO M. R.; FONSECA P. E.; PÉREZ-ALBERTI A.; ROCHA, F. A comprehensive analysis of groundwater resources using GIS and multicriteria tools (Caldas da Cavaca, Central Portugal): environmental issues. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 2699–2715, 2015.

TERAMOTO, E. H.; ENGELBRECHT, B. Z.; ZANON, B.; GONÇALVES, R. D.; CHANG, H.K. Caracterização hidroquímica e isotópica dos aquíferos fissurais da região de Itabuna/BA. **Revista Águas Subterrâneas** v. 32, n. 2, p. 228-236, 2018.

TODD, D. K. **Groundwater hydrology**. 3th ed. USA: John Wiley & Sons. 652 p., 2005.

TROUW, R.; HEILBRON, M.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F.; VALERIANO, C.; ALMEIDA, J.; TUPINAMBÁ, M.; ANDREIS, R. The Central Segment of the Ribeira Belt. In: CORDANI, U., MILANI, E., THOMAZ FILHO, A., CAMPOS, D. (Eds.), **Tectonic Evolution of South America**. CPRM, Rio de Janeiro. 856 p., 2000.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo: In: Tucci, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**, 2ª Ed., Editora Universidade, Porto Alegre. Rio Grande do Sul, RS. p.335-372, 2000.

TUPINAMBÁ M.; TEIXEIRA, W.; HEILBRON, M.; BASEI, M. **The PanAfrican/Brazilian Arc-Related Magmatism at the Costeiro Domain of the Ribeira Belt, Southeastern Brazil: New Geochronological and Lithochemical Data**. 14th International Conference on Basement Tectonics Abstracts, v. 1, p. 12-14, 1998.

TUPINAMBÁ, M. & HEILBRON, M. **Reconstituição da fase précolisional neoproterozóica da Faixa Ribeira: o arco magmático e as bacias de ante-arco e retro-arco do Terreno Oriental**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, v. 36, p. 345. Sociedade Brasileira de Geologia Nordeste, João Pessoa, PB, 2002.

TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; OLIVEIRA, A.; PEREIRA, A. J.; CUNHA, E. R. S. P.; FERNANDES, G. A.; FERREIRA, F. N.; CASTILHO, J. G.; TEIXEIRA, W. **Complexo Rio Negro - Uma Unidade Estratigráfica Relevante no Entendimento da Evolução da Faixa Ribeira**. Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, v. 6. p. 104-107, Salvador, BA, 1996.

UNESCO; Programa Mundial das Nações Unidas para Avaliação dos Recursos Hídricos. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2018: soluções baseadas na natureza para a gestão da água, fatos e dados**. Divisão de Ciências Hídricas, UNESCO. Perúgia, Itália. 12 p., 2018.

VALENTE, C. R.; OLIVEIRA, S. M. A.; VENEZIANI, P. **Controle Neotectônico das Águas Subterrâneas no Estado do Rio de Janeiro**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, p.367-363, Foz do Iguaçu, Anais. São José dos Campos: INPE, 2001.

VALLADARES, C. S.; PASCUTTI, A. G.; SILVA, T. M. da; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J. C. H. de; DUARTE, B. P.; TUPINAMBÁ, M.; NOGUEIRA, J. R., VALERIANO, C. de M.; EIRADO SILVA, L.G. **Geologia e recursos minerais da folha Três Rios SF. 23-ZBI**. CPRM, Rio de Janeiro 136p., 2012.

VENGOSH, A.; BEN-ZVI, A. Formation of a salt plume in the coastal plain aquifer of Israel: the Be'er Toviyya region. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 160, p. 21–52, 1994.

VENGOSH, A.; GILL, J.; DAVISSON, M. L.; HUDSON, G. B. A multiisotope (B, Sr, O, H, and C) and age dating study of groundwater from Salinas Valley, California: hydrochemistry, dynamics, and contamination process. **Water Resources Research**, Washington, v. 38, n. 1, p. 1–17, 2002.

VENGOSH, A.; PANKRATOV, I. Chloride/bromide and chloride/fluoride ratios of domestic sewage effluents and associated contaminated groundwater. **Ground Water**, Ohio, v. 36, n. 5, p. 815–824, 1988.

VENGOSH, A.; ROSENTHAL, E. Saline groundwater in Israel: Its bearing on the water crisis in the country. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 156, p. 389–430, 1994.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L. & ALLEY, W. M. **Ground Water and Surface Water: A Single Resource**, Report Number Circular 1139, U S Geological Survey, Circular 1139, Denver, Colorado, USA, p. 87, 1998a

WOLF, A.; CARIUS, A.; KRAMER, A.; GEOFFREY, D. Managing Water Conflict and Cooperation. *In*: ASSADOURIAN, E.; BROWN, L.; CARIUS, A.; CINCOTTA, R.; CONCA, K.; GEOFFREY, D.; FLAVIN, C.; FRENCH, H.; GARDNER, G.; HALWEIL, B.; KRAMER, A.; MASTNY, L.; NIERENBERG, D.; PIRAGES, D.; PRUGH, T.; RENNER, M.; SAWIN, J.; STARKE, L.; WOLF, A. **State of the World: Redefining Global Security**. Island Press, cap. 5, p. 80-96, 2005.

YEH H. F., CHENG Y. S., LIN H. I., LEE C. H. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian river, Taiwan. **Sustainable Environment Research**, v. 26: p. 33–43, 2016.

YEH, H. F.; LEE, C. H.; HSU, K. C.; CHANG, P. H. GIS for the Assessment of the Groundwater Recharge Potential Zone. **Environmental Geology**, n. 58, p. 185-195, 2008.

ZALÁN, P. V. & OLIVEIRA, J. A. B. de. Origem evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n.2, p, 269-300, 2005.

7. ANEXOS

Anexo A - Estatística descritiva das unidades litoestratigráficas da RH-IV.

	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Aquífero Serra dos Órgãos	Temperatura	°C	14	27	22,7	22
	CE	µS/cm	23,8	986	145,4	80,3
	pH	-	6	8,03	7,13	7,1
	Ca		0,008	41,6	6,99	2,5
	Na		1,55	106,6	12,13	6,5
	K		0,11	4,8	1,98	1,71
	Mg		0,001	33,3	3,24	1,15
	HCO ₃		3	166	38,48	30,77
	Cl		1	87,1	9,78	6,34
	SO ₄	mg/L	0,01	61,94	8,33	2,71
	Fe		0,003	1,06	0,13	0,07
	Mn		0,0004	4	0,204	0,02
	Ba		0,006	0,96	0,09	0,04
	F		0,01	1,33	0,42	0,29
	NO ₃		0,1	333,5	9,48	0,15
	PO ₄		0,023	0,023	0,023	0,023
	Dureza		2	99	30,04	21,5
		Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média
Aquífero Rio Negro	Temperatura	°C	18,9	29,2	23,23	23,9
	CE	µS/cm	24,1	242	83,9	66,5
	pH	-	5,2	7,8	6,37	6,3
	Ca		0,01	29,27	7,19	4,36
	Na		0,01	13,46	6,54	6,17
	K		0,06	7,44	2,67	2,2
	Mg		0,04	7,55	1,63	0,62
	HCO ₃		7,35	66,96	24,63	20
	Cl		1,32	16,9	7,11	6,14
	SO ₄	mg/L	0,59	19	3,52	1,86
	Fe		0,002	15,18	0,79	0,07
	Mn		0,002	0,31	0,033	0,013
	Ba		0,043	0,27	0,13	0,09
	F		0,04	0,56	0,25	0,2
	NO ₃		0,03	34,8	3,65	1,17
	PO ₄					
	Dureza		1,94	104	28,06	14,82
		Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média
	Temperatura	°C	14	27	22,7	22

Aquífero Arcádia Areal	CE	μS/cm	0,2	1114,5	198,4	116,7
	pH	-	6,03	7,97	7	6,95
	Ca		3,6	37,12	13,19	7,43
	Na		2,59	692	76,84	5,63
	K		1,07	5,99	3,12	2,91
	Mg		0,55	10,02	3,57	2,03
	HCO ₃		10	95,3	50,71	52,2
	Cl		0,51	22,59	7,73	5,85
	SO ₄	mg/L	1	4,41	2,85	2,76
	Fe		0,009	17,5	2,16	0,1
	Mn		0,003	1,39	0,21	0,013
	Ba		0,002	0,016	0,009	0,009
	F		0,02	0,87	0,47	0,53
	NO ₃		0,03	1,1	0,19	0,03
	PO ₄					
	Dureza		12	133,95	47,24	30,05
		Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média
	Temperatura	°C	19,5	26,6	21,94	20
	CE	μS/cm	35,5	175	98,6	88
	pH	-	6,1	8,2	7,02	7,03
	Ca		1,54	22	9,95	7,69
	Na		3,02	10,53	5,78	4,86
	K		0,72	4,36	2,16	1,85
	Mg		0,39	5,07	1,61	1,25
	HCO ₃		10	41,68	22,59	20
	Cl		2,7	53,3	12,98	5,25
	SO ₄	mg/L	1,82	5,5	3,65	3,65
	Fe		0,013	0,65	0,15	0,021
	Mn		0,0001	0,07	0,022	0,013
	Ba					
	F		0,02	0,64	0,19	0,1
	NO ₃		0,074	233,4	58,93	1,1
	PO ₄					
	Dureza		12	80	36,04	34
	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
	Temperatura	°C	21,3	24,8	23,88	24,8
	CE	μS/cm	96	425,5	235,28	227,9
	pH	-	6,12	7,7	6,96	7,06
	Ca		6,75	39,89	13,88	7,87
	Na		7,67	33,61	14,95	12,54
	K		1,85	6,5	4,02	3,31
	Mg		2,17	6,78	5,09	6,06
	HCO ₃		3	139,2	82,63	86,9
	Cl	mg/L	12,08	67,99	31,95	15,8
	SO ₄		0,81	7,69	5,34	6,07
	Fe		0,08	0,21	0,12	0,09
	Mn		0,001	0,05	0,027	0,032
	Ba		0,046	0,046	0,046	0,046

	F		0,06	0,5	0,27	0,25
	NO ₃		0,53	4,33	1,95	1,46
	PO ₄		0,022	0,022	0,022	0,022
	Dureza		22,9	374,77	122	43,02
Aquífero Cordeiro	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
	Temperatura	°C	16	17,1	16,55	16,55
	CE	µS/cm	27,29	169,9	110	153,2
	pH	-	6	7,2	6,53	6,4
	Ca		2	5,11	3,03	2
	Na		1,55	19	9,78	6,55
	K		1,3	3,74	2,26	1,64
	Mg		0,64	2	1,54	2
	HCO ₃		10	59	27,75	21
	Cl		1,4	5,8	2,79	1,98
	SO ₄	mg/L	2,4	15	9,13	10
	Fe		0,022	44,58	10,12	2,21
	Mn		0,024	0,1	0,074	0,024
	Ba					
	F					
	NO ₃					
	PO ₄					
	Dureza					
Aquífero Graminha	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
	Temperatura	°C	-	-	-	-
	CE	µS/cm	-	-	-	-
	pH	-	-	-	-	-
	Ca		8,24	8,24	8,24	8,24
	Na		8,76	8,76	8,76	8,76
	K		3,18	3,18	3,18	3,18
	Mg		1,17	1,17	1,17	1,17
	HCO ₃					
	Cl		6,8	6,8	6,8	6,8
	SO ₄	mg/L	9,9	9,9	9,9	9,9
	Fe		0,68	0,68	0,68	0,68
	Mn		0,12	0,12	0,12	0,12
	Ba					
	F		0,98	0,98	0,98	0,98
	NO ₃		3,7	3,7	3,7	3,7
	PO ₄					
	Dureza		15,8	29,22	23,04	24,1
Aquífero Juiz de Fora	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
	Temperatura	°C	20	20	20	20
	CE	µS/cm	156,4	355,1	255,7	255,7
	pH	-	6,8	7,8	7,32	7,32
	Ca		34,8	34,8	34,8	34,8
	Na	mg/L	9,18	17,65	13,41	13,41
	K		2,55	3,61	3,08	3,08
Mg		5,39	5,39	5,39	5,39	

	HCO ₃		65	131	98	98
	Cl		1,4	5,4	3,4	3,4
	SO ₄		8	13	10,5	10,5
	Fe		0,11	2,94	1,52	1,52
	Mn		0,1	0,1	0,1	0,1
	Ba					
	F		0,3	0,3	0,3	0,3
	NO ₃					
	PO ₄					
	Dureza		55,9	109	82,45	82,45
Aquífero Paraíba do Sul	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
	Temperatura	°C	-	-	-	-
	CE	µS/cm	77,7	77,7	77,7	77,7
	pH	-	6,03	7,61	6,95	7,2
	Ca		1,31	1,31	1,31	1,31
	Na		5	5	5	5
	K		1,32	1,32	1,32	1,32
	Mg		1,37	1,37	1,37	1,37
	HCO ₃		5,13	35,7	16,56	8,87
	Cl		3,97	16,34	11,89	15,38
	SO ₄	mg/L	2,37	5,36	4,01	4,3
	Fe		1,89	1,89	1,89	1,89
	Mn		0,17	0,17	0,17	0,17
	Ba					
	F		0,01	0,1	0,12	0,1
	NO ₃		0,09	0,29	0,17	0,14
	PO ₄					
	Dureza		8,9	42,51	29,95	38,46

Anexo B – Classificação RAS/USSL para 102 poços quanto ao risco de salinização RH-IV.

Poço	Na	Ca	Mg	CE	SAR	Classificação
INPAR01 SIAGAS 3100023473	8,76	8,24	1,17	0	0,756	C0 - S1
INPET01 SIAGAS 3100023695	2	1,54	0,39	38	0,3726	C0 - S1
INPET02 SIAGAS 3100023696	3,36	3,39	0,72	57	0,4322	C0 - S1
INPET03 SIAGAS 3100023697	3,47	2,58	0,74	62	0,4899	C0 - S1
INPET04 SIAGAS 3100023704	2,16	0,01	0,3	36,45	0,8375	C0 - S1
INPET05 SIAGAS 3100023705	2,58	1,73	0,43	37,92	0,4547	C0 - S1

INPET06 SIAGAS 3100023706	2,5	2,16	0,49	36,15	0,3994	C0 - S1
INPET07 SIAGAS 3100023707	4,13	1,21	0,81	54,01	0,7127	C0 - S1
INPET08 SIAGAS 3100023708	4,5	1	0,9	59,65	0,7861	C0 - S1
INPET09 SIAGAS 3100023709	4,01	1,42	0,92	59,27	0,6442	C0 - S1
INPET10 SIAGAS 3100023710	4,01	1,72	0,8	64,77	0,6332	C0 - S1
INPET11 SIAGAS 3100023711	4,6	1,86	0,87	68,18	0,6977	C0 - S1
INPET15 SIAGAS 3100023714	4	1,07	0,92	60,56	0,6847	C0 - S1
INPET20 SIAGAS 3100023715	4	0,88	6,79	57,02	0,317	C0 - S1
INPET21 SIAGAS 3100023716	3	4	5	44,37	0,2361	C0 - S1
INPET22 SIAGAS 3100023720	4	5	5,41	47,99	0,2952	C0 - S1
INPET24 SIAGAS 3100023721	3	0,9	6	702	0,2515	C2 - S1
INPET28 SIAGAS 3100023722	4,26	0,59	0,48	48,2	0,9979	C0 - S1
INPET30 SIAGAS 3100022815	1,5	2	2	34,15	0,1794	C0 - S1
INPET31 SIAGAS 3100022816	3,6	2	2	27,29	0,4307	C0 - S1
INPET35 SIAGAS 3100023726	3	20	0,85	114,2	0,1784	C1 - S1
INPET38 SIAGAS 3100023718	3	4	5	56,5	0,2361	C0 - S1
INPET43 SIAGAS 3100023685	6,48	17,8	1,32	123,13	0,399	C1 - S1
INPET52 SIAGAS 3100023729	9,65	7,09	1,62	131	0,8501	C1 - S1
INPET53 SIAGAS 3100022886	2	1,57	0,04	58,02	0,4303	C0 - S1
INPET54 SIAGAS 3100022887	3,75	4,58	0,04	66,53	0,4787	C0 - S1
INPET57 SIAGAS 3100023674	12	20	2,1	143	0,6818	C1 - S1
INPET58 SIAGAS 3100023678	4,9	5,5	0,55	88	0,5327	C0 - S1

INPET59 SIAGAS 3100023681	7,5	14	2,2	100	0,4916	C0 - S1
INPET61 SIAGAS 3100023687	22	20	0,82	175	1,3101	C1 - S1
INPET62 SIAGAS 3100023688	10	22	1,5	150	0,5562	C1 - S1
INPET63 SIAGAS 3100023698	13	29	2,8	188	0,617	C1 - S1
INSAO03 SIAGAS 3100023813	10,39	44	2,91	527,7	0,4093	C2 - S1
INTER14 SIAGAS 3100022756	1,5	3,2	0,97	59,78	0,1885	C0 - S1
INTER15 SIAGAS 3100023456	12,78	41,6	33,3	164,9	0,3582	C1 - S1
INTER16 SIAGAS 3100023456	12,14	35,2	28,2	158,1	0,3698	C1 - S1
PD_07_006.96_2019 Cond Dr Thouzet Poço 2	7,4	5,66	0,95	92,2	0,7576	C0 - S1
PD_07_006.96_2019 Cond Dr Thouzet Poço 3	10,4	5,87	0,54	123	1,1007	C1 - S1
PD_07_006.96_2019 Cond Dr Thouzet Poço1	6,53	1,23	0,04	75,1	1,5784	C0 - S1
PD-07_006.109_2019 Cervejaria Petropolis LC 01/02	4,22	0,5	1,32	99,26	0,7104	C0 - S1
PD-07_006.109_2019 Cervejaria Petropolis LC 03	6,46	0,5	2,09	142,1	0,8957	C1 - S1
PD-07_006.109_2019 Cervejaria Petropolis LC 05	4,83	0,5	1,71	107,72	0,7301	C1 - S1
PD-07_006.126_2018 GE Celma	5	1,31	1,37	77,7	0,7287	C0 - S1
PD-07_006.20_2018 Francisco Brandão Poço 1	3,5	4,4	1,9	94,9	0,351	C0 - S1
PD-07_006.20_2018 Francisco Brandão Poço 4	2,69	3,6	1	69,8	0,3232	C0 - S1
PD-07_006.20_2018 Francisco Brandão poço 6	4,39	7,2	3,1	110	0,3444	C1 - S1
PD-07_006.307_2019 Ed 16 de Março	10,08	10,7	1,85	131	0,7481	C1 - S1
PD-07_006.3232_2018 Chácara das Rosas	4,5	1,52	0,74	38,4	0,7484	C0 - S1
PD-07_006.36_2018 Cond Sta Monica P-01	12,8	6,75	6,06	240	0,8613	C1 - S1

PD-07_006.36_2018 Cond Sta Monica P-02	8,13	7,03	6,18	194,4	0,5394	C1 - S1
PD-07_006.6_2018 Cond Sítio da Ponte Poço 1	13,02	10	2,49	233,9	0,9542	C1 - S1
PD-07_006.6_2018 Cond Sítio da Ponte Poço 2	6,6	1,32	0,98	82,3	1,0605	C0 - S1
PD-07_006.6_2018 Cond Sítio da Ponte Poço 3	5,1	2,5	1,14	94,6	0,6708	C0 - S1
PD-07_006.67_2019 SMH	4,15	0,3	0,6	45,6	1,0065	C0 - S1
PD-07_006.67_2019 SMH	4,83	0,37	0,62	47,9	1,1272	C0 - S1
PD-07_006.72_2018 Cond Ed Mayworm	0,05	1,63	1,16	78,3	0,0073	C0 - S1
PD-07_006.83_2019 Green Valley	1,3	0,35	0,4	14,5	0,3563	C0 - S1
PD-07_007.149_2019 Sítio Queluz	7,85	1,69	2,92	111,8	0,8476	C1 - S1
PD-07_007.285_2019 Cond Bonclima	4,63	0,89	0,87	55,6	0,8361	C0 - S1
PD-07_007.339_2019 Cond Sesmarias	7,66	7,89	2,19	98	0,6217	C0 - S1
PD-07_007.510_Cond Pouso das Maitacas	15,44	19,42	1,58	200	0,9053	C1 - S1
PD-07_007.515_2019 Cond Sta Monica	7,67	7,87	2,17	96	0,6239	C0 - S1
PD-07_007.533_2019 Cond Gj Sta Lucia P-01	9,92	11,44	1,08	100	0,7508	C0 - S1
PD-07_007.533_2019 Cond Gj Sta Lucia P-02	10,39	9,08	1,22	100	0,8586	C0 - S1
PD-07_007.533_2019 Cond Gj Sta Lucia P-03	9,5	5,43	0,73	100	1,0151	C0 - S1
PD-07_007.84_2020 Associação Sítio Taquari	9,12	24,23	1,35	93,4	0,4879	C0 - S1
PD-07_007.84_2020 Associação Sítio Taquari	2,58	3,88	1,24	61,7	0,2918	C0 - S1
PD-07_009.267_2019 Cond Floresta I	17,65	34,82	5,39	355,1	0,7347	C2 - S1
PD-07_014.100_2016 Petro Ita	7,46	4,36	0,45	38,8	0,9089	C0 - S1
PD-07_014.137_2017 Vadecar	33,61	39,89	6,78	425,5	1,2944	C2 - S1
PD-07_014.156_2020 AR Empreendimentos Poço 1	106,6	38,53	14,12	575	3,7322	C2 - S1

PD-07_014.156_2020 AR Empreendimentos poço 2	101,21	37,66	17,25	516	3,4268	C2 - S1
PD-07_014.159_2018 Bacco Patrimonial	9,61	7,84	1,92	231,5	0,7973	C1 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 10	7,15	13,1	3,32	101,2	0,4566	C1 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 11	5,36	18,78	7,55	56,4	0,264	C0 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 12	9,25	14,82	4,25	106,2	0,545	C1 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 13	10,22	12,6	3,61	57,2	0,6531	C0 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 14	5,66	20,4	5,82	24,1	0,2844	C0 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 2	7,41	7,89	2,04	163,4	0,608	C1 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 3	692	17,33	5,77	58,1	36,7638	C0 - S4
PD-07_014.430_2018 Paddock 4	451	6,98	2,03	155,3	38,6285	C1 - S4
PD-07_014.430_2018 Paddock 5	5,87	20,86	5,69	114,5	0,2938	C1 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 6	5,86	19,27	5,53	88,9	0,3027	C0 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 7	10,52	8,19	2,12	75	0,847	C0 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 8	4,12	37,12	10,02	138,5	0,1548	C1 - S1
PD-07_014.430_2018 Paddock 9	8,47	28,44	8,16	168,3	0,3602	C1 - S1
PD-07_014.563_2018 Cond Ed Lincoln	6,21	2,32	1,5	79,1	0,7809	C0 - S1
PD-07_014.589_2018 Albacete Poço 1	6,34	1,61	1,43	92,1	0,8763	C0 - S1
PD-07_014.649_2018 GE Celma PW 1	4,44	0,59	0,31	47,2	1,1648	C0 - S1
PD-07_014.649_2018 GE Celma PW 2	5,24	1	0,37	61,7	1,1367	C0 - S1
PD-07_014.649_2018 GE Celma PW 3	6,56	0,49	0,31	55,9	1,805	C0 - S1
PD-07_014.649_2018 GE Celma PW 4	6,14	0,74	0,33	65,1	1,4915	C0 - S1
PD-07_014.649_2018 GE Celma PW 6	9,08	0,5	0,16	47,3	2,8597	C0 - S1

SIPET01 SIAGAS 3100023694	2,11	1,97	0,43	41	0,3548	C0 - S1
SIPET02 SIAGAS 3100023715	5	2	0,87	69,92	0,7427	C0 - S1
SIPET09 SIAGAS 3100023675	12	9,7	11	156	0,6263	C1 - S1
SIPET11 SIAGAS 3100023680	4,9	5,5	0,55	0	0,5327	C0 - S1
SIPET12 SIAGAS 3100023712	5,57	2,49	0,94	73,47	0,7628	C0 - S1
SIPET19 SIAGAS 3100023677	4,3	2,16	0,04	49,91	0,793	C0 - S1
SIPET20 SIAGAS 3100023682	3,75	2,7	0,05	52,75	0,6186	C0 - S1
SIPET21 SIAGAS 3100023730	3,88	5,61	1,11	986	0,3915	C3 - S1
SISAP01 SIAGAS 3100023464	42,64	0,09	1,7	37,4	6,9052	C0 - S1