



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Nº 234

DETALHAMENTO DA CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA
AQUÍFERO R₃/Q₃ NO DISTRITO FEDERAL: BASES PARA A
GESTÃO SUSTENTÁVEL

ANNA CAROLINA DE BRITO MIRANDA

Orientador:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos

Brasília, Junho de 2025



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

DETALHAMENTO DA CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA AQUÍFERO R₃/Q₃ NO DISTRITO FEDERAL: BASES PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL

Dissertação apresentada à Universidade de Brasília, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Meio Ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

Brasília, Junho de 2025



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

**DETALHAMENTO DA CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA
AQUÍFERO R₃/Q₃ NO DISTRITO FEDERAL: BASES PARA A
GESTÃO SUSTENTÁVEL**

ANNA CAROLINA DE BRITO MIRANDA

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Eloi Guimarães Campos - IG/UnB (Presidente)
Profa. Adriana Chatack Carmelo - IG/UnB (Membro Interno)
Prof. Natanael da Silva Barbosa - IGEO/UFBA (Membro Externo)

Brasília, Junho de 2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pela autora:

M613d Miranda, Anna Carolina de Brito

DETALHAMENTO DA CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA AQUÍFERO
R3/Q3 NO DISTRITO FEDERAL: BASES PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL /

Anna Carolina de Brito Miranda; orientador José Eloi
Guimarães Campos. Brasília, 2025.

110 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)
Universidade de Brasília, 2025.

1. Hidrogeologia. 2. Modelagem Conceitual de Aquíferos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter conduzido cada passo desta caminhada e sustentado silenciosamente meus dias, mesmo nos momentos em que, por distração ou cansaço, estive ausente de mim mesma ou do sentido maior dessa jornada.

Aos meus pais, Carlos e Maria, por todo o amor, esforço e dedicação ao longo dos meus 26 anos. Pela paciência diante da minha constante ausência, e por compreenderem que, mesmo longe fisicamente ou emocionalmente, todo esse processo foi também por vocês e para vocês. Obrigada por sempre terem confiado e apoiado minhas escolhas, eu amo vocês.

Ao meu orientador, professor Eloi, pela paciência incansável, pelo apoio, empatia e pelas valiosas contribuições técnicas e acadêmicas oferecidas ao longo desta trajetória. Sua orientação foi fundamental na construção e desenvolvimento deste trabalho, deixando marcas enriquecedoras neste ciclo tão importante da minha vida.

Ao Theo, meu amor, pelo apoio e incentivo que me mostraram, por vezes, a força e o potencial que havia em mim para superar mais um desafio, com a certeza de que eu seria capaz de ir além por maior que ele fosse.

Às minhas amigas, em especial Sara e Luiza, pelas conversas sinceras, pelos desabafos acolhidos e pelos incentivos diários que tantas vezes me lembraram da minha capacidade. A amizade de vocês foi um apoio constante e uma lembrança leve de que eu não estava sozinha.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade de Brasília (UnB) e ao Instituto de Geociências (IG), pelo suporte institucional, acadêmico e financeiro, sem os quais este trabalho não teria se concretizado.

RESUMO

A caracterização de um aquífero funciona como a base fundamental para a gestão adequada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. Ao compreender as propriedades físicas e hidrodinâmicas do aquífero, é possível obter informações essenciais para avaliar a disponibilidade de água, a recarga e descarga do sistema, a qualidade do recurso hídrico e seu uso econômico sustentável. A presente pesquisa teve como foco o Subsistema Aquífero R₃/Q₃, importante reservatório do Distrito Federal que ocupa uma área de 1.400 km², equivalente a 20% da poligonal distrital. Essa ampla distribuição espacial, associada a existência de poços de alta produtividade (elevadas vazões médias) e restrita incidência de poços secos, torna esse subsistema aquífero o mais importante para a região, com grande utilização para o complemento do abastecimento de condomínios, clubes esportivos, indústrias, comunidades isoladas e propriedades rurais. Apesar de sua ampla importância, ainda existem lacunas e incertezas sobre sua caracterização e comportamento de fluxo de água. Dessa forma, este trabalho visou à proposição de um novo modelo conceitual para o Subsistema Aquífero R₃/Q₃, com definição de parâmetros hidrodinâmicos, estimativas de reservas hídricas, avaliação dos riscos de sobreexploração e proposição de ações que permitam o uso sustentável dos recursos hídricos do aquífero. A partir dessa caracterização detalhada, será possível tomar decisões sobre as melhores práticas para a captação da água, a proteção contra a contaminação, a implementação de medidas de conservação e a gestão integrada dos recursos hídricos. Esses resultados contribuem para garantir o uso sustentável do aquífero e a segurança hídrica para os usuários, bem como a mitigação de problemas relacionados à futura escassez hídrica. Dentre os principais resultados da pesquisa destacam-se: a proposição embasada em dados de um modelo conceitual de dupla porosidade aplicável à parte do Subsistema Aquífero R₃/Q₃; as estimativas das reservas hídricas subterrâneas considerando o novo modelo (com ampliação dos volumes em comparação com a concepção anterior); proposição de ações para a gestão; e determinação das condições de recarga.

Palavras-chave: aquífero fraturado, gestão de águas subterrâneas, modelo conceitual, testes de bombeamento.

ABSTRACT

The characterization of an aquifer is the fundamental basis for the proper and sustainable management of groundwater resources. By understanding the physical and hydrodynamic properties of the aquifer, it is possible to obtain essential information to assess the availability of water, the system recharge and discharge, the quality of the water resource and its sustainable economic use. The present research focused on the R₃/Q₃ Aquifer Subsystem, an important reservoir in the Federal District, Brazil that occupies an estimated area of 1,400 km², equivalent to 20% of the state polygonal. This wide spatial distribution associated with the existence of high productivity wells (high average yield) and restricted incidence of dry wells, makes this aquifer subsystem the most important for the region, applied to complement the supply of condominiums, sports clubs, industries, isolated communities and rural properties. Despite its wide importance, there are still gaps and uncertainties about its characterization and water flow behavior. Thus, this research aimed to propose a new conceptual model for the R₃/Q₃ Aquifer Subsystem, with definition of hydrodynamic parameters, estimates of water reserves, assessment of overexploitation risks and contamination and proposition of management assessment that allow the sustainable use of the groundwater resources. Through this detailed characterization, it is possible to make decisions about the best practices for water abstraction, contamination prevention, implementation of conservation measures, and the integrated management of water resources. These results contribute to ensuring the sustainable use of the aquifer and water security for users, as well as the mitigation of problems related to future water scarcity. Among the main results of the research, the following stand out: proposition, based on data, of a conceptual model of double porosity applicable to part of the R₃/Q₃ Aquifer Subsystem; estimates of groundwater reserves considering the new model (with increased volumes compared to the previous conception); proposal of measures for management; and determination of recharge conditions.

Keywords: fractured aquifer, groundwater management, conceptual model, pumping tests.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO.....	3
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.4.1 Trabalhos de Campo	5
1.4.2 Confecção de Lâminas Delgadas	5
1.4.3 Tratamento e Integração de Dados para os Testes de Bombeamento	5
1.4.4 Interpretação Geofísica	6
CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	8
2.1 MEIO FÍSICO	8
2.1.1 Geologia.....	8
2.1.2 Geologia Estrutural	13
2.1.3 Geomorfologia	15
2.1.4 Pedologia.....	17
2.1.5 Caracterização Climática	19
2.2 HIDROGEOLOGIA.....	20
2.2.1 Domínio Freático	22
2.2.2 Domínio Fraturado	23
2.2.3 Domínio Físsuro-Cárstico	24
2.3 MODELOS CONCEITUAIS DOS AQUÍFEROS	25
CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE TRATAMENTO DE DADOS DE TESTES DE BOMBEAMENTO EM AQUÍFEROS ANISOTRÓPICOS ...	29
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.1.1 Modelos Analíticos em Testes de Bombeamento e sua Aplicação no AquiferTest	31
3.1.2 Panorama do Distrito Federal e Aplicação dos Testes de Bombeamento	32
3.1.3 Variáveis Críticas e Limitações Técnicas na Aplicação dos Testes de Bombeamento	33
3.2 ESTUDO DE CASO - SUBSISTEMA AQUÍFERO R ₃ /Q ₃ NO DISTRITO FEDERAL .	36
3.2.1 Materiais e Métodos.....	37
3.2.2 Resultados e Discussões	39
3.2.3 Considerações Finais	47

CAPÍTULO IV - PROPOSTA DE ENQUADRAMENTO DO SUBSISTEMA	
AQUÍFERO R₃/Q₃ COMO RESERVATÓRIO DE DUPLA POROSIDADE ...	48
4.1 APLICAÇÃO DO CONCEITO DE AQUÍFERO DE DUPLA POROSIDADE	48
4.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE DUPLA POROSIDADE AO SUBSISTEMA R ₃ /Q ₃ ..	52
4.2.1 Desenvolvimento do Modelo Conceitual de Dupla Porosidade na Porção Superior do Subsistema R ₃ /Q ₃	52
4.2.2 O Papel da Porosidade Planar Primária	55
4.2.3 O Papel da Porosidade Intergranular Secundária.....	56
4.2.4 Evidências em afloramentos	57
4.2.5 Dados de Seções Delgadas.....	63
4.3 NEOTECTÔNICA	67
4.4 RESPOSTA GEOFÍSICA DO SUBSISTEMA R ₃ /Q ₃	68
CAPÍTULO V - DISCUSSÕES	73
5.1 MODELO CONCEITUAL	73
5.1.1 Novo Modelo Conceitual do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ : Integração da Porosidade Matricial	74
5.2 ESTIMATIVA DE RESERVAS HÍDRICAS	78
5.2.1 Cálculo das Reservas do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ (Fraturado)	79
5.2.2 Cálculo das Reservas do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ (Dupla Porosidade)	80
5.2.3 Comparação dos Modelos e Implicações para a Gestão Hídrica	81
5.3 SUSTENTABILIDADE DE EXPLOTAÇÃO DO SUBSISTEMA AQUÍFERO R ₃ /Q ₃ ..	83
5.3.1 Conceito de Sobreexploração	83
5.3.2 Histórico de Ocupação e Demanda Hídrica no Distrito Federal.....	84
5.3.3 Sustentabilidade da Exploração Subterrânea no Distrito Federal Diante da Escassez de Dados	84
5.3.4 Diretrizes para a Gestão Sustentável da Exploração do Subsistema R ₃ /Q ₃	85
5.4 AVALIAÇÃO DA RECARGA DO SUBSISTEMA AQUÍFERO R ₃ /Q ₃	86
5.4.1 Diferenças no Processo de Recarga entre os Modelos Fraturado e de Dupla Porosidade no Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃	87
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
6.1 CONCLUSÕES.....	91
6.2 RECOMENDAÇÕES	93
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa hidrogeológico do DF e seus domínios fraturado e fissuro-cárstico, com foco ao Subsistema R ₃ /Q ₃ , Sistema Paranoá (modificado de Campos e Freitas-Silva 1998).	2
Figura 1.2 - Mapa de localização e acessos à área de estudo.	4
Figura 1.3 - Dados de entrada, curva gerada pelo método Moench (1984) e parâmetros adotados para análise no software AquiferTest.	6
Figura 2.1 - Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá na área-tipo de Alto Paraíso de Goiás/Distrito Federal (modificada de Faria 1995).	9
Figura 2.2 - Metarritmito da Formação Serra da Meia Noite. Afloramento localizado em corte de estrada no balão de entroncamento da BR-020 com a GO-118.	10
Figura 2.3 - Camadas milimétricas e centimétricas do metarritmito da Formação Serra da Meia Noite. Afloramento com mesma localização do ponto anterior.	10
Figura 2.4 - Contato brusco entre metarritmitos da Formação Serra da Meia Noite e quartzitos da Formação Ribeirão Contagem. Afloramento localizado em corte de estrada no balão de entroncamento da BR-020 com a GO-118.	12
Figura 2.5 - Quartzito fino e puro com elevada maturidade textural e mineralógica com raros grãos de feldspatos alterados.	12
Figura 2.6 - Metarritmito da Formação Serra da Meia Noite aflorante na DF-410. Observa-se uma dobra em Chevron, com rompimento do plano axial, gerando zona de fraqueza na anticlinal. Nota-se os planos de acamamento bem marcados que funcionam como “fraturas de alívio”. O elevado ângulo das estruturas planares favoreceram a percolação/infiltração mais eficiente das águas superficiais.	14
Figura 2.7 - Quartzito da Formação Ribeirão Contagem aflorante no Domo do Pipiripau, com mergulho do plano do acamamento sedimentar de 40° N e desenvolvimento de clivagens de fratura de alto ângulo.	15
Figura 2.8 - A) Perfil de Latossolo Vermelho Distrófico com a seguinte sequência de horizontes: A (0- 30 cm) – AB (30-64 cm) – Bw1 (64-123 cm) – Bw2 (123-175 cm) – Bw3 (175-208 cm+) e B) Perfil de Neossolo Quartzarênico com a seguinte sequência de horizontes: A (0-20 cm) – AC (20-58 cm) – C1 (58-76 cm) – C2 (76-92 cm+).	19
Figura 2.9 - Esquema do modelo das duas superfícies potenciométricas, onde: S.P.M.P. - Superfície Potenciométrica do Meio Poroso; S.P.M.F. - Superfície Potenciométrica do Meio Fraturado (Lousada, 2005).	26
Figura 3.1 - Localização dos poços de bombeamento no Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ .	38
Figura 3.2 - Curva de rebaixamento do teste TB3. Comportamento típico de aquífero fraturado: rebaixamento rápido e constante ao longo do tempo, sem inflexões, indicando predomínio de fluxo em fraturas conectadas e baixa contribuição da matriz porosa.	40
Figura 3.3 - Curva de rebaixamento do TB12. Comportamento típico de aquífero de dupla porosidade: rebaixamento amortecido, múltiplas fases e estabilização precoce, com participação expressiva da matriz porosa na sustentação do fluxo ao longo do tempo.	41
Figura 3.4 - Ajuste dos modelos analíticos Warren e Root e Moench, respectivamente, aplicados ao teste TB-3, localizado na borda da chapada. Os resultados indicam comportamento gráfico similar entre os dois modelos, sugerindo que, nesta região, o escoamento é dominado por fraturas com baixa contribuição da matriz porosa. A resposta hidráulica do sistema pode ser adequadamente representada pelos dois métodos.	42
Figura 3.5 - Comparação entre os ajustes dos modelos analíticos aplicados aos testes TB-15 e TB-22, localizados no interior das chapadas. Observa-se que o modelo de Moench apresentou melhor	

aderência às curvas de rebaixamento, principalmente na fase de transição, que evidencia a influência do mecanismo de dupla porosidade nesses setores. A modelagem com o modelo de Moench captura de forma realista o fluxo retardado proveniente da matriz porosa, comportamento que justifica seu melhor ajuste.	43
Figura 4.1 - Plano de acamamento bem definido em metarritmito, evidenciando porosidade planar primária associada à estrutura deposicional da rocha (acamamento).	55
Figura 4.2 - Quartzito intemperizado exibindo porosidade intergranular secundária resultante da dissolução parcial dos cimentos silicáticos entre os grãos.	57
Figura 4.3 - Localização dos poços de bombeamento no Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃	58
Figura 4.4 - Sequência de amostras mesoscópicas de quartzito que ilustra a sequência contínua de alteração e evolução da porosidade, do nível mais intemperizado (friável), com visível desagregação dos grãos e perda de coesão, que predomina porosidade intergranular, até o nível mais maciço fortemente silicificado (compacto) com porosidade única planar secundária. A sequência evidencia a heterogeneidade textural e estrutural típica da dupla porosidade, fundamental para o comportamento hidrogeológico do aquífero R ₃ /Q ₃	59
Figura 4.5 - A) Croqui do Ponto 1 no contato entre as formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem. B) Contato do quartzito parcialmente intemperizado (Q1) e metarritmito (R3) com plano de acamamento expressivo. C) Quartzito com fraturas abertas e zona friável com porosidade intergranular residual, que indica presença de duas porosidades na mesma unidade litológica. D) Em metarritmito observa-se porosidade intergranular na matriz alterada por dissolução e planos de acamamento como porosidade planar primária. E) Quartzito composto por rocha parcialmente intemperizada (Q3). F) Porção intemperizada representada por areias com porosidade exclusivamente intergranular. G) Porção intermediária com intemperismo parcial e início de desagregação, com dupla porosidade. H) Porção silicificada com fraturas abertas, com porosidade exclusivamente secundária planar.	60
Figura 4.6 - A) Camadas com planos de acamamento bem definidos, o que indica que mesmo após o metamorfismo evidencia sua resistência e continuidade estrutural. B) A oxidação é sinal de fluxo preferencial ao longo dessas superfícies, o que confirma sua relevância como elemento condutor horizontal, estruturando o fluxo subterrâneo e sustentando a hipótese da dupla porosidade.	61
Figura 4.7 - A) Dobra em chevron no metarritmito com planos de acamamento bem marcados por alívio de tensão. B) Porosidade planar ampliada sem a presença de fraturamento.	62
Figura 4.8 - A) Contato entre bloco de quartzito maciço e metarritmito estratificado. B) Quartzito densamente fraturado, com porosidade planar evidente. C) Metarritmito com matriz alterada com veios de quartzo preenchendo a porosidade planar.	62
Figura 4.9 - A) Metarritmito com fraturas preenchidas por veios de quartzo, indício de circulação de fluidos e possível alteração hidrotermal. B) Detalhe da coexistência de porosidade intergranular, associada à matriz intemperizada, e fraturas preenchidas.	63
Figura 4.10 - Quartzito fraturado e silicificado. Porosidade exclusivamente secundária planar, com poros primários completamente cimentados por quartzo.	64
Figura 4.11 - Quartzito com início de abertura de porosidade intergranular. A dissolução parcial do	65
Figura 4.12 - Quartzito com dupla porosidade. Predomínio da porosidade intergranular sobre a fraturada, evidenciando intemperismo avançado. Os grãos de feldspato apresentam-se alterados e parcialmente removidos.	65

Figura 4.13 - Quartzito intensamente intemperizado. Porosidade exclusivamente intergranular, com matriz desagregada e fraturas pouco ativas.....	66
Figura 4.14 - Contato de aquífero de dupla porosidade com poros matriciais e intergranulares (porção superior da imagem), com porção intensamente silicificada e micro fraturada classificada como meio exclusivamente fraturado (porção inferior).	66
Figura 4.15 - Localização dos perfis do levantamento geofísico de eletrorresistividade (ADASA, 2018) e seções escolhidas para avaliação no presente estudo.	69
Figura 4.16 - Seção da resistividade do modelo invertido (inversão por quadrados mínimos) com a topografia local e respectiva interpretação pedo-geológica. A porção mais condutiva sob as coberturas de solos entre 80 e 120 metros é interpretada como região potencial de ocorrência de aquífero associado ao modelo de duas porosidades.	71
Figura 4.18 - Seção da resistividade aparente (inversão por quadrados mínimos) com topografia e interpretação pedo-geológica. Toda a região entre 160 e 220 metros é interpretada como potencialmente associada a dupla porosidade.....	71
Figura 4.19 - Seção de resistividade com inversão a partir do método dos quadrados mínimos, com a topografia e interpretação pedo-litológica. O trecho entre 210 e 300 metros com profundidade entre 15 e 50 metros é reinterpretado como representativo da dupla porosidade. ...	72
Figura 5.1 - Croqui esquemático da estruturação hidroestratigráfica tradicionalmente atribuída ao Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ nas áreas de chapadas elevadas no Distrito Federal. A configuração mostra uma zona superficial com porosidade intergranular (solo e saprolito), sobreposta diretamente a uma zona de rocha fraturada.....	74
Figura 5.2 - Croqui esquemático representando o novo modelo conceitual proposto para o Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ . A estruturação vertical compreende três zonas distintas: (i) Camada superficial de regolito espesso com porosidade predominantemente intergranular; (ii) Zona intermediária com comportamento típico de dupla porosidade, caracterizada pela interação entre matriz porosa alterada e planos condutores; e (iii) Zona profunda de rocha sã, com fluxo concentrado em fraturas com desenvolvimento variável.	76
Figura 5.3 - Bloco-diagrama esquemático do novo modelo conceitual proposto para o Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ nos planos elevados do Distrito Federal. A ilustração representa a compartimentação vertical do sistema em três zonas hidroestratigráficas: uma zona superior com porosidade intergranular dominante (saprolito) uma zona intermediária de dupla porosidade (matriz e fraturas em interação) e uma zona inferior fraturada (rocha sã), onde o fluxo ocorre principalmente pelas fraturas. O modelo expressa a transição gradativa entre os domínios porosos e fraturados, incorporando os controles litológicos e geomorfológicos sobre o fluxo subterrâneo, e fundamenta a reinterpretação do sistema como aquífero de dupla porosidade.....	78
Figura 5.4 - O gráfico apresenta a comparação entre os volumes estimados de reserva renovável, permanente e explotável do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ com base em dois modelos conceituais. O modelo fraturado, de 2007, representado pelas barras cinza-claro, considera o aquífero como um sistema exclusivamente fraturado, enquanto o modelo de dupla porosidade, de 2025, representado pelas barras cinza-escuro, incorpora três compartimentos verticais (saprolito, zona de transição e fraturado profundo). Os resultados mostram aumento expressivo nas reservas permanente e explotável, com maior potencial de armazenamento e uma representação mais realista da dinâmica hídrica do sistema.....	82
Figura 5.5 - Comparação esquemática entre os mecanismos de recarga no Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ conforme os modelos fraturado e de dupla porosidade, com ênfase nas diferenças de intensidade, distribuição e tipo de fluxo. (A) No modelo tradicionalmente classificado como	

aquífero fraturado, a recarga é predominantemente pontual e ocorre quase exclusivamente através de fraturas abertas conectadas diretamente à superfície. As setas horizontais amarronzadas indicam o *interflow*, reflexo da impermeabilidade da rocha fraturada que diminui o fluxo hídrico do aquífero fraturado. As setas azuis finas e localizadas representam o fluxo concentrado e rápido pelas fraturas verticais, enquanto a matriz atua apenas como meio de suporte, sem armazenamento efetivo. A baixa espessura da zona de alteração e a limitada conectividade entre fraturas reduzem a capacidade de infiltração e a eficiência do armazenamento. **(B)** No modelo de dupla porosidade a recarga é difusa, vertical e progressiva. A água se armazena temporariamente na matriz porosa, sendo liberada gradualmente para as fraturas profundas, que funcionam como condutos preferenciais. As setas de diferentes espessuras e tonalidades indicam a multiplicidade dos caminhos de fluxo e a variabilidade quantitativa de percolação entre os domínios poroso e fraturado. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos Domínios, Sistemas e Subsistemas Aquíferos do Distrito Federal e suas respectivas vazões médias (atualizado de Campos e Freitas-Silva, 1999).....	22
Tabela 2.2 - Características dimensionais dos do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ . Dados de 27 testes de bombeamento de 24 horas em tubulares profundos, com bombeamento contínuo. Dados obtidos com a utilização do software AquiferTest para aquíferos fraturados (método de Moench). (ADASA, 2018).	24
Tabela 3.1 - Comparação entre os principais modelos analíticos aplicáveis em testes de bombeamento, com base em suas características conceituais, parâmetros estimáveis e adequação ao Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ do Grupo Paranoá. A tabela destaca os pressupostos estruturais de cada modelo, os domínios de porosidade representados, a fase do ensaio mais bem ajustada por cada abordagem e os limites de aplicabilidade em sistemas com comportamento composto ou de dupla porosidade. T - Transmissividade; S - Armazenamento; σ - Fator de pele; γ - Fator de troca.	33
Tabela 3.2 - Resumo estatístico dos parâmetros hidrodinâmicos (T, K, S), das vazões de estabilização (Q) e da espessura da zona saturada (b) dos 24 testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃ , com valores mínimos, máximos e médios estimados a partir dos modelos de Moench (1984) e Warren e Root (1963).....	44
Tabela 3.3 - Parâmetros hidrodinâmicos e vazões obtidos em poços localizados no interior das chapadas, evidenciando os maiores valores de T, K, S, Q e b associados à contribuição da matriz porosa e à maior espessura saturada típica da porção planáltica do aquífero.	46
Tabela 3.4 - Parâmetros hidrodinâmicos e vazões obtidos em poços localizados nas bordas das chapadas, caracterizados por menores valores médios de T, K, S, Q e b, compatíveis com um comportamento fraturado com menor espessura saturada e baixa conectividade hidráulica.....	46
Tabela 4.1 - Representação dos tipos de porosidade presentes na porção superior do Subsistema R ₃ /Q ₃ , destacando sua coexistência e características como origem, processo gerador e função hidrogeológica.....	58
Tabela 5.1 - Tabela comparativa detalhado entre o modelo clássico de aquífero fraturado e o modelo de aquífero de dupla porosidade, que destaca os principais aspectos hidrogeológicos que diferenciam os dois modelos e suas implicações na recarga do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃	90
Tabela 6.1 - Tabela comparativa detalhada entre o modelo clássico de aquífero fraturado e o modelo de aquífero de dupla porosidade, com foco nas particularidades do Subsistema Aquífero R ₃ /Q ₃	92

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS

A água subterrânea é o recurso natural mais extraído do subsolo brasileiro (Hirata *et al.*, 2019). O total de água bombeada para os mais variados fins pelos 2,5 milhões de poços tubulares supera os 17.580 Mm³/ano, volume que seria suficiente para abastecer anualmente a população brasileira (Hirata *et al.*, 2019). Segundo a Agência Nacional de Águas (2010), 52% dos 5.570 municípios brasileiros são abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por esse recurso subterrâneo.

Nesse sentido, os dados apresentados pelo Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2021) mostram um aumento exponencial na demanda desse insumo nas últimas décadas em diversas aplicações (abastecimento das cidades, a indústria e a agricultura irrigada), fato que pode ser justificado pelo desenvolvimento econômico, crescimento populacional e às mudanças nos padrões de consumo.

Desse modo, a água subterrânea é um insumo essencial para a sustentabilidade da agricultura, funcionamento das atividades industriais e para o desenvolvimento econômico de uma região. Adicionalmente, é estrategicamente utilizada no enfrentamento dos problemas advindos das mudanças climáticas globais e eventuais crises hídricas. Isso ocorre porque 97% de toda a água líquida e doce do planeta está presente nos aquíferos (USGS, 2019). Esse reservatório possibilita a regularização de corpos hídricos superficiais e a manutenção do abastecimento de água, mesmo em longos períodos de estiagem.

No contexto brasileiro, essa alternativa de abastecimento torna-se importante e necessária quando é analisado o balanço de massa hidrológico com declínio nos valores médios anuais de precipitação e períodos de estiagem anômalos e prologados, registrados na última década (ANA, 2021). Desse modo, os desafios em um cenário de crescentes demandas por água e os efeitos da degradação ambiental dos ecossistemas reforçam a necessidade de planos de ação de uso sustentável das águas subterrâneas se desenvolva com sustentabilidade e segurança, a fim de possibilitar maior conscientização e proveito em seu amplo uso, tanto em vertentes antrópicas quanto ambientais.

Nesse sentido, como o Subsistema Aquífero R₃/Q₃ é um manancial que apresenta lacunas de informações hidrogeológicas, a presente pesquisa busca detalhar esse reservatório hídrico de forma a ampliar o conhecimento sobre seu modelo de circulação de água e otimizar aplicações referentes a este importante reservatório do Distrito Federal.

Na literatura hidrogeológica, o Subsistema R₃/Q₃ é compreendido como um aquífero fraturado (Campos e Freitas-Silva, 1999), porém estudos recentes indicam que este aquífero pode ter sua caracterização ampliada, sendo pelo menos em parte enquadrado como um aquífero de dupla porosidade (Paula e Campos, 2016). Um aquífero é definido como de dupla porosidade quando coexistem espaços porosos intergranulares residuais e secundários planares na mesma unidade hidroestratigráfica (Barenblatt *et al.*, 1960).

Esse subsistema é considerado o principal reservatório fraturado do Distrito Federal por apresentar poços com vazões maiores do que a média dos demais poços e por ocupar mais de 20% da área do território distrital (Figura 1). Ademais, este aquífero apresenta restrita ocorrência de poços secos ou de baixa vazão sendo de grande importância no complemento do abastecimento de clubes esportivos, indústrias, comunidades isoladas e propriedades rurais.

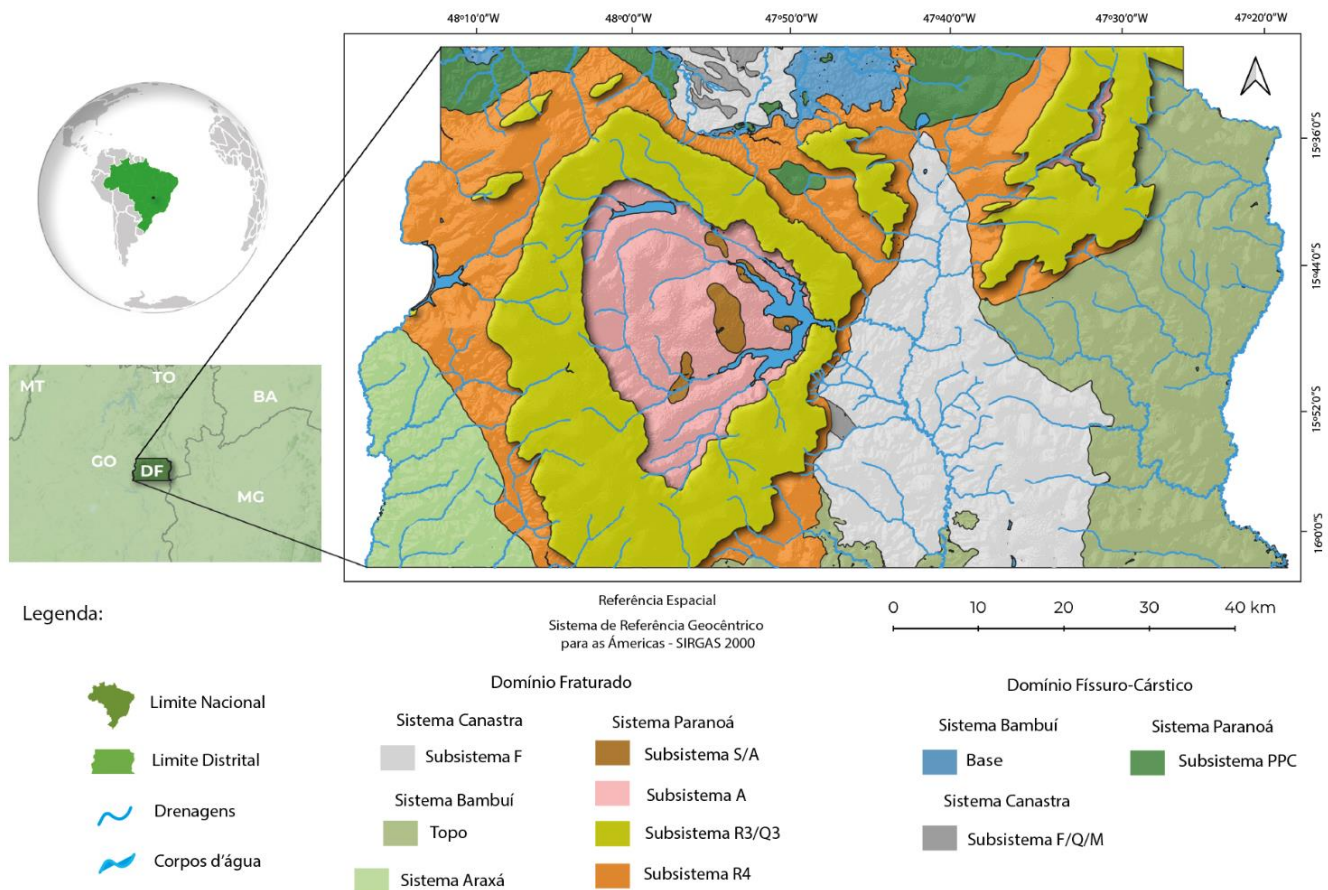


Figura 1.1 - Mapa hidrogeológico do DF e seus domínios fraturado e fissuro-cárstico, com foco ao Subsistema R₃/Q₃, Sistema Paranoá (modificado de Campos e Freitas-Silva 1998).

Desde a definição do Subsistema R₃/Q₃ por Campos e Freitas-Silva (1998), o conhecimento sobre o modelo conceitual, os mecanismos de circulação das águas, a transferência de água entre os aquíferos e as estimativas de reserva não sofreram avanço significativo. A título

de exemplo cita-se o modelo das “Duas Superfícies Potenciométricas” proposto por Lousada (2005) e Lousada e Campos (2005) aplicado ao Subsistema R₃/Q₃ para as regiões de chapada do território distrital (Novaes Pinto, 1987).

A justificativa da presente pesquisa se deve as lacunas no conhecimento hidrogeológico do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ que pode comprometer a evolução dos conceitos relacionados as estimativas das reservas hídricas, condição de recarga, mecanismos de circulação das águas (da recarga até a descarga), vulnerabilidade e risco a contaminação úteis na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Assim, por meio da caracterização detalhada desse subsistema, espera-se obter interpretações precisas que possam subsidiar tomadas de decisões embasadas em critérios técnicos, com o objetivo de promover a conservação desse importante reservatório aquífero. Assim, é esperado que os dados auxiliem na ampliação do conhecimento de outros aquíferos fraturados na região do Distrito Federal e entorno, a exemplo do Subsistema R₄, também vinculado ao sistema Paranoá.

1.2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal caracterizar o Subsistema Aquífero R₃/Q₃, com vistas ao aprimoramento da gestão dos recursos hídricos do reservatório em questão.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Definir o padrão de fluxo da água subterrânea e a circulação entre os aquíferos;
- Obter os parâmetros hidrodinâmicos (K, T, S) com base em dados de testes de bombeamento;
- Redefinição do modelo conceitual de fluxo do Subsistema Aquífero R₃/Q₃;
- Interpretar a resposta de dados de tomografia elétrica em diferentes condições aquíferas;
- Cartografar e determinar as principais áreas de recarga;
- Propor diretrizes para aperfeiçoar o sistema de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região centro-oeste do Brasil, nas porções centro-oeste e nordeste do Distrito Federal, distribuídos uma área de 1.391 km² (Figura 1.2). A porção centro-oeste corresponde aos arredores do Domo de Brasília, nas Chapadas da Contagem e de Brasília, que contorna a capital. O acesso a partir de Brasília é realizado pela via DF-004 no sentido Ponte JK, e finaliza na rodovia DF-001, que circunda a bacia hidrográfica do Lago Paranoá e dá acesso a toda a extensão da área de estudo. Em relação a porção nordeste, o acesso ocorre por meio da saída norte da cidade, através da rodovia BR-010, sentido Planaltina.

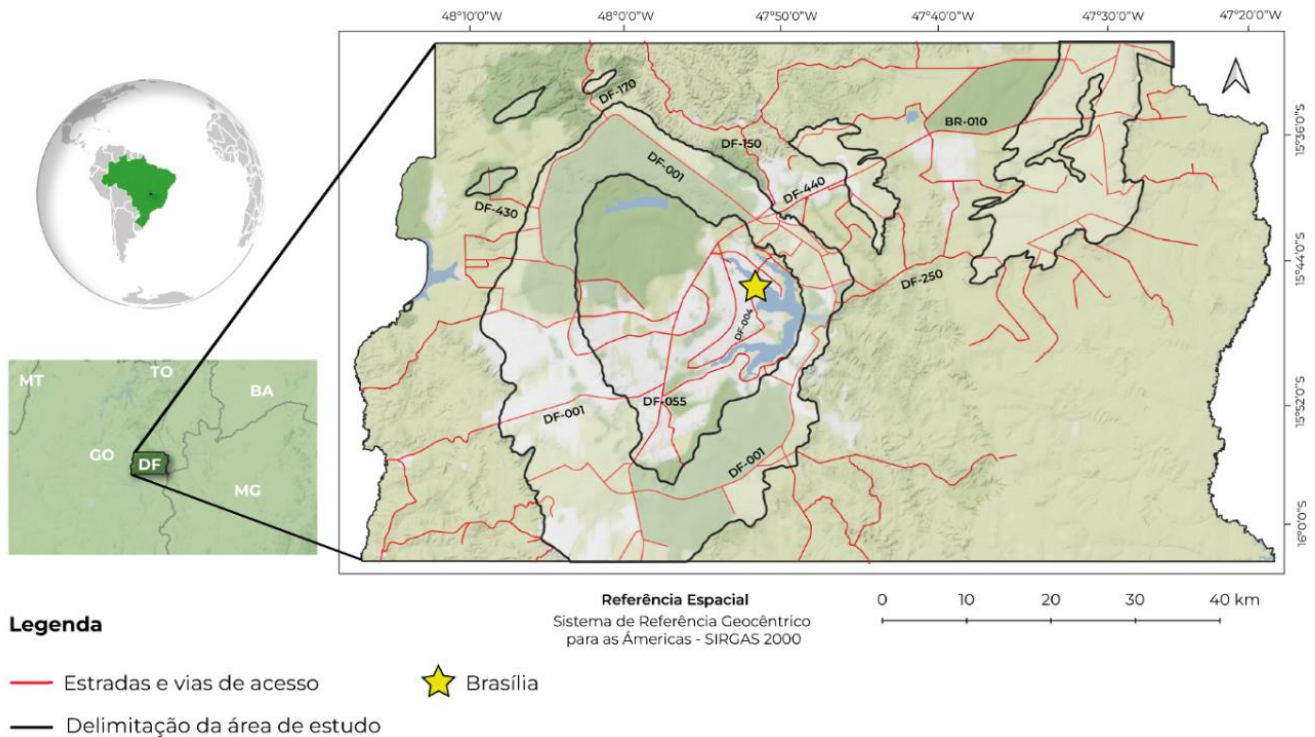


Figura 1.2 - Mapa de localização e acessos à área de estudo.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos propostos são subdivididos em quatro fases sequenciais: revisão bibliográfica, trabalhos de campo, tratamento e integração de dados e interpretação geofísica. Os dados foram avaliados por meio da integração de parâmetros coletados em poços tubulares perfurados na região, de relatórios dos poços cadastrados e observações de campo. Os métodos de interpretação foram aplicados para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, ou seja, a condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e transmissividade, por meio de ensaios de bombeamento.

A pesquisa envolveu a aplicação de métodos de interpretação da zona saturada dos aquíferos, interpretação geofísica, balanço hídrico e cálculo das reservas hídricas, com o intuito de caracterizar de forma eficiente o aquífero por meio da integração de dados coletados em campo obtidos na bibliografia, relacionados as vertentes climatológicas, pedológicas, geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas. A multidisciplinaridade é importante devido ao comportamento dos reservatórios subterrâneos no ciclo hidrológico, que interagem com fatores como as condições climáticas, regimes fluviais, condições de uso e ocupação do solo.

Neste tópico, serão apresentados os métodos gerais que fundamentam a abordagem adotada na dissertação. As metodologias específicas, aplicadas a cada etapa analítica (como testes de bombeamento, análises geofísicas e petrografia), serão detalhadas nos respectivos capítulos temáticos.

1.4.1 Trabalhos de Campo

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos em áreas de exposição do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, nas formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem, pertencentes ao Grupo Paranoá. Foram realizadas descrições detalhadas das litofácies em termos petrográficos e de porosidade em 5 áreas de afloramentos, para obtenção de dados primários referentes a geologia, estratigrafia, variações de fácies, pedologia e dados hidrodinâmicos das zonas vadosa e saturada. Durante o levantamento de campo, também foram efetuadas medidas de planos de fraturas, visando à determinação dos fluxos preferenciais relacionados às anisotropias presentes nas rochas, incluindo a atitude, abertura, densidade e tamanho das fraturas.

A amostragem de rochas contemplou diferentes graus de preservação – com distintos níveis de silicificação – sendo coletadas, no mínimo, quatro amostras de três conjuntos de quartzitos: (i) totalmente silicificados (em geral com coloração cinza clara a escura), (ii) parcialmente friáveis (com grau moderado de coesão, ainda permitindo corte por serra circular) e (iii) muito friáveis (de tonalidade branca, exigindo impregnação para confecção de lâminas delgadas). As amostras de rochas frescas e parcialmente alteradas foram submetidas a análises laboratoriais, com confecção de seções delgadas voltadas à avaliação da porosidade.

1.4.2 Confecção de Lâminas Delgadas

Durante os trabalhos de campo, foram coletadas amostras *in situ* em 5 áreas de afloramentos de diferentes regiões de exposição do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, localizados em na BR-020 em Planaltina, na DF-003 antre o Lago Norte e Sobradinho e na DF-095 em Taguatinga. Desses, um conjunto de amostras foi selecionada para a confecção de lâminas delgadas polidas para a análise petrográfica.

A seleção das amostras foi baseada nos diferentes graus de silicificação dos quartzitos (totalmente silicificado, parcialmente friável e muito friável) e nos tipos de poros potencialmente presentes nas amostras (intergranular, secundária planar e dos dois tipos). Para ampliar a efetividade da análise da porosidade, um corante de tonalidade azul foi dissolvido na resina utilizada para a confecção da lâmina delgada.

1.4.3 Tratamento e Integração de Dados para os Testes de Bombeamento

Os dados de testes de bombeamento foram interpretados com auxílio do software AquiferTest 10.0. Em geral, para um máximo de aproveitamento dos dados gerados, é fundamental que o método de análise seja o mais adequado ao modelo conceitual do aquífero em que os poços estão instalados.

No caso do trabalho em desenvolvimento foram testados e comparados os métodos de Warren e Root (1963) para aquíferos de dupla porosidade e de Moench (1984) para aquíferos fraturados.

Adicionalmente, a definição da espessura saturada do aquífero e a distância entre o poço de bombeamento e o poço de observação são informações importantes na interpretação dos ensaios de bombeamento. Como se trata de aquíferos fraturados, a espessura saturada foi estimada como 10% a mais que a profundidade do poço perfurado na zona de saturação. Considerando que todos os testes foram realizados sem poços de observação, as medições de rebaixamento foram feitas nos próprios poços de bombeamento. Nesses casos, a distância entre o poço de bombeamento e o ponto de observação foi fixada em 1 metro.

Essa escolha se justifica por razões numéricas e conceituais: nas equações utilizadas para análise dos testes, a variável radial (r) aparece elevada ao quadrado no denominador, o que torna valores muito pequenos (ex: 0,1 m) matematicamente instáveis, gerando distorções e alterações significativas na ordem de grandeza dos parâmetros hidráulicos calculados. Com $r = 1$ metro, obtém-se uma representação mais estável e realista do rebaixamento no entorno imediato do poço, evitando superestimções e mantendo a coerência com o comportamento físico observado, em que a diferença entre o rebaixamento junto à bomba e em sua vizinhança próxima é desprezível. A Figura 1.3 mostra um exemplo de ajuste de curva para interpretação de dado de teste de bombeamento de poço.

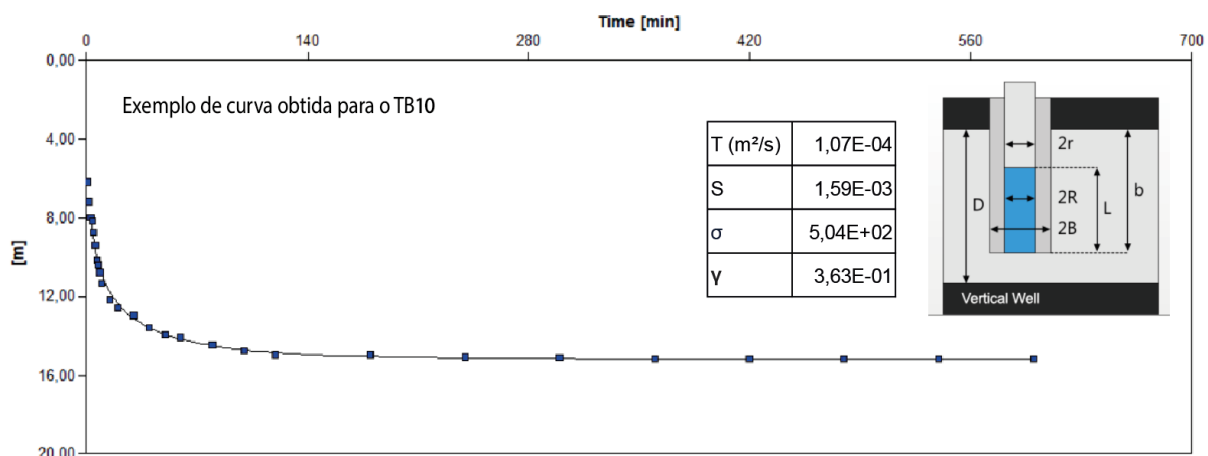


Figura 1.3 - Dados de entrada, curva gerada pelo método Moench (1984) e parâmetros adotados para análise no software AquiferTest.

1.4.4 Interpretação Geofísica

A análise geofísica do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ foi realizada a partir da interpretação de dados secundários disponibilizados no Relatório Técnico da ADASA (2018), o qual apresenta 29

perfis de eletrorresistividade adquiridos por meio do arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento de 10 metros entre os eletrodos. Os dados foram obtidos com o equipamento SYSCAL Pro 72, em linhas orientadas, preferencialmente, de forma perpendicular aos principais lineamentos estruturais regionais, com o objetivo de maximizar a interceptação de zonas de fraturamento e heterogeneidades litológicas.

O método da eletrorresistividade aplicado apresenta alta sensibilidade à presença de água nos poros da rocha, o que possibilita a identificação de zonas de saturação, intemperismo e condutividade anômala. A interpretação foi realizada com base em pseudo-seções de resistividade elétrica, considerando o comportamento esperado de diferentes materiais geológicos e níveis de saturação.

A caracterização geofísica do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ foi considerada um argumento adicional em favor da existência de um modelo de dupla porosidade, embora não constitua a evidência mais determinante ou conclusiva. Algumas seções de tomografia elétrica revelaram zonas de baixa resistividade, compatíveis com a presença de porosidade intergranular associada a material alterado e saprolítico, o que reforça a hipótese de coexistência entre domínios porosos e fraturados no sistema aquífero analisado.

A metodologia de interpretação considerou as seguintes diretrizes:

- Zonas contínuas de baixa resistividade (< 100 Ohm.m) foram interpretadas como indicativas de porosidade intergranular ou saprolitos espessos;
- Anomalias verticais descontínuas, com resistividade intermediária (100–300 Ohm.m), foram atribuídas à presença de fraturas saturadas ou zonas de fluxo preferencial vertical;
- Perfis com ambas as respostas foram classificados como representativos de dupla porosidade, quando havia conectividade entre zonas de alteração litológica e fraturas permeáveis.

CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 MEIO FÍSICO

2.1.1 Geologia

Campos e Freitas-Silva (1998) mostram que contexto geológico constitui o principal componente para a compreensão e caracterização de um aquífero, sua distribuição espacial, extensão lateral, áreas de recarga e descarga, camadas confinantes e bases impermeáveis. As unidades geológicas fornecem importantes informações sobre os tipos petrográficos, estratigrafia, tectônica e geoquímica, e são caracterizadas pelas suas propriedades intrínsecas (porosidade e permeabilidade), condições de ocorrência (extensão, espessura e estrutura) e grau de explotabilidade (boa, regular ou difícil).

Freitas-Silva e Campos (1998) delinearam o contexto geológico regional da área do Distrito Federal em quatro conjuntos litológicos de rochas metassedimentares, representado em 65% da área pelo Grupo Paranoá e 15% pelo Grupo Canastra, ambos do Mesoproterozoico. Em menor proporção, tem-se as unidades neoproterozoicas em 15% da área do Grupo Bambuí e 5% do Grupo Araxá (Campos, 2004). Sobrepostos a essas unidades têm-se os solos residuais e coberturas coluvionares recentes.

A estratigrafia do Grupo Paranoá registra variações laterais e verticais, com estratigrafia integrada que pode ser correlacionada regionalmente na porção mais externa da Faixa Brasília (Faria, 1995). As unidades litoestratigráficas foram denominadas informalmente por letras- código da base para o topo: SM, R₁, Q₁, R₂, Q₂, S, A, R₃, Q₃, R₄ e PC, posteriormente categorizadas em uma denominação formal por Campos *et al.*, (2013).

Com base na proposta de Faria (1995), as formações geológicas foram categorizadas em uma denominação formal com a definição das áreas-tipos, holoestratótipos e condições de deposição (Figura 2.1). Nesse trabalho, a descrição das formações que compõem o Subsistema R₃/Q₃ foi obtida e adaptada de Campos *et al.*, (2013).

Formação Serra da Meia Noite - Unidade R₃

A área-tipo e o holoestratótipo dessa unidade se encontra na estrada da Linha de Transmissão da Hidrelétrica Serra da Mesa, situada próximo ao Povoado do Garimpinho (município de Colinas do Sul). Em geral, ocorre adjacente a Unidade de ardósias (Formação Ribeirão do Torto) como superfícies planas, em cotas topográficas mais baixas que os topos da chapada da Contagem, no semidomo de Brasília (Campos *et al.*, 2013).

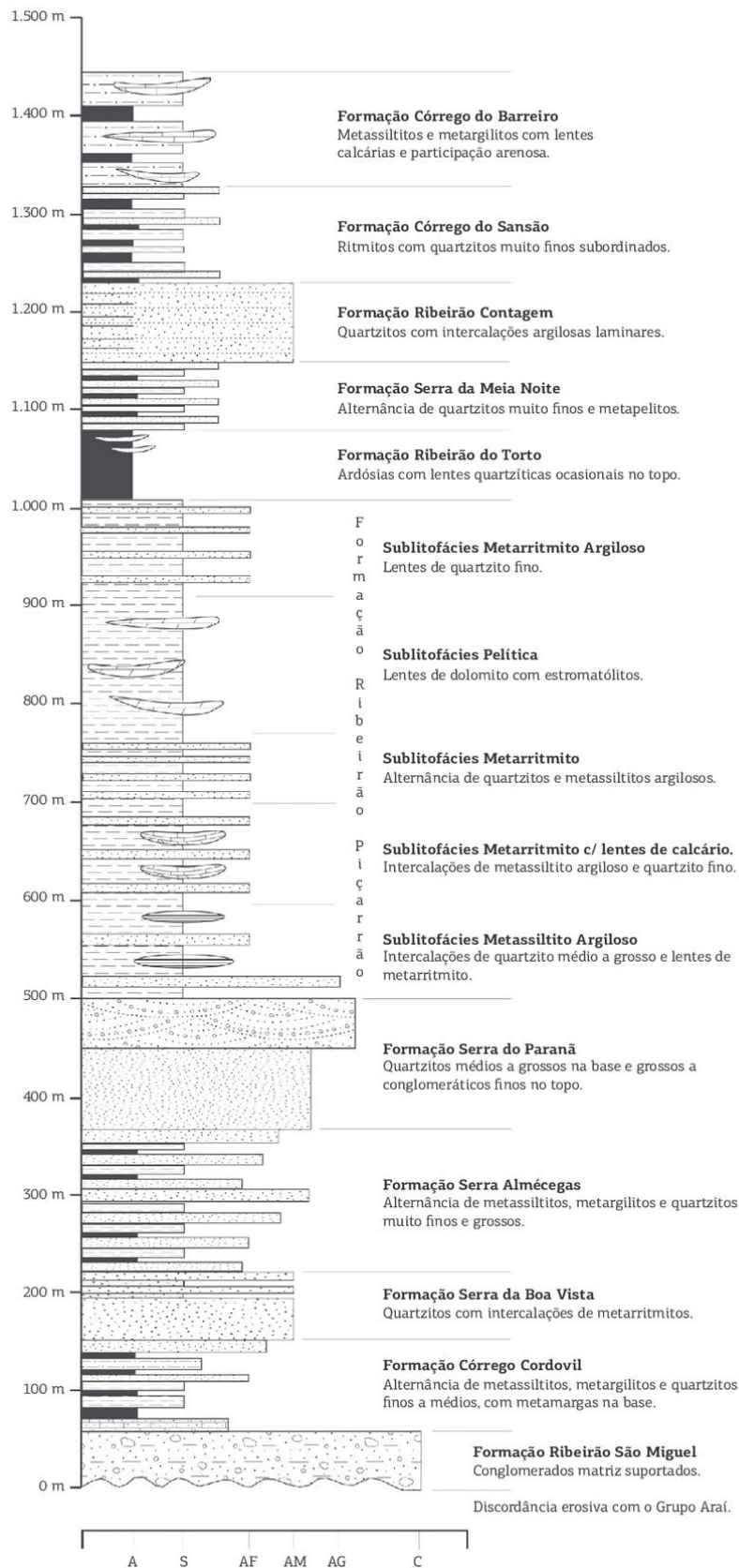


Figura 2.1 - Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá na área-tipo de Alto Paraíso de Goiás/Distrito Federal (modificada de Faria 1995).

A unidade é caracterizada por alternâncias de estratos centimétricos a métricos de quartzitos brancos finos a médios com níveis delgados de metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos e micáceos, com cores cinza escuros a rosados a avermelhados, quando próximo à superfície (Figuras 2.2 e 2.3). A quantidade relativa de material arenoso justifica a denominação deste pacote como unidade de metarritmito arenoso (Campos *et al.*, 2013).

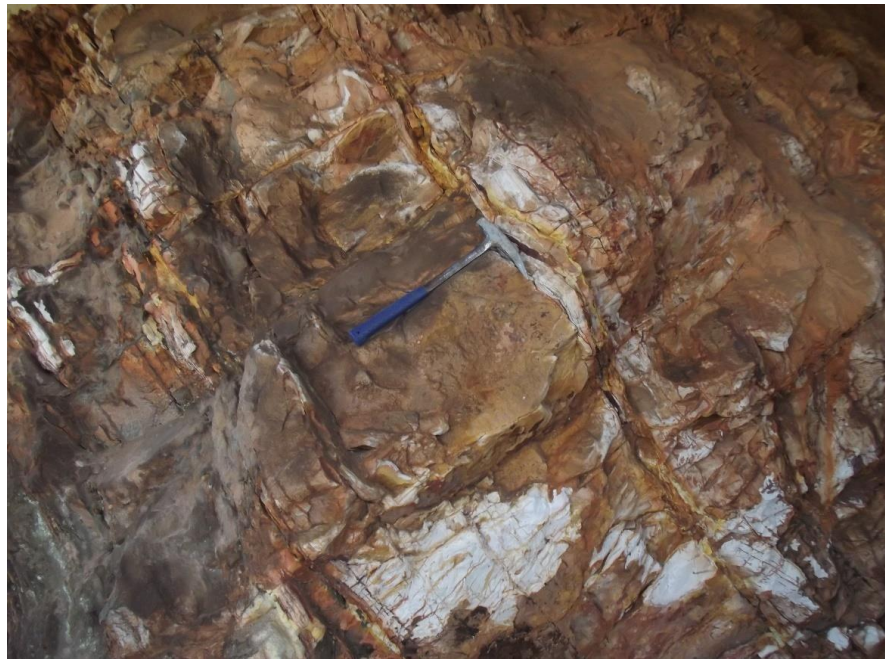


Figura 2.2 - Metarritmito da Formação Serra da Meia Noite. Afloramento localizado em corte de estrada no balão de entroncamento da BR-020 com a GO-118.

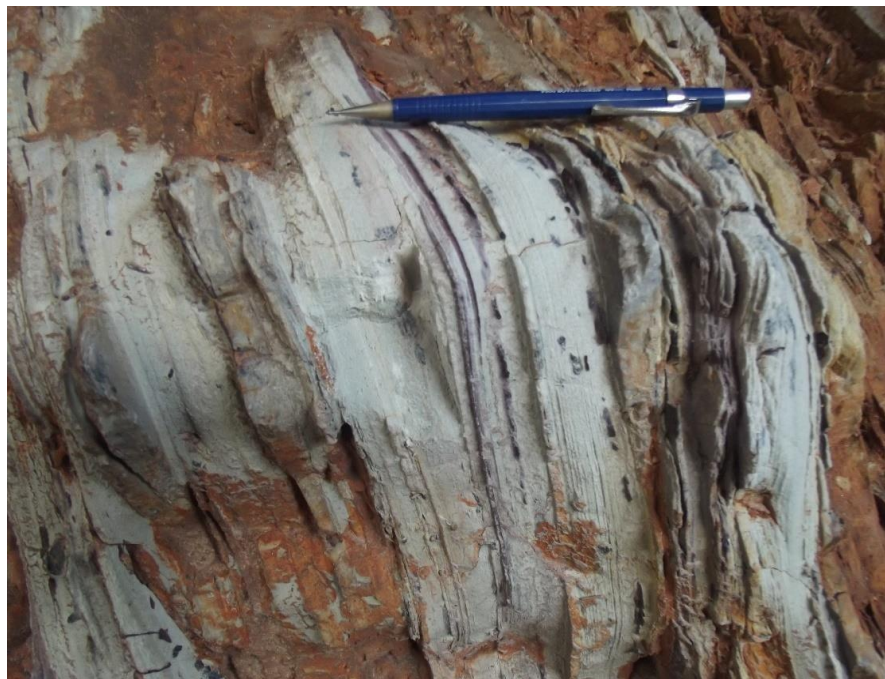


Figura 2.3 - Camadas milimétricas e centimétricas do metarritmito da Formação Serra da Meia Noite. Afloramento com mesma localização do ponto anterior.

Além dos litotipos anteriormente descritos, duas camadas de quartzito com coloração branca/ocre, granulação fina a média e espessura variável entre 8 e 20 m se destacam próximo à base e no topo desta formação. A interestratificação dos diferentes tipos petrográficos que compõem os metarritmitos é representada por estratos de 1 a 5 cm de espessura em sequências granocrescentes ascendentes. Raramente, são observadas camadas e lentes de quartzito muito grosso a conglomerático, com seixos de quartzo e quartzito arredondados e esféricos.

O acunhamento lateral e o aspecto lenticular de alguns estratos são feições bastante comuns Campos *et al.*, (2013). As estruturas sedimentares do tipo estratificações plano-paralelas, marcas onduladas (simétricas e assimétricas), estratificações lenticulares e diques de areia são frequentes na Formação Serra da Meia Noite, já as laminações cruzadas e truncadas por ondas, estratificações sigmoidais, hummockys e Swaley são raras (Campos *et al.*, 2013).

Formação Ribeirão Contagem - Unidade Q₃

A exposição-tipo desta formação é localizada na região de nascente do Ribeirão Contagem, no Distrito Federal. A unidade apresenta um contato brusco e concordante com a Formação Serra da Meia Noite (Figura 2.4) e sustenta as áreas de chapadas elevadas do Distrito Federal. Em geral, é caracterizada por quartzitos finos a médios, brancos a acinzentados, com grãos arredondados nas fáceis menos recristalizadas, bem selecionados, maduros mineralogicamente e silicificados. O aspecto maciço relacionado a intensa silicificação é constante na maioria das exposições. Nos locais com maiores alterações intempéricas ocorre um acamamento plano-paralelo em bancos decimétricos a métricos. Muitas vezes, o acamamento original é obliterado pela intensa silicificação e fraturamento desenvolvidos nessa unidade (Campos *et al.*, 2013).

Adicionalmente, estratificações cruzadas tabulares, tangenciais e acanaladas, de pequeno a médio porte e do tipo espinha de peixe e raras marcas onduladas assimétricas de cristas sinuosas ou paralelas estão presentes na sucessão estratigráfica. Lentes de quartzitos, com espessuras variando de decimétricas até 10 m (comumente interceptadas por poços tubulares profundos), ocorrem geralmente próximas à base e ao topo desta sucessão de quartzitos (Campos *et al.*, 2013).

As seções delgadas de amostras desta unidade mostram uma intensa silicificação com a forma e o contato dos grãos intensamente modificados pelo metamorfismo. Contudo, o alto grau de selecionamento é observado em amostras que exibem sobrecrecimento marcado por uma fina película de óxidos de ferro em torno do grão original. Mineralogicamente, além do quartzo que perfaz mais de 95% do arcabouço, ocorrem grãos de feldspatos muito alterados (Figura 2.5, muscovita detrítica, minerais opacos, turmalina e zircão (Campos *et al.*, 2013).



Figura 2.4 - Contato brusco entre metarritmitos da Formação Serra da Meia Noite e quartzitos da Formação Ribeirão Contagem. Afloramento localizado em corte de estrada no balão de entroncamento da BR-020 com a GO-118.



Figura 2.5 - Quartzito fino e puro com elevada maturidade textural e mineralógica com raros grãos de feldspatos alterados.

2.1.2 Geologia Estrutural

Romano e Rosas (1970) foram os primeiros a reconhecerem a importância das discontinuidades estruturais no condicionamento dos aquíferos profundos no Distrito Federal. Neste trabalho foi destacado a forte anisotropia do sistema aquífero fraturado, com a ocorrência de poços secos ou com baixas vazões a poucos metros de poços com vazões elevadas. Em suas conclusões Romano e Rosas (1970) consideraram prioritário mapear em escala regional, as estruturas de superfície e do subsolo, como o primeiro passo para a orientação de obras de captação de água subterrânea.

Freitas-Silva e Campos (1998) identificaram cinco fases de deformação (F₁, F₂, F₃, F₄ e F₅) produzidas durante a propagação das frentes de cavalgamentos com exceção da fase F₅, de característica rúptil. Todas as demais são caracterizadas por estruturas dúcteis-rúpteis, materializadas pelos próprios planos e por dobramentos, com ou sem foliações associadas, denominados, respectivamente, D₁, D₂, D₃ e D₄. Dessa forma, a estruturação das unidades litoestratigráficas da área do DF está totalmente condicionada pelo padrão de interferência das estruturas dúcteis e pelo arranjo das falhas inversas de baixo ângulo. Os grandes cavalgamentos, em função de sua cronologia relativa, foram agrupados em três sistemas denominados: Sistemas de Cavalcamento Paranã, São Bartolomeu/Maranhão e Descoberto.

Em conjunto, as cinco fases estabelecidas registram a progressão de um único evento de deformação, relacionado à Orogênese Brasileira, cujo pico metamórfico/deformacional ocorreu por volta de 650-680 Ma (Almeida, 1967; Almeida e Hasui, 1978; Tassinari *et al.* 1981; Freitas-Silva, 1990, 1996). O arcabouço estrutural reflete a acomodação da deformação em resposta ao encurtamento e espessamento crustal devido à inversão da Faixa Brasília (Freitas-Silva e Campos, 1998).

Nos estágios principais (F₁ e F₂) a dissipação do *stress* e a acomodação da deformação ocorreram por meio de cavalgamentos e dobramentos flexurais, onde o tensor principal de deformação (λ_1) foi orientado segundo WNW ($\approx$ N80W) com transporte tectônico para leste, em direção ao ante-país constituído pelo Cráton do São Francisco. Durante as fases de deformação F₁ e F₂ o tensor intermediário de deformação (δ_2) permaneceu aproximadamente constante (deformação plana - *plane strain*), enquanto que nas fases subsequentes, F₃ e F₄, este tensor passou a se comportar como um eixo de encurtamento com a formação de dobramentos cruzados no campo de deformação constriccional. Ao final da deformação, durante a fase F₅, em um ambiente de descompressão franca, o *stress* residual foi acomodado por fraturamento e falhamento normais. A maioria das estruturas planares, de médio e alto ângulo das fases anteriores, foram reativadas como falhamentos normais ou fraturas de alívio. O mecanismo de deformação durante F₅ foi

essencialmente o cisalhamento puro em regime de deformação geral (Freitas-Silva e Campos, 1998).

Em relação as estruturas dúcteis e dúcteis-rúpteis, há correlação às fases de deformação F₁, F₂, F₃ e F₄. No Grupo Paranoá são observadas dobras em estilos que variam desde chevrons apertados simétricos (Figura 2.6) até dobras abertas, correlacionadas com as dobras das fases F₂ e F₃ descritas por Freitas-Silva e Campos (1998). As principais estruturas destas fases são dobramentos, foliações e os sistemas de cavalgamentos, com exemplos mais expressivos as grandes estruturas dômicas resultantes da interferência entre as dobras D₂/D₃ com as dobras D₄, cujos principais exemplos são os domos estruturais de Brasília, do Pípiripau e de Sobradinho.



Figura 2.6 - Metarritmito da Formação Serra da Meia Noite aflorante na DF-410. Observa-se uma dobra em Chevron, com rompimento do plano axial, gerando zona de fraqueza na anticlinal. Nota-se os planos de acamamento bem marcados que funcionam como “fraturas de alívio”. O elevado ângulo das estruturas planares favoreceram a percolação/infiltração mais eficiente das águas superficiais.

A Fase F₂ é caracterizada por dobras de deslizamento flexural (Ramsay 1962, Ramsay e Huber 1983) D₂, que apresentam estilo predominantemente em chevron, geralmente assimétricos, de flanco curto e longo, em sua maioria invertidos, abertos até apertados. Essas dobras apresentam eixos com orientação NS e, por vezes, uma forte inflexão para NE. Já as dobras D₃ da Fase F₃ apresentam eixos com direções pouco variáveis em torno de NS e eixos com mergulho para sul. Estes dobramentos foram gerados durante a estruturação do Sistema de Cavalgamento Paranoá e desenvolveram foliação de plano axial denominada de S₂ (Freitas-Silva e Campos, 1998). A Fase F₄ é representada por arqueamentos e dobramentos suaves sem clivagens associadas. Contudo, os planos axiais das dobras D₄ formam zonas de fraquezas paralelas, nas quais se instalaram um importante sistema de fraturamento. Notadamente, as fases F₂ e F₄ foram responsáveis pelo

arqueamento do acamamento sedimentar (Freitas-Silva e Campos, 1998) e o desenvolvimento de clivagens de alto ângulo (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Quartzito da Formação Ribeirão Contagem aflorante no Domo do Pipiripau, com mergulho do plano do acamamento sedimentar de 40° N e desenvolvimento de clivagens de fratura de alto ângulo.

Em termos de condicionamento de aquíferos, a importância das fases de deformações F₂ e F₃ está no arqueamento até a verticalização dos planos do acamamento e foliações de baixo ângulo, desenvolvidas na fase F₁ e na geração de foliações subverticais. O alto ângulo das estruturas planares favoreceram a percolação/infiltração das águas superficiais, contudo esta feição é importante apenas em pequenas profundidades, ou seja, nos saprolitos e rochas intemperizadas do perfil de intemperismo. Na rocha fresca, aflorante ou subaflorante, estas estruturas planares são fechadas (seladas) e a permeabilidade da rocha é praticamente nula.

2.1.3 Geomorfologia

Braun (1971) aponta que o quadro geomorfológico regional está associado aos ciclos de aplainamentos do Brasil Central, onde se localizam as cabeceiras de afluentes dos três maiores rios brasileiros em termos de distribuição espacial: o Rio Maranhão (afluente do Rio Tocantins), o Rio Preto (afluente do Rio São Francisco) e os rios São Bartolomeu e Descoberto (afluentes do Rio Paraná). Os estudos de geomorfologia apresenta um importante acervo de trabalhos, entre os quais merecem destaque Maio (1986), Novaes Pinto (1986ab, 1987 e 1994ab), Novaes Pinto e Carneiro (1984) e Martins e Baptista (1998).

Martins e Baptista (1998) estudaram a evolução geoquímica e geomorfológica dos perfis de intemperismo e apresentaram uma compartimentação geomorfológica para o Distrito Federal, com os seguintes aspectos para a determinação dos compartimentos: hipsometria, padrão de relevo e declividade. Os compartimentos denominados de Planaltos são coincidentes com o Domínio da Região de Chapadas de Novaes Pinto (1994a), Planos Intermediários (equivalentes em parte ao domínio da Área de Dissecação Intermediária de Novaes Pinto 1987, 1994) e Planícies (semelhante ao Domínio da Região Dissecada de Vales de Novaes Pinto, 1987, 1994). Além desses, Martins e Baptista (1998) individualizaram os compartimentos de Rebordos (com declividades < 20%) e de Escarpas (com declividades > 20%).

As principais características de cada compartimento, segundo Campos (2012), incluem:

- *Plano Elevado* - padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagens, predominância de latossolos, declividades inferiores a 8% e cotas superiores a 1.150 metros. A pedogênese supera a erosão e transporte no balanço morfodinâmico;
- *Plano Intermediário* - exibe padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, ampla predominância de latossolos, declividades inferiores 12% e cotas entre 950 e 1.050 metros. A pedogênese supera a erosão e transporte no balanço morfodinâmico;
- *Vale Dissecado* - apresenta padrão de relevo ondulado a forte ondulado, elevada densidade de drenagem, ampla predominância de cambissolos, declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 metros. A erosão supera amplamente a pedogênese na morfogênese;
- *Rebordo* - mostra padrão de relevo ondulado, moderada densidade de drenagem, predominância de Cambissolos, declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1.100 metros. A erosão supera a pedogênese no balanço morfodinâmico. Este compartimento representa a transição entre o Plano elevado e o Plano Intermediário;
- *Rampa Íngreme* - tem padrão de relevo forte ondulado a escarpado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades superiores a 25% e cotas entre 800 e 1.100 metros. A erosão e transporte superam fortemente a pedogênese no balanço morfodinâmico. Representa a transição entre Plano Elevado e Vale Dissecado.

Campos (2012) atualiza a compartimentação geomorfológica da região baseado na integração das propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998). Campos (2012) considerou aspectos como o padrão de relevo, a declividade, o grau de dissecação e a densidade de drenagem para definir a divisão e utilizou técnica de hipsometria para representar os compartimentos no mapa geomorfológico. Dessa forma, caracterizou as seguintes unidades geomorfológicas: Região de Chapadas, Região de Dissecação Intermediária, Região Dissecada de Vale, Região de Rebordo e Região de Escarpa.

Segundo Campos (2012), as Regiões de Dissecação Intermediárias são controladas por

rochas pelíticas (Unidade das Ardósias e Grupo Bambuí). Os Vales Dissecados são condicionados por unidades muito impermeáveis, com pequena capacidade de infiltração e maior potencial erosivo, representados por rochas dos grupos Canastra, Araxá e Unidade Psamo-Pelito-Carbonatada do Grupo Paranoá. Os rebordos e escarpas são controlados pela região de transição ou contato brusco entre litologias com alto contraste de erodibilidade. Todas as chapadas elevadas e suas bordas são controladas pela presença dos tipos petrográficos atribuídos às unidades R₃ e Q₃, uma vez que estas rochas são as principais condicionantes da preservação deste tipo de relevo residual. Apresentam cotas superiores a 1.100 metros que representam a área de recarga regional mais importante da região.

Dentre os fatores responsáveis pela evolução morfodinâmica, destacam-se o clima, o tipo de vegetação, a evolução dos perfis de alteração, a estruturação neotectônica, além de processos de etchiplanação. O substrato litológico apresenta um notável controle da compartimentação e evolução geomorfológica. Portanto a geologia é o principal condicionante das variações de altitude, incisão de vales, densidade, forma da rede de drenagem e, principalmente, da evolução morfodinâmica e da paisagem atual do Distrito Federal (Campos, 2012).

2.1.4 Pedologia

De acordo com o mapeamento de solos executado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solo (Embrapa, 1978), na escala 1:100.000, o DF pode ter sua superfície territorial distinguida em dois núcleos em função dos tipos de coberturas. O primeiro representa espacialmente 85% da região distrital, caracterizado pelo conjunto de tipos pedológicos mais abundantes e constituído pelas seguintes classes de solos: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háplico. Já o segundo grupo, que abrange aproximadamente 15%, refere-se aos demais tipos de solos como classes de: Nitossolo, Chernossolo, Plintossolo, Gleissolo, Neossolo e Organossolo. Sobre as rochas das formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem ocorrem com ampla predominância Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média e Neossolo Quartzarênico.

Latossolo Vermelho - de maneira geral, esses solos estão associados à vegetação de cerrado e/ou cerradão nos topos das chapada, relevo com superfícies planálticas, suave onduladas, em geral áreas de topografia favorável à mecanização e à urbanização. O material de origem desses solos é bastante variado, com arenitos até rochas pelíticas, desde que possuam teores razoáveis de ferro. Normalmente, os Latossolos Vermelhos exibem-se com perfis profundos, muito porosos e bastante permeáveis. Os solos com horizonte Bw mais comuns são Latossolos Vermelhos Distróficos, com textura argilosa e relevo plano a suave ondulado. Como caracterizado em

campo, o perfil tipo é constituído por uma sequência morfológica de horizontes com A moderado, B latossólico e C. Em geral, está posicionado em relevo do tipo plano a suave ondulado de região de chapada, em geral, com declividade menor que 5%, com associação vegetal de campo cerrado e condição erosiva praticamente nula (ZEE, 2020).

Latossolo Vermelho-Amarelo - essa classe de solo está presente comumente nos divisores de água e em áreas de transição para rebordos de chapada, com vegetação de cerrado sensu stricto, (campo limpo e campo sujo), em superfícies planas e em vertentes com declividades entre 5 e 20%. Na maior parte dos casos, situa-se adjacente à classe dos Latossolos Vermelhos. Alguns perfis do Latossolo Vermelho-Amarelo podem ocorrer mosqueados e plintita a partir de 180 cm do perfil. Como são solos com características semelhantes às dos Latossolos Vermelhos, são diferenciados por apresentarem menores teores de óxidos de ferro, o que acarreta em colorações mais amareladas, drenagem moderada e boas condições de aeração. Essa classe localiza-se em uma morfologia de chapada, com relevo local plano a suave ondulado, associada a uma fitofisionomia secundária de campo sujo com drenagem e permeabilidade boas, não sendo observado o desenvolvimento de processos erosivos (ZEE, 2020).

O grupo dos latossolos permite qualquer tipo de uso urbano ou rural, como instalação de sistemas de saneamento in situ, instalação de sistemas de recarga artificial dos aquíferos, caixas de dissipação de energia de águas pluviais, bacias de infiltração (de águas pluviais), agricultura irrigada, convencional ou em plantio direto. Como estes solos possuem grande espessura na zona não saturada, podem ser instalados estação de tratamento de efluentes e usina de triagem e reciclagem de resíduos sólidos sobre esse tipo de solo (ZEE, 2020).

Por definição, segundo Santos *et al.* (2018), os latossolos são solos constituídos por material mineral com horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A, dentro de 200 cm a 300m a partir da superfície, se o horizonte A apresentar mais que 150 cm de espessura. Apresentam sequência de horizonte A → AB → Bw1 → Bw2 → Bw3 → C → R, sendo o A fraco a moderado, com estruturação granular e ricos em raízes e os horizontes Bw têm tendência a manter estrutura grumosa (Figura 2.8A).

Neossolo Quartzarênico - possuem ocorrência intimamente relacionada ao ambiente de Rebordo de Chapada no Domínio do Cerrado, particularmente sobre os quartzitos do Grupo Paranoá e junto às encostas íngremes onde ocorrem afloramentos desta geologia. Diferente dos Neossolos Litólicos, Flúvicos e Regolíticos, os Neossolos Quartzarênicos são rotineiramente mais profundos em perfil, com profundidades superiores a dois metros. Apresentam estrutura fraca; grande permeabilidade, condutividade hidráulica e suscetibilidade à erosão, o que acarreta em sua caracterização como solos minerais, pouco desenvolvidos, profundos, excessivamente drenados e

porosos (ZEE, 2020). Estas classes apresentam valores de condutividade hidráulica variáveis nas ordens de grandeza de 10^{-5} a 10^{-6} , sendo os valores mais elevados mantidos desde a superfície até maiores profundidades, o que resulta em coberturas com excelentes condições de recarga natural (Souza, 2001). Os Neossolos Quartzarênicos exibem sequência de horizontes A (fraco) → AC → CA → C1 → C2 → R, sendo comum a presença de rochosidade e pedregosidade (Figura 2.8B).

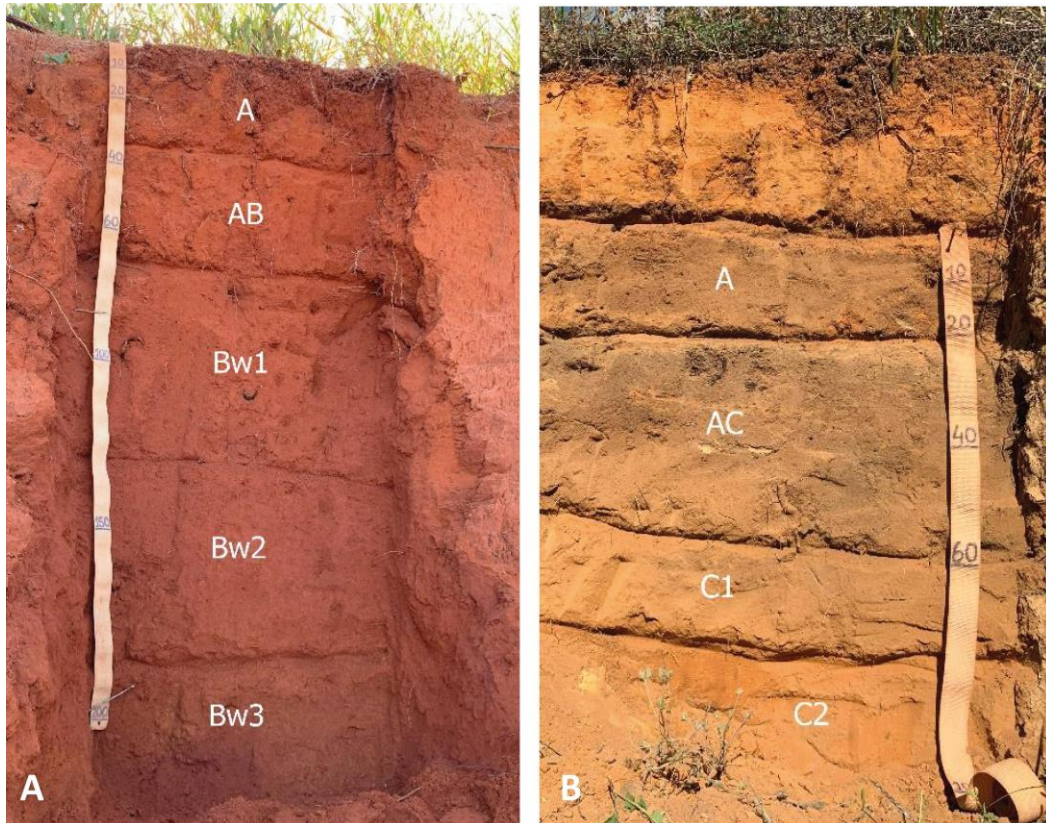


Figura 2.8 - A) Perfil de Latossolo Vermelho Distrófico com a seguinte sequência de horizontes: A (0-30 cm) – AB (30-64 cm) – Bw1 (64-123 cm) – Bw2 (123-175 cm) – Bw3 (175-208 cm+) e **B)** Perfil de Neossolo Quartzarênico com a seguinte sequência de horizontes: A (0-20 cm) – AC (20-58 cm) – C1 (58-76 cm) – C2 (76-92 cm+).

2.1.5 Caracterização Climática

De acordo com as descrições e análises climatológicas realizadas por Baptista (1997), a região Centro-Oeste do Brasil sofre influência tanto de sistemas tropicais das latitudes baixas, como de climas do tipo temperado das latitudes médias. Possui uma estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa no verão (chuvas convectivas). Com relação às temperaturas, o sul da região no período de inverno é afetado pela penetração de massas de ar frio de altas latitudes sul, o que contribui para a predominância de baixas temperaturas nessa estação e provoca condições de tempo frias, principalmente no sul do estado de Goiás. Especialmente sobre a região Centro-Oeste,

atua um sistema semiestacionário gerado a partir do forte aquecimento convectivo da atmosfera durante os meses de verão, que pode influir diretamente na precipitação e temperatura da região.

Além disso, a Zona de Convergência do Atlântico Sul, caracterizada por uma banda de nebulosidade e chuva semiestacionárias, é um dos principais fenômenos que influenciam o regime de chuvas durante os meses de maior atividade convectiva (ZEE, 2020).

Dessa forma, o clima do Distrito Federal é marcado pela forte sazonalidade, com dois períodos distintos bem caracterizados. O período entre maio e setembro é evidenciado pela baixa taxa de precipitação, baixa nebulosidade, alta taxa de evaporação e baixas umidades relativas diárias, com valores registrados inferiores a 15%. O período entre outubro e abril apresenta padrões contrastantes, com o trimestre de novembro a março responsável por 47% da precipitação anual (ZEE, 2020).

Segundo a classificação climática de Köppen (CODEPLAN, 1984), no Distrito Federal podem ocorrer, em função de variações de temperaturas médias (dos meses mais frios e mais quentes) e de altitude, climas do tipo: Tropical Aw, Tropical de Altitude Cwa e Tropical de Altitude Cwb.

O clima Tropical Aw caracteriza-se por altas temperaturas durante todo o ano e uma estação seca bem definida no inverno, com chuvas concentradas no verão, típico de regiões de baixa e média altitude do Cerrado. Já o clima Tropical de Altitude Cwa ocorre em áreas elevadas, apresenta inverno seco e verão quente, com maior amplitude térmica diária e potencial de infiltração favorecido pelas menores temperaturas noturnas. Por sua vez, o Tropical de Altitude Cwb também ocorre em altitudes elevadas, mas se diferencia pelo verão ameno e pela menor evapotranspiração, o que contribui para uma recarga mais sustentada dos aquíferos. Esses três tipos climáticos compartilham o padrão de seca invernal, mas diferem significativamente quanto à temperatura média e à influência da altitude sobre os processos hidrológicos (Köppen, 1948).

Estimativas de Coimbra (1987) mostram que cerca de 12% da precipitação total infiltram na zona vadosa efetivamente alcançam a zona saturada do aquífero. A evapotranspiração real fica em torno de 900 mm anuais, sendo que os meses de maio a setembro apresentam déficit hídrico, enquanto o período de outubro a abril apresenta superávit.

2.2 HIDROGEOLOGIA

De acordo com o Mapa Hidrogeológico do Brasil (BRASIL, 1983), o Distrito Federal está situado no limite entre as províncias hidrogeológicas do Escudo Central e do São Francisco. Em ambos os casos a região é amplamente dominada por aquíferos fraturados e fissuro-cársticos recobertos por aquíferos intergranulares representados por solos e rochas alteradas com

características físicas e espessuras variáveis (que em conjunto compõem sistemas aquíferos intergranulares). O Distrito Federal está situado em terras altas, que servem como dispersores das drenagens que fluem para três importantes bacias hidrográficas do Brasil: Bacia do Paraná, Bacia do São Francisco e Bacia do Tocantins.

Romano e Rosas (1970) foram pioneiros nas publicações sobre a hidrogeologia do Distrito Federal. Barros (1987) desenvolveu o Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal juntamente a Companhia de Água e Esgoto de Brasília (CAESB), onde concluiu, com base em dados preliminares, que a região apresenta uma vocação hidrogeológica local restrita. Barros (1994) e Freitas-Silva e Campos (1998) seguem com importantes contribuições para a determinação das bases do conhecimento sobre as águas subterrâneas da região.

A partir dos anos 90 uma sucessão de trabalhos sobre o tema é desenvolvida, a exemplo de Mendonça (1993), Amore (1994), Campos e Freitas-Silva (1998 e 1999), Zoby (1999), Campos e Tröger (2000), Souza (2001), Carmelo (2002), Cadamuro (2002), Cadamuro *et al.* (2002), Cadamuro e Campos (2005), Joko (2002), Moraes (2004), Campos (2004), Arraes *et al.* (2005), Lousada (1999 e 2005), ADASA (2007), Lousada e Campos (2005), Gonçalves (2007 e 2012), Souza (2013), Queiroz (2015), Castanheira (2016), Nunes (2016) e ADASA (2018).

Barros (1994) apresentou uma caracterização e classificação dos principais sistemas aquíferos do Distrito Federal, divididos em domínios fissural e poroso. O Domínio Poroso é caracterizado como um sistema de águas rasas heterogeneamente armazenadas no manto de cobertura, enquanto o Domínio Fraturado é representado como um sistema de águas subterrâneas, distribuídas heterogeneamente nas rochas por meio do sistema de fraturas, falhas e cavidades de dissolução.

Campos e Freitas-Silva (1998) continuam os estudos e utilizam novos parâmetros para a caracterização mais detalhada dos domínios, avaliando aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e os parâmetros espessura saturada e condutividade hidráulica, o que resulta em quatro subsistemas. Bem como a grande contribuição geológica do trabalho, a classificação hidrogeológica proposta pelos autores é atualmente adotada por diversos estudos de caráter local e regional no Distrito Federal.

No Distrito Federal são diferenciados três grandes domínios de aquíferos, sendo eles o Domínio Intergranular, Domínio Fraturado e Domínio Fissuro-Cárstico. Devido a variação litológica dentro das unidades litoestratigráficas, é feita uma subdivisão de sistemas e subsistemas diferenciados, tornando a caracterização mais precisa e evidenciando a diversificação dos domínios, sistema e subsistemas aquíferos. A Tabela 2.1 evidencia os domínios hidrogeológicos do Distrito Federal e suas subdivisões.

Tabela 2.1 - Classificação dos Domínios, Sistemas e Subsistemas Aquíferos do Distrito Federal e suas respectivas vazões médias (atualizado de Campos e Freitas-Silva, 1999).

DOMÍNIO	SISTEMA	SUBSISTEMA	Vazão Média (m ³ /h)	Litologia/Solo Predominante
Freático	Sistema P₁	-	< 0,8	Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos.
	Sistema P₂		< 0,5	Latossolo Argilosos.
	Sistema P₃			Plintossolos e Argissolos.
	Sistema P₄		< 0,3	Cambissolo e Neossolo Litólico.
Fraturado	Paranoá	S/A	12,5	Metassiltitos.
		A	4,5	Ardósias.
		R₃/Q₃	12,0	Quartzitos e metarritmitos arenosos.
		R₄	6,5	Metarritmitos argilosos.
	Canastra	F	7,5	Filitos micáceos.
	Bambuí	Topo	6,0	Siltitos e arcóseos.
	Araxá	-	3,5	Mica xistos.
Físsuro-Cárstico	Paranoá	PPC	9,0	Metassiltitos e lentes de mármore.
	Canastra	F/Q/M	33,0	Calcifilitos, quartzitos e mármore.
	Bambuí	Base	9,0	Siltitos e lentes de calcários micríticos

2.2.1 Domínio Freático

Campos e Freitas-Silva (1998) subdividem o Domínio dos Aquíferos Intergranulares em quatro sistemas: P1, P2, P3 e P4. A caracterização dos aquíferos desse domínio está vinculada a parâmetros como porosidade (η), porosidade efetiva (η_e), espessura saturada (b) e condutividade hidráulica (K) controlados pelo meio físico do local. A porosidade do domínio é do tipo primária intergranular, onde a água ocupa os poros entre os grãos constituintes da rocha ou solo.

No Distrito Federal, esse domínio é essencialmente representado pelo manto de intemperismo, com grande extensão e continuidade lateral, de caracterização heterogênea e anisotrópica. Em relação a superfície potenciométrica, são aquíferos livres e/ou suspensos, compondo o sistema de águas subterrâneas rasas. Esse domínio inclui tanto a zona vadosa quanto a zona saturada do aquífero. Por esse motivo, é importante tanto para processos superficiais (infiltração das águas pluviais) quanto para os subsuperficiais (recarga dos aquíferos).

Campos e Freitas-Silvas (1998) propõe uma cartografia para a espacialização deste domínio que posteriormente foi atualizada por Gonçalves (2007), que utiliza ampla base de dados de ensaios de infiltração e o funcionamento hídrico dos solos conforme a adaptação da teoria da

Curva-Número para solos tropicais, desenvolvida pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos (Lombardi-Neto, 1989).

Campos e Freitas-Silvas (1998) classificam o Sistema P1 como aquíferos contínuos, livres e de grande extensão lateral, distribuídos em feições geomorfológicas de chapadas elevadas (da Contagem, de Brasília, da Canastra e do Pipiripau) e suavemente onduladas, que representa o sistema com as áreas de recarga regionais mais importantes dos aquíferos fraturados. São representados por latossolos vermelho-amarelo de textura arenosa ou em áreas mais restritas, como areias quartzosas. Corresponde ao produto do intemperismo dos quartzitos da Formação Ribeirão Contagem, de parte dos metarritmitos da Formação Serra da Meia Noite e das porções mais ricas em quartzitos do topo da Formação Ribeirão Piçarrão.

Campos e Freitas-Silvas (1998) classificam o Sistema P2 como aquíferos contínuos, livres e de grande extensão lateral, distribuídos em feições geomorfológicas de chapadas intermediárias, com importância hidrogeológica local intermediária em comparação aos demais sistemas. São representados por latossolos argilosos, com espessura pedológica superior ao Sistema P1 devido ao fato de serem mais argilosos e mais susceptíveis aos processos de intemperismo químico.

Campos e Freitas-Silvas (1998) classificam o Sistema P3 como aquíferos descontínuos, livres e de grande extensão lateral, distribuídos em feições geomorfológicas de chapadas rebaixadas ou sobre rebordos e escarpas, com importância hidrogeológica local pequena em comparação aos demais sistemas, utilizada apenas no abastecimento de pequenas propriedades rurais. São representados por latossolos vermelho argilosos e localmente por cambissolos.

Campos e Freitas-Silvas (1998) classificam o Sistema P4 como aquíferos descontínuos, livres e de pequena extensão lateral, distribuídos em feições geomorfológicas de relevos movimentados, escavados em vales dissecados, com importância hidrogeológica local pequena em comparação aos demais sistemas. São representados por cambissolos e neossolos litólicos.

2.2.2 Domínio Fraturado

Campos e Freitas-Silva (1998) caracterizam o Domínio Fraturado como correspondente aos meios rochosos mais profundos, onde a água circula por descontinuidades planares, plano de fraturas, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. Dessa forma, a porosidade desse domínio é secundária e representada pelas fraturas das rochas metassedimentares que tiveram seus espaços intergranulares litificados durante processos de metamorfismo.

Possuem extensão lateral variável e são fortemente anisotrópicos e heterogêneos. Os parâmetros hidrodinâmicos que melhor caracterizam um aquífero são a condutividade hidráulica (K), a transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S), com valores muito variáveis em

função do tipo de rocha e outras características, como por exemplo, a densidade de fraturas do corpo rochoso.

Campos e Freitas-Silva (1998) subdividem o Domínio Fraturado em quatro conjuntos distintos, denominados sistemas aquíferos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. O Sistema Paranoá foi dividido nos subsistemas S/A, A, R₃/Q₃ e R₄, enquanto o Sistema Canastra é representado pelo subsistema F e o Sistema Bambuí pelo subsistema Bambuí Topo.

O Subsistema Aquífero R₃/Q₃ inclui as formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem do Grupo Paranoá. A inclusão de duas unidades litológicas em um único subsistema aquífero é justificada pela similaridade das características hidrogeológicas dos tipos petrográficos, como os parâmetros hidrodinâmicos e a distribuição estatística de médias de vazões. Em função da grande presença de quartzitos, há uma grande distribuição das discontinuidades por todo o maciço rochoso já que o comportamento rúptil da rocha favorece a manutenção da abertura do fraturamento. Este domínio hidrogeológico compõe aquíferos descontínuos, com extensão lateral variável, livres ou confinados e características hidrodinâmicas anisotrópicas.

ADASA (2018) apresenta os resultados de ensaios de bombeamento de 24 horas realizados em 27 poços tubulares no subsistema, com valores de transmissividade, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica vertical (Tabela 2.2).

Os dados mostram que este aquífero apresenta importância hidrogeológica local muito alta devido à média de vazões de 12.200 L/h, a incidência muito baixa de poços secos, a alta ocorrência de poços com vazões maiores que 20.000 L/h e a distribuição espacial que ultrapassa 20% da região distrital. Além disso, as águas do subsistema apresentam excelente qualidade natural e sua compartimentação geomorfológica de Chapadas Elevadas representa a área de recarga regional mais importante da região, reforçando o papel estratégico do subsistema para a região.

Tabela 2.2 - Dados de 27 testes de bombeamento de 24 horas em poços tubulares profundos, com bombeamento contínuo. Valores obtidos com a utilização do software AquiferTest para aquíferos fraturados (método de Moench) pela ADASA (2018).

	R3			Q3		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
T (m²/s)	7,8 x 10 ⁻⁴	1,2 x 10 ⁻⁴	4,9 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻³	1,4 x 10 ⁻⁴	4,0 x 10 ⁻⁴
K (m/s)	4,8 x 10 ⁻⁶	5,3 x 10 ⁻⁷	2,8 x 10 ⁻⁶	1,6 x 10 ⁻³	1,2 x 10 ⁻⁶	4,6 x 10 ⁻⁶
S	1,7 x 10 ⁻¹	2,0 x 10 ⁻²	1,0 x 10 ⁻¹	1,6 x 10 ⁻¹	4,5 x 10 ⁻³	1,5 x 10 ⁻¹
Q (m³/h)	48	zero	12,5	42	zero	12,4

2.2.3 Domínio Físsuro-Cárstico

Segundo Campos (2011), os sistemas de porosidade físsuro-cárstica são representados

em contextos em que rochas carbonáticas (calcários, dolomitos, margas e mármore) ocorrem na forma de lentes com restrita continuidade lateral interdigitadas, com litologias pouco permeáveis (siltitos argilosos, folhelhos ou filitos). A porosidade nesse contexto é secundária e representada pelas restritas cavidades.

No contexto do Distrito Federal, ocorrem aquíferos fissuro-cársticos vinculados ao Sistema Paranoá, representado pelo Subsistema PPC, pelo Sistema Bambuí, vinculado ao Subsistema Base e pelo Sistema Canastra, associado ao Subsistema F/Q/M. Essas ocorrências são responsáveis pelas vazões mais expressivas em poços individuais conhecidos na região do Distrito Federal. Segundo Campos (2011), o subsistema F/Q/M apresenta especial importância na região, pois é responsável pelo abastecimento de 95% da Cidade Satélite de São Sebastião, que ultrapassa os 100.000 habitantes.

2.3 MODELOS CONCEITUAIS DOS AQUÍFEROS

A caracterização hidrogeológica de um aquífero envolve o conhecimento de suas dimensões geométricas, litologia, condições de contorno, espessura saturada, áreas de recarga e descarga naturais, parâmetros hidrodinâmicos, coeficiente de drenança vertical, comportamento do fluxo, circulação da água desde a zona de recarga até a descarga, entre outros aspectos. A integração dessas informações permite a definição do modelo conceitual do aquífero.

Para a região do Distrito Federal, Campos e Freitas-Silva (1998) propuseram inicialmente o “Modelo de Duas Superfícies Potenciométricas”, que foi abordado em trabalhos posteriores como Lousada (1999), Campos e Tröger (2000), Souza (2001), Cadamuro (2002), Lousada (2005) e Lousada e Campos (2005). Posteriormente, Lousada e Campos (2005) propõem novos modelos que se enquadram mais fielmente às demais regiões do Distrito Federal, que inclui: o Modelo de Superfície Potenciométrica Única Sem Confinamento, Modelo de Superfície Potenciométrica Única Com Confinamento e o Modelo Fissuro-Cárstico. No presente trabalho serão abordados os dois primeiros modelos.

O Modelo de Duas Superfícies Potenciométricas é aplicável em áreas no interior das chapadas elevadas, importantes áreas de recarga caracterizadas pela presença de solos desenvolvidos, com regolitos sobre rochas intensamente fraturadas com elevado grau de interconexão entre as fraturas. Dessa forma, esse modelo de circulação de águas aplicável à maior parte da área de ocorrência do Subsistema R₃/Q₃.

Como ilustrado na Figura 2.9, o modelo é composto por dois meios aquíferos (intergranular e fraturado) e duas superfícies potenciométricas distintas. O domínio intergranular é constituído

pelo solo e saprólito, com porosidade primária intergranular. Já o domínio fraturado é composto totalmente pela rocha sã, com porosidade secundária planar. As superfícies potenciométricas têm seus níveis variáveis ao longo do ano conforme períodos de chuva e estiagem.

A superfície potenciométrica do meio intergranular varia em torno de 8 a 20 m de profundidade, enquanto a superfície potenciométrica do meio fraturado varia entre 30 a 50 m. Essa variação causa a desconexão dos aquíferos e a recarga se dá nos períodos chuvosos quando a carga hidráulica no aquífero superior supera a barreira hidráulica na interface entre os dois meios.

A superfície potenciométrica do meio intergranular varia entre 8 e 20 m de profundidade, enquanto a do meio fraturado se encontra entre 30 e 50 m, diferença que indica ausência de conexão hidráulica permanente entre os aquíferos. Contudo, nos períodos chuvosos, o aumento da carga hidráulica no aquífero superior pode gerar um gradiente descendente capaz de superar a barreira hidráulica presente na interface entre os meios, permitindo a recarga vertical para o aquífero fraturado

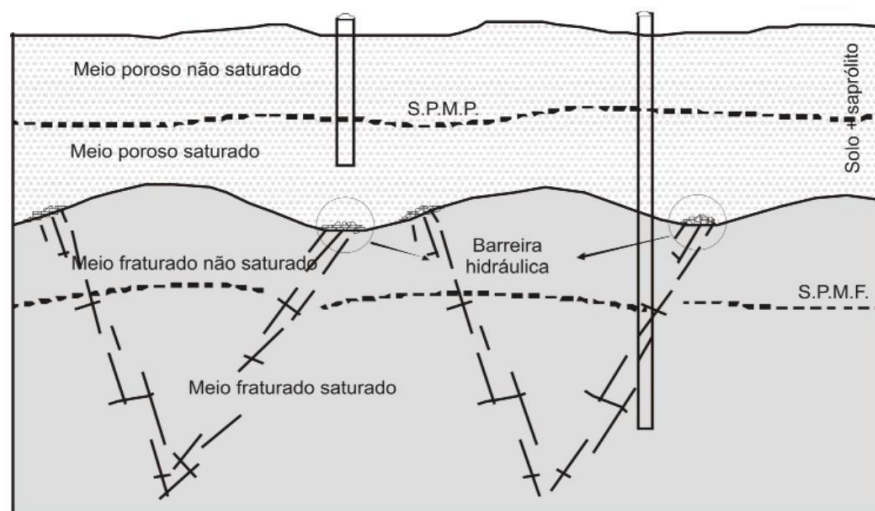


Figura 2.9 - Esquema do modelo das duas superfícies potenciométricas, onde: S.P.M.P. - Superfície Potenciométrica do Meio Poroso; S.P.M.F. - Superfície Potenciométrica do Meio Fraturado (Lousada, 2005).

Lousada (2005) mostra que o modelo é constituído por uma zona saturada (saprólito) que se encontra entre duas zonas não saturadas, a superior correspondente ao meio poroso (solos) e a inferior ao meio fraturado (rocha). O contato de uma zona saturada acima de uma não saturada é possibilitado pela existência de barreiras hidráulicas, constituídas por material pelítico que impede a entrada de água. A anisotropia do sistema fraturado também auxilia no desenvolvimento da barreira hidráulica, devido a uma possível mudança na porosidade.

Mesmo com estudos como Lousada (2005), o conhecimento sobre o modelo conceitual do Subsistema R₃/Q₃, as formas de circulação das águas, os mecanismos de transferência das águas entre os aquíferos freáticos e os profundos e as estimativa de reserva não sofreram avanço significativo desde sua definição original. Lousada (2005) aplicou métodos hidroquímicos e datação nas águas do Distrito Federal a fim de obter subsídios ao modelo.

A composição química das águas provenientes desses dois sistemas apresenta diferenças significativas. As análises realizadas indicam que as águas do domínio intergranular apresentam características mais ácidas, com menor concentração de sólidos dissolvidos, condutividade elétrica reduzida e uma idade inferior em comparação às águas extraídas de poços tubulares profundos após várias horas de bombeamento contínuo.

A recarga do meio fraturado ocorre após a elevação da carga hidráulica no meio superior que permite a ruptura da barreira hidráulica e a passagem para as fraturas na rocha. Nos meses de maior pluviosidade, quando o nível freático atinge sua elevação máxima, pode ocorrer a conexão entre as zonas saturadas dos domínios poroso e fraturado. No entanto, durante a maior parte do ano, essas zonas permanecem separadas por uma área de fraturas não saturadas. Nessas condições, é possível medir dois níveis potenciométricos distintos nos poços tubulares.

No intuito de avaliar o modelo de duas superfícies potenciométricas, Cadamuro (2002) pesquisou dois conjuntos de nascentes em um platô elevado na região do Distrito Federal (Chapada da Canastra) e mostrou que há uma diferença importante no comportamento das variações da descarga de nascentes. As nascentes de contato no meio poroso apresentam aumento de vazão um mês após o início do período chuvoso. As nascentes de fratura, situadas nas áreas de afloramentos rochosos, registram esse aumento de 45 a 60 dias após o início das chuvas. Esse comportamento sugere que a recarga do meio fraturado sofre um retardo em função da necessidade do aumento da carga hidráulica do meio aquífero sobreposto para iniciar a transmissão de água. Outro ponto foi a avaliação potenciométrica dos poços tubulares profundos. Em geral, foi visto que poços totalmente revestidos na seção dos solos e saprolitos mostraram níveis d'água mais baixos que o nível freático de poços rasos situados a pequenas distâncias, o que confirma a presença de dois níveis potenciométricos na região.

Além disso, a exploração de água em poços rasos presentes no domínio poroso não sofrem interferências de rebaixamento em áreas com grande densidade de poços tubulares, que captam água das zonas fraturadas profundas. Esse comportamento indica que a conexão hidráulica entre os aquíferos só ocorre quando a carga no aquífero superior é suficiente para superar a barreira hidráulica entre os dois meios. Ainda de acordo com Lousada (2005), além do Modelo de Duas Superfícies Potenciométricas o Subsistema R₃/Q₃ também se enquadra localmente no

Modelo de Única Superfície Potenciométrica sem Confinamento. Neste caso a superfície potenciométrica pode ocorrer permanentemente no domínio poroso superior ou migrar para o domínio fraturado no período de recessão da precipitação pluvial. Na maior parte dos casos a superfície potenciométrica tem oscilação restrita e ocorre dentro do aquífero poroso superior (Figura 2.10A). Nas situações próximas a quebras de relevo, a superfície potenciométrica tem ampla oscilação e ocorre entre o solo e a rocha em função da distribuição temporal das chuvas (Figura 2.10B). Neste modelo duas situações geomorfológicas podem ser observadas: no interior de chapadas, com relevo suave ondulado e cota intermediária, e em bordas de chapadas em áreas onde solos arenosos recobrem quartzitos intensamente fraturados.

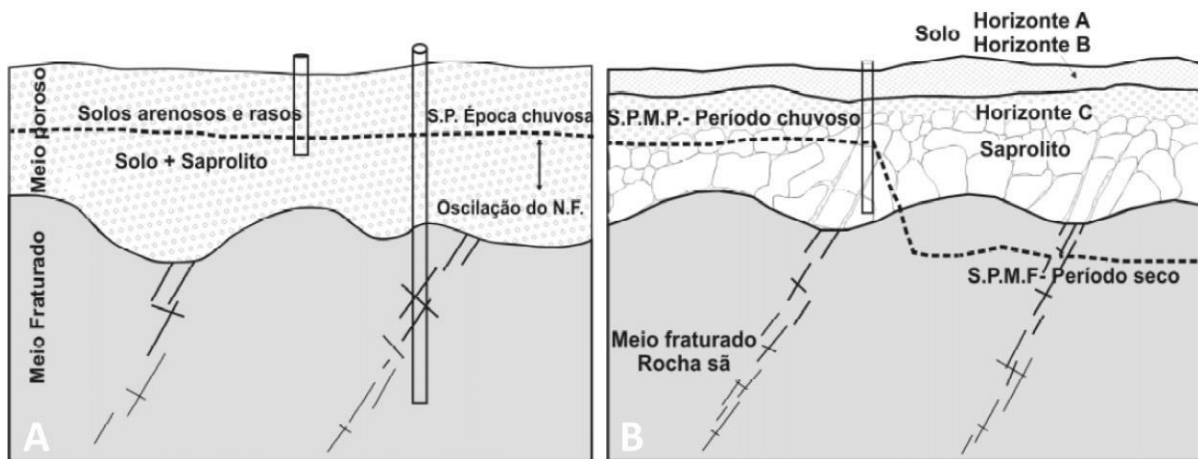


Figura 2.10 - A) - Modelo para meio fraturado sem confinamento com restrita oscilação. Neste caso a flutuação da superfície potenciométrica ocorre apenas no meio intergranular superior e **B)** Modelo para meio fraturado sem confinamento com ampla oscilação. Neste caso a superfície potenciométrica ocorre tanto no meio poroso quanto no meio fraturado (Lousada, 2005).

CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE TRATAMENTO DE DADOS DE TESTES DE BOMBEAMENTO EM AQUÍFEROS ANISOTRÓPICOS

3.1 INTRODUÇÃO

A história dos testes de bombeamento está intrinsecamente associada à evolução dos estudos hidrogeológicos ao longo do século XX e início do XXI. Seu surgimento remonta à busca por métodos capazes de estimar, de forma indireta, parâmetros fundamentais dos aquíferos como a transmissividade, coeficiente de armazenamento, condutividade hidráulica, que representam grandezas de difícil determinação por avaliações qualitativas, mas essenciais para a compreensão do fluxo subterrâneo. Trata-se, portanto, de uma metodologia que combina observação empírica com a aplicação de equações analíticas derivadas de modelos teóricos de fluxo subterrâneo, permitindo estimar parâmetros hidrogeológicos a partir da resposta do sistema ao bombeamento.

O primeiro grande marco foi a formulação da equação de Theis (1935), que estabeleceu as bases para a interpretação do rebaixamento piezométrico em função do tempo, em aquíferos confinados homogêneos e isotrópicos, sob a suposição de fluxo radial e poço totalmente penetrante. Theis adaptou a equação da difusão de calor de Fourier ao fluxo de água subterrânea e criou uma analogia que permitiu estimar transmissividade e armazenamento a partir do rebaixamento induzido pelo bombeamento. A aplicação inicial ocorreu em estudos para o Serviço Geológico dos Estados Unidos, mas a metodologia rapidamente se difundiu. A partir desse modelo, diversos outros foram propostos por pesquisadores que buscaram aproximar-se da realidade natural: Jacob (1940) simplificou a solução de Theis para facilitar a aplicação gráfica; Cooper e Jacob (1946) desenvolveram uma solução semi-logarítmica prática; Boulton (1954, 1963) trabalhou com drenança retardada em aquíferos parcialmente confinados; Neuman (1972) abordou os efeitos da compressibilidade da água e da formação geológica.

Esses modelos clássicos formaram o corpo teórico essencial da primeira geração da hidrogeologia analítica, aplicados com sucesso em muitos contextos. No entanto, à medida que os hidrogeólogos passaram a trabalhar em ambientes mais complexos, ficou evidente que tais modelos não eram suficientes para representar sistemas heterogêneos, anisotrópicos ou com múltiplos domínios de fluxo (Barenblatt *et al.*, 1960).

Com o avanço dos estudos, tornou-se evidente que muitos aquíferos não podiam ser representados como sistemas homogêneos e contínuos. A heterogeneidade estrutural e litológica, particularmente em rochas fraturadas, zonas de cisalhamento e sistemas intemperizados, exigia uma abordagem mais refinada. Nesse contexto, Barenblatt *et al.* (1960) introduziram o conceito

de fluxo em meios com dupla porosidade, seguido pela formulação matemática de Warren e Root (1963), que modelaram um sistema no qual a matriz porosa atua como um reservatório de armazenamento e cede água às fraturas, por onde o fluxo ocorre de forma efetiva. O modelo considera uma taxa de troca constante entre os dois domínios e aplica-se especialmente a sistemas cársticos, quartzíticos e cristalinos intemperizados.

Moench (1984) aperfeiçoou esse modelo ao incorporar o efeito da pele hidráulica (*skin effect*), que representa uma barreira ou facilitador ao fluxo nas proximidades do poço, além de permitir o uso com poços parcialmente penetrantes e estimar a condutância de troca (σ) entre matriz e fratura.

Esse avanço teórico ampliou significativamente a capacidade da hidrogeologia em lidar com realidades complexas. A análise de curvas de rebaixamento passou a incluir a identificação de inflexões e mudanças de regime hidráulico, fato que reconhece comportamentos típicos de dupla porosidade, retardo de resposta da matriz e efeitos de contorno. O trabalho de Moench permitiu a aplicação prática desses conceitos em meios aquíferos de dupla porosidade.

A partir da década de 1980, com o avanço dos recursos computacionais, os métodos gráficos começaram a ser substituídos por abordagens baseadas em ajustes numéricos por regressão não-linear. Softwares como AquiferTest, AQTESOLV, Aquifem e MODFLOW, possibilitam a análise de modelos mais complexos, com geometrias tridimensionais, anisotropia, heterogeneidade espacial e variação temporal da recarga e das condições de contorno.

A literatura mais recente, compilada por Dashti *et al.* (2023) em uma ampla revisão de 154 artigos publicados entre 2000 e 2022, demonstra o predomínio dos métodos de Theis, Cooper-Jacob, Neuman, Moench e Warren e Root como os mais utilizados. A revisão aponta para uma nova fronteira no uso de algoritmos de otimização global, bem como aprendizado de máquina e redes neurais artificiais, para ajuste de múltiplos parâmetros simultaneamente. Essas técnicas reduzem o erro humano e melhoram a capacidade de ajuste em sistemas complexos, embora ainda dependam da qualidade dos dados de entrada e do modelo conceitual adotado.

Sob uma perspectiva conceitual mais ampla, os testes de bombeamento representam um esforço de traduzir a complexidade geológica em modelos matemáticos operacionais. Constituem, essencialmente, um método de inferência indireta, no qual se deduzem as propriedades do meio subterrâneo a partir da resposta do sistema a uma perturbação hidráulica controlada. Para que essa inferência seja válida, contudo, é indispensável uma base conceitual bem estruturada. Como ressaltam Freeze e Cherry (1979) e o NRC (1996), equívocos na definição do modelo conceitual do aquífero podem resultar em erros de até duas ordens de magnitude na estimativa dos parâmetros hidráulicos. Essa fragilidade interpretativa se intensifica em sistemas complexos como os

aquíferos de dupla porosidade, nos quais a resposta observada depende criticamente de fatores como a escolha correta do teste, dados como a distância dos poços, a presença (ou ausência) de isolamento hidráulico por obturadores, etc.

Por fim, destaca-se que a qualidade do resultado não depende exclusivamente do modelo matemático empregado, mas sobretudo da coerência entre o modelo conceitual e os dados de entrada. Parâmetros como espessura saturada, distância entre poços de bombeamento e de observação, tempo de estabilização da vazão e frequência das leituras de nível (frequentemente subestimados) são fundamentais para que a interpretação seja fiel à realidade do aquífero.

3.1.1 Modelos Analíticos em Testes de Bombeamento e sua Aplicação no AquiferTest

A interpretação de testes de bombeamento em sistemas hidrogeológicos complexos exige além da coleta criteriosa de dados de campo, a aplicação de modelos matemáticos que estejam conceitualmente alinhados à natureza do aquífero. Nesse aspecto, o software AquiferTest tem se consolidado como uma ferramenta amplamente utilizada, tanto por profissionais, quanto em ambientes acadêmicos, dada sua interface amigável e capacidade de ajustar curvas de rebaixamento e recuperação com base em uma variedade de modelos analíticos e semianalíticos clássicos.

Entre os modelos mais frequentemente utilizados no software se destacam:

- Theis (1935): clássico para aquíferos confinados homogêneos em regime transiente, baseia-se na analogia com a equação de difusão do calor. É o modelo mais difundido, mas pouco adequado a sistemas heterogêneos ou com fraturas;
- Cooper e Jacob (1946): simplificação do modelo de Theis aplicável ao regime de tempo tardio, cuja vantagem está na facilidade de aplicação gráfica. Contudo, desconsidera o comportamento inicial e pode distorcer a interpretação em testes curtos;
- Neuman (1972): introduz o conceito de drenança e compressibilidade, que permite maior realismo em aquíferos livres e parcialmente penetrados, mas sua aplicação é ainda mais restrita para meios fraturados;
- Warren e Root (1963): modelo de dupla porosidade que considera o fluxo em fraturas com armazenamento dominante na matriz porosa. É útil para interpretar sistemas bifásicos, como aqueles frequentemente encontrados no Grupo Paranoá;
- Moench (1984): modelo híbrido avançado que combina os conceitos de dupla porosidade com o efeito de pele (resistência hidráulica na interface poço-formação), um dos mais eficazes para aquíferos fraturados com resposta composta.

A escolha do modelo ideal deve ser orientada pelo modelo conceitual do aquífero. Em

situações como o Subsistema R₃/Q₃, nos quais se reconhece a presença simultânea de fraturas e matriz porosa intemperizada, os modelos de porosidade única são apenas parcialmente aplicáveis. Nestes casos, a aplicação dos métodos de Warren e Root ou Moench se mostram adequados, pois permitem a captura das inflexões típicas das curvas observadas, além de oferecer parâmetros específicos como o coeficiente de troca entre domínios (σ).

A Tabela 3.1 sintetiza as principais características desses modelos e destaca o tipo de porosidade, parâmetros estimáveis e limitações conceituais. Essa análise comparativa é essencial para evitar erros na interpretação de dados de campo e na extrapolação dos parâmetros hidráulicos para modelagens de escala regional ou para estudos de recarga, exploração e vulnerabilidade.

3.1.2 Panorama do Distrito Federal e Aplicação dos Testes de Bombeamento

No contexto da gestão de recursos hídricos subterrâneos, os testes de bombeamento são exigidos formalmente como parte do processo de concessão de outorga em diversas unidades da federação. No Distrito Federal, essa exigência está regulamentada desde 2006 pela Resolução ADASA nº 350, que estabelece a obrigatoriedade da realização de testes para a solicitação de uso de águas subterrâneas. A partir desse marco, é consolidada uma crescente incorporação desses dados nos processos técnicos de licenciamento, ainda que com limitações significativas na forma como são conduzidos, tratados e interpretados.

Atualmente, a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA) mantém um sistema de cadastro de usuários e prestadores de serviços, que estabelece os critérios para registro de agentes perfuradores de poços. Apesar desses avanços institucionais, os relatórios gerados pelas empresas executoras nem sempre seguem boas práticas de caracterização hidrogeológica. Dados imprecisos sobre a geometria do poço, ausência de poços de observação, tempo de teste insuficiente e falta de clareza na delimitação das zonas de contribuição são aspectos recorrentes que dificultam a aplicação de métodos interpretativos mais robustos. Em ambientes hidrogeologicamente complexos, como os do Grupo Paranoá, a interpretação inadequada desses testes, muitas vezes aplicada sem conhecimento do modelo conceitual, gera resultados inconsistentes e de baixa representatividade.

Embora a base de dados de poços e testes de bombeamento no Distrito Federal tenha crescido nas últimas décadas, grande parte ainda carece de tratamento sistemático e padronização para uso em modelagens hidrogeológicas mais avançadas. Isso evidencia a importância de integrar os testes de bombeamento não apenas como exigência regulatória, mas como ferramenta interpretativa fundamental, especialmente em regiões cuja oferta hídrica depende significativamente das águas subterrâneas.

Tabela 3.1 - Comparação entre os principais modelos analíticos aplicáveis em testes de bombeamento, com base em suas características conceituais, parâmetros estimáveis e adequação ao Subsistema Aquífero R₃/Q₃ do Grupo Paranoá. A tabela destaca os pressupostos estruturais de cada modelo, os domínios de porosidade representados, a fase do ensaio melhor ajustada por cada abordagem e os limites de aplicabilidade em sistemas com comportamento composto ou de dupla porosidade. T - Transmissividade; S - Armazenamento; σ - Fator de pele; γ - Fator de troca.

Modelo	Tipo de Aquífero	Porosidade Representada	Condições de Contorno	Fase do Ensaio Melhor Representada	Parâmetros Estimados	Aplicabilidade a Sistema de Dupla Porosidade
Theis (1935)	Confinado, homogêneo e isotrópico	Porosidade única (homogênea e contínua)	Idealizado: fluxo radial, poço totalmente penetrante, carga constante, sem recarga	Curva completa (início ao final), mas ideal para resposta inicial	T e S	Aplicável com limitações: não representa heterogeneidade nem retardo; útil como base comparativa ou primeiro ajuste, mas não representa bem sistemas compostos de dupla porosidade
Cooper-Jacob (1946)	Confinado (tempo tardio)	Porosidade única (homogênea e contínua)	Mesmas de Theis, mas aplicadas em regime de tempo tardio, desprezando efeito inicial	Apenas a fase intermediária (semi-log) do teste	T e S	Parcialmente aplicável à meios de dupla porosidade em testes longos e estabilizados; não capta respostas compostas nem retardo; útil para análises rápidas com dados de campo escassos
Neuman (1972)	Livre / semiconfinado	Porosidade única (intergranular ou fraturas), com compressibilidade	Considera retardo da superfície livre e compressão da formação	Curva inicial e intermediária	T e S	Aplicável apenas onde há domínio único; não representa troca entre domínios
Warren e Root (1963)	Confinado (ou pseudo-livre)	Dupla porosidade com interação uniforme	Idealizado, sem variação da superfície livre	Curva intermediária e estabilização	T, S, γ e σ	Representa a dupla porosidade, mas não capta bem comportamento com geometria variável ou oscilação livre
Moench (1984)	Livre ou confinado	Dupla porosidade com troca e retardo variáveis	Superfície livre variável, troca dinâmica e pele hidráulica	Todo o ensaio: início, transição e estabilização	T, S, γ , σ e SF	Modelo mais completo e realista para dupla porosidade: representa fluxo misto, pele, heterogeneidade e regime não confinado

3.1.3 Variáveis Críticas e Limitações Técnicas na Aplicação dos Testes de Bombeamento

A aplicação prática dos testes de bombeamento, mesmo com suporte de softwares avançados como o AquiferTest, permanece suscetível a uma série de incertezas operacionais, conceituais e geométricas, especialmente em sistemas complexos como aquíferos fraturados e de dupla porosidade, que são enumerados a seguir.

Ausência de Isolamento Hidráulico: o Problema da Mistura de Respostas

Uma das implicações práticas mais recorrentes dessa abordagem é a geração de resultados

compostos, que expressam a mistura de comportamentos hidrodinâmicos distintos. Esse problema é particularmente frequente em aquíferos compostos por dois domínios superpostos, como um de dupla porosidade na zona saprolítica e outro de fraturas ativas em profundidade, comum em casos de manto de intemperismo muito espesso (até dezenas de metros), sobre rochas arenosas fraturadas ou metassedimentares de baixo grau.

O problema se origina, principalmente, da forma como os poços são construídos e os testes são conduzidos. Em muitos casos, a perfuração atravessa diferentes domínios hidrogeológicos (como a zona saprolítica e a zona fraturada profunda) sem que haja isolamento hidráulico entre eles, devido à instalação contínua de filtros ou à ausência de obturadores. Isso permite que, durante o bombeamento, ocorra contribuição simultânea de sistemas com tempos de resposta distintos: a zona fraturada responde rapidamente, com rebaixamento acentuado nos primeiros minutos, enquanto a zona porosa ou saprolítica libera água mais lentamente, por fluxo de drenança da matriz para as fraturas (fluxo retardado), que atua com atraso na curva de rebaixamento.

As unidades litológicas do Grupo Paranoá são marcadas por intensa compartimentação estrutural, com a alternância de quartzitos intensamente fraturados e filitos ou metapelitos com matriz porosa, além da ocorrência de espessas zonas de intemperismo que, em muitas regiões, ultrapassam 30 metros de espessura. Essa heterogeneidade vertical cria um ambiente hidrogeológico complexo, no qual diferentes domínios de fluxo, intergranular e fraturado, coexistem em profundidades distintas, cada qual com respostas hidrodinâmicas próprias.

Do ponto de vista hidrodinâmico, trata-se de uma resposta composta por fluxos concorrentes, que impossibilita o ajuste adequado por modelos de porosidade única, como Theis ou Cooper-Jacob. Neste tipo de sistema, a estimativa de parâmetros como transmissividade e coeficiente de armazenamento por meio dos métodos supracitados tende a apresentar valores médios não representativos: a transmissividade pode ser superestimada se a fratura tiver alta conectividade e o coeficiente de armazenamento pode ser subestimado por não considerar o armazenamento efetivo da matriz porosa.

Nesse contexto, a curva de rebaixamento obtida representa uma resposta composta, que não se ajusta perfeitamente a modelos clássicos de porosidade única e que, se interpretada erroneamente, pode gerar estimativas irreais de transmissividade e armazenamento. Isso poderia ser solucionado com o desenvolvimento de testes em poços obturados ou de observação, que permitiriam isolar e interpretar separadamente os domínios hidráulicos. O resultado é um conjunto de dados de difícil aplicação em modelagens hidrogeológicas ou planos de manejo.

Espessura Saturada: um Parâmetro Sensível e Frequentemente Negligenciado

A espessura saturada (b) é um dos parâmetros mais críticos para o cálculo da condutividade hidráulica, uma vez que, $K = \frac{T}{b}$. No entanto, a definição prática de “b” é frequentemente negligenciada ou arbitrária, o que compromete significativamente a confiabilidade dos resultados. Em aquíferos complexos como os fraturados e de dupla porosidade, cuja estrutura vertical inclui zonas saprolíticas, zona com porosidade matricial e fraturas e outra mais profunda apenas com fraturas, a definição da espessura sem conhecimento detalhado do perfil construtivo e geológico do poço pode resultar em erros sistemáticos.

A título de exemplo, se um poço capta majoritariamente água de fraturas localizadas entre 30 e 70 metros de profundidade, mas o cálculo de K considera a profundidade total perfurada de 120 metros, haverá uma subestimação artificial de K, uma vez que a transmissividade (T) será diluída por uma espessura não produtiva. Isso pode levar à interpretação equivocada de que o aquífero é pouco produtivo ou de baixa condutividade, quando na verdade o erro é metodológico.

Possibilidades para definição da espessura saturada incluem, preferencialmente, o uso de dados diretos obtidos por meio de perfilogens geofísicas, vídeo-inspeções ou pela identificação das zonas efetivamente produtivas ao longo da construção do poço. Na ausência dessas informações, é possível adotar critérios conservadores. Uma prática recorrente em estudos técnicos é considerar um acréscimo de 10% à profundidade da zona saturada identificada no perfil construtivo, conforme sugerido por Miguel (2023). Ainda assim, é importante ressaltar que tal critério é empírico e deve sempre ser avaliado à luz das condições geológicas locais, especialmente em ambientes com significativa variabilidade de intemperismo e fraturamento.

No contexto hidrogeológico do Distrito Federal, é observado uma grande variação espacial na espessura ativa dos aquíferos. Nas porções elevadas das chapadas, o perfil de alteração pode ultrapassar os 30 metros de profundidade, e a zona saturada ativa frequentemente se estende até 50 metros, especialmente em áreas de maior infiltração e recarga difusa. Em contrapartida, nas bordas da chapada, a espessura produtiva tende a ser reduzida, com a predominância de uma participação da matriz porosa. Essa heterogeneidade reforça a importância de se adotar modelos conceituais hidrogeológicos locais, a fim de evitar generalizações que possam comprometer a interpretação dos parâmetros hidráulicos.

Distância entre Poços: Impacto na Confiabilidade dos Parâmetros

A distância radial (r) entre o poço de bombeamento e o de observação é uma variável importante nos testes de bombeamento. A estimativa de parâmetros como o coeficiente de armazenamento depende de forma logarítmica dessa distância nos modelos de Theis, Cooper-

Jacob e Moench. Isso significa que uma diferença de poucos metros pode representar um erro de até uma ordem de grandeza nos resultados (Kruseman e de Ridder, 1994).

Além disso, em ambientes fraturados e anisotrópicos o campo de fluxo não é radial, e sim guiado pelas direções preferenciais de fraturamento. Assim, dois poços equidistantes do poço de bombeamento podem responder de maneira distinta, que depende de sua posição em relação à estrutura geológica.

A correta definição da espessura saturada e da distância entre os poços é fundamental para a interpretação dos testes de bombeamento, sobretudo em aquíferos fraturados. Neste estudo, a espessura saturada foi estimada como 10% superior à profundidade perfurada na zona de saturação, critério adotado em função da ausência de dados diretos, como perfilagens geofísicas ou vídeo-inspeção. Como os testes foram realizados sem poços de observação, o monitoramento do rebaixamento foi feito diretamente nos poços de bombeamento. Para fins de cálculo, considerou-se a distância entre o poço de bombeamento e o poço de observação igual a 1 metro.

Essa escolha visa tanto a estabilidade numérica quanto a coerência física: nos modelos analíticos utilizados, o parâmetro radial (r) aparece no denominador elevado ao quadrado, e valores muito baixos (como 0,1 m) podem gerar instabilidade matemática e distorções na estimativa dos parâmetros hidráulicos. Ao adotar $r = 1$ m, evita-se a superestimação dos resultados e garante-se uma representação mais estável e condizente com o comportamento real da zona próxima ao poço, onde a diferença de rebaixamento é praticamente desprezível.

3.2 ESTUDO DE CASO - SUBSISTEMA AQUÍFERO R₃/Q₃ NO DISTRITO FEDERAL

O Subsistema Aquífero R₃/Q₃, vinculado ao Sistema Paranoá, destaca-se como um dos principais reservatórios subterrâneos do Distrito Federal, devido a sua ampla distribuição espacial, relevância no abastecimento de diversas comunidades e complexidade estrutural. Tradicionalmente interpretado como um aquífero fraturado, este subsistema apresenta evidências geológicas e hidrogeológicas que apontam para um funcionamento mais complexo, compatível com o conceito de aquífero de dupla porosidade. Essa concepção considera a coexistência de dois domínios de porosidade com comportamento hidrodinâmico distinto: um sistema de fraturas de alta condutividade e baixa capacidade de armazenamento, e uma matriz porosa com elevada capacidade de armazenamento e baixa condutividade (ADASA, 2015).

Para interpretar adequadamente os testes de bombeamento é necessário o uso de modelos analíticos capazes de representar esse tipo de meio heterogêneo e anisotrópico. A complexidade do Subsistema R₃/Q₃ também se manifesta espacialmente. Poços localizados nas bordas das chapadas, geralmente em terrenos com intenso fraturamento e baixo grau de alteração devido a

geomorfologia, tendem a apresentar comportamentos típicos de aquíferos fraturados, com rebaixamento rápido e linear. Por outro lado, poços situados no interior das chapadas, em zonas com saprolito espesso, matriz alterada e fraturas conectadas, frequentemente apresentam respostas hidrogeológicas compatíveis com sistemas de dupla porosidade, como rebaixamento inicial lento, estabilização precoce e maior capacidade de armazenamento. A análise comparativa entre essas duas situações é fundamental para validar o modelo conceitual proposto para o subsistema.

Dessa forma, os principais objetivos deste estudo de caso incluem:

- Avaliar os comportamentos das curvas de rebaixamento obtidas nos testes de bombeamento em poços distribuídos entre áreas de borda e interior das chapadas;
- Aplicar e comparar os modelos analíticos propostos, a fim de verificar qual deles apresenta melhor ajuste às diferentes configurações hidroestruturais do aquífero;
- Avaliar as características construtivas dos poços que afetam a interpretação dos testes de bombeamento;
- Interpretar os parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento) e vazão, a fim de avaliar suas variações conforme a posição geográfica, os tipos de rochas predominantes e o modelo aplicado.

3.2.1 Materiais e Métodos

A análise dos dados de campo foi conduzida com base em 24 testes de bombeamento (Apêndices 1 e 2), considerados dados secundários, obtidos a partir de relatórios técnicos de empresas de perfuração que atuam no Distrito Federal (Apêndice 3). Esses testes foram realizados em poços tubulares distribuídos em diferentes setores do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, localizados tanto nas bordas quanto o interior das chapadas (Figura 3.1). A distribuição espacial dos dados é importante para a comparação entre os diferentes modelos conceituais do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, uma vez que as bordas apresentam maior influência do fraturamento estrutural, enquanto as regiões internas, mais alteradas e com regolitos espessos, evidenciam contribuição significativa da matriz porosa, característica de sistemas de dupla porosidade.

A seleção dos modelos analíticos utilizados na interpretação dos testes de bombeamento foi baseada em dois critérios principais: i) a compatibilidade entre o modelo matemático e o modelo conceitual do aquífero; e ii) a capacidade dos modelos de representar adequadamente os comportamentos hidrodinâmicos observados nas curvas de rebaixamento.

Ao considerar a complexidade estrutural e hidrogeológica do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, caracterizado por heterogeneidade vertical, fraturas conectadas e presença de matriz porosa retentiva, optou-se pela aplicação dos modelos analíticos de Warren e Root (1963) e Moench

(1984), disponíveis no software AquiferTest 10.0, da Waterloo Hydrogeologic. Estes modelos são considerados os mais adequados à simulação de sistemas de dupla porosidade e comportamento composto, sendo amplamente utilizados na literatura para aquíferos análogos aos presentes no Sistema Paranoá.

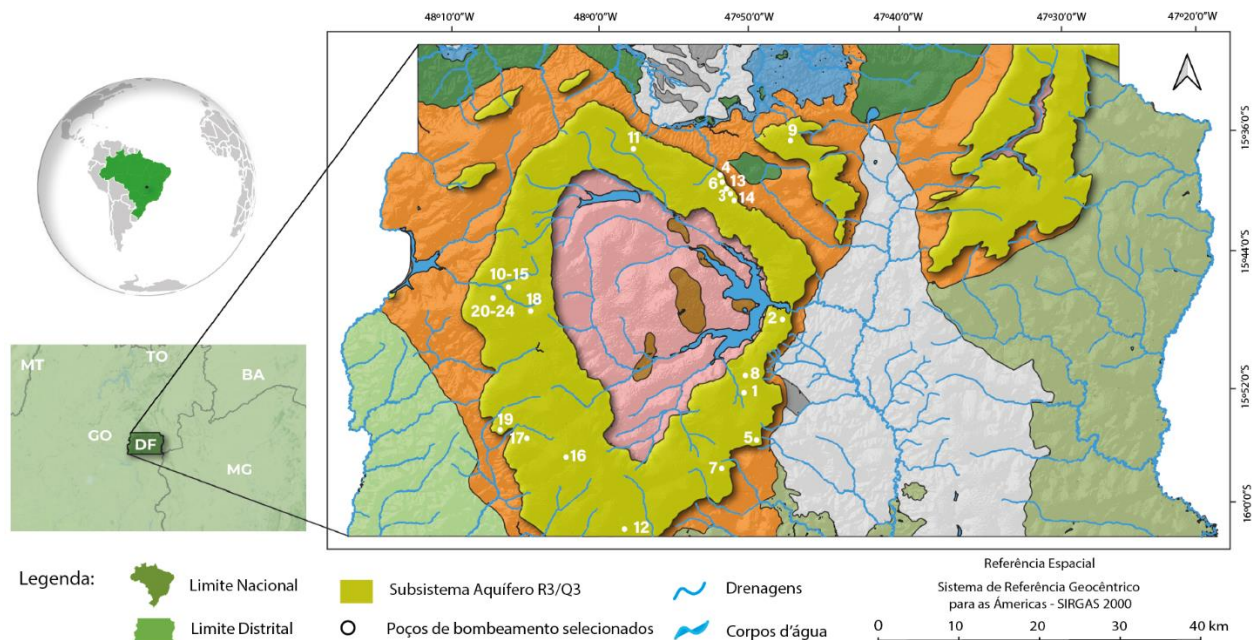


Figura 3.1 - Localização dos poços com disponibilidade de dados de testes bombeamento no Subsistema Aquífero R₃/Q₃.

O modelo de Warren e Root foi originalmente desenvolvido para representar reservatórios naturalmente fraturados, nos quais o fluxo ocorre predominantemente nas fraturas, enquanto o armazenamento de água se dá majoritariamente na matriz porosa. Esse modelo assume uma troca de massa constante entre os dois domínios e considera o meio como homogeneamente duplamente poroso (Warren e Root, 1963). Sua aplicação permite estimar parâmetros como transmissividade (T), armazenamento da fratura (Sf), armazenamento da matriz (Sm) e o fator de troca entre os domínios (σ), sendo especialmente útil para interpretar sistemas onde há transições de fluxo do tipo retardo, como identificado em muitos dos poços do Sistema Paranoá.

Por sua vez, o modelo de Moench apresenta uma abordagem mais abrangente e realista para aquíferos compostos. Além de incorporar a lógica de dupla porosidade com taxa de troca variável (σ), o modelo considera também os efeitos de armazenamento no poço (*wellbore storage*) e a presença de camada de pele hidráulica (*skin effect*), aspectos relevantes em poços com grandes diâmetros, revestimento parcial ou tempo de resposta inicial lento (Moench, 1984).

A aplicação combinada desses dois modelos proporcionou maior robustez à interpretação dos testes de bombeamento e permitiu não apenas a extração de parâmetros hidráulicos

representativos, mas também uma análise mais fiel da dinâmica de fluxo em ambientes de fraturamento complexo e porosidade composta, como verificado no Subsistema R₃/Q₃.

Os dados dos testes foram organizados considerando a localização do poço (borda e chapada), a profundidade total, a duração do ensaio, o nível estático, o nível dinâmico e espessura saturada. Foram priorizados os ensaios que apresentavam duração adequada (mínimo de 12 horas), estabilização da vazão e registro contínuo da evolução dos rebaixamentos produzidos pelo bombeamento dos poços. Em relação a espessura da zona saturada, foi utilizado o valor da profundidade do poço perfurada na zona de saturação mais 10%, de forma conservadora. Além disso, os parâmetros hidráulicos estimados foram tabulados e analisados estatisticamente, com cálculo de valores mínimos, máximos e médios para os grupos de poços situados nas bordas e no interior das chapadas.

Por fim, dois testes foram selecionados para representar comportamentos contrastantes: um típico de aquífero fraturado e um de dupla porosidade. Esses exemplos serão detalhadamente discutidos na próxima seção com base nas curvas obtidas a partir do software AquiferTest.

3.2.2 Resultados e Discussões

Curvas de Rebaixamento: Padrões Contrastantes

A análise das curvas de rebaixamento dos testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R₃/Q₃ permitiu identificar diferentes comportamentos hidrodinâmicos, reflexo da heterogeneidade estrutural, do grau de intemperismo das rochas e do tipo de porosidade predominante. Dois testes foram selecionados para representar comportamentos contrastantes: o TB3, com comportamento típico de aquífero fraturado; e o TB12, cuja curva é compatível com sistemas de dupla porosidade.

Teste TB3: Comportamento de aquífero fraturado

A curva do teste TB3 revela um rebaixamento acentuado nas primeiras dezenas de minutos, com estabilização posterior. Esse comportamento é típico dos aquíferos fraturados, onde o fluxo ocorre majoritariamente por fraturas conectadas, com baixa capacidade de armazenamento (Figura 3.2). A elevada taxa de rebaixamento inicial indica uma resposta imediata à extração de água, com rápida propagação da depressão piezométrica. A ausência de inflexões ou mudanças de declividade ao longo do tempo sugere um meio homogêneo em termos de condutividade, mas com porosidade concentrada em descontinuidades estruturais planares. Este tipo de resposta, discutido por Severgnini *et al.* (2021), caracteriza meios com matriz rochosa praticamente impermeável e fluxo dependente da conectividade das fraturas. No modelo de aquíferos fissurais, o

comportamento da curva de rebaixamento versus tempo dos poços está associado as bordas das chapadas, em rochas pouco intemperizadas e com restrita dissolução de cimento silicoso e alteração de filossilicatos e feldspatos.

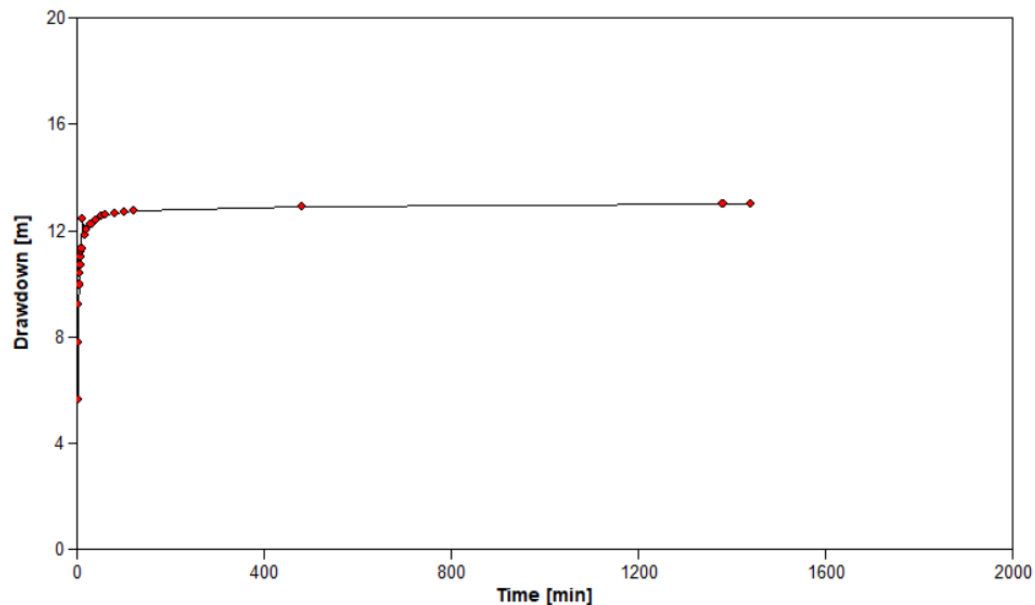


Figura 3.2 - Curva de rebaixamento do teste TB3. Comportamento típico de aquífero fraturado: rebaixamento rápido e constante ao longo do tempo, sem inflexões, indicando predomínio de fluxo em fraturas conectadas e baixa contribuição da matriz porosa.

Teste TB12: Comportamento de aquífero de dupla porosidade

A curva de rebaixamento do teste TB12 é marcada por três estágios bem definidos: um primeiro trecho de rebaixamento gradual, seguido de uma fase intermediária com inflexão suave e, por fim, uma estabilização. Essa morfologia de curva é característica de sistemas de dupla porosidade, nos quais o fluxo inicial ocorre nas fraturas e, com o tempo, passa a ser sustentado por uma drenagem progressiva da matriz porosa no decorrer do tempo (Figura 3.3). O comportamento apresentado se assemelha aos resultados discutidos por Severgnini *et al.* (2021), no qual os métodos de Moench e Warren e Root apresentaram um melhor ajuste em curvas com múltiplos regimes. A estabilização e o menor rebaixamento total observado refletem a capacidade de armazenamento significativa da matriz, que atua como um “amortecedor hidráulico” frente à extração contínua de água. Este comportamento é observado em poços instalados no interior das chapadas, onde ocorre uma maior espessura de saprolito e intemperismo avançado das rochas, que favorece a presença de porosidade intergranular.

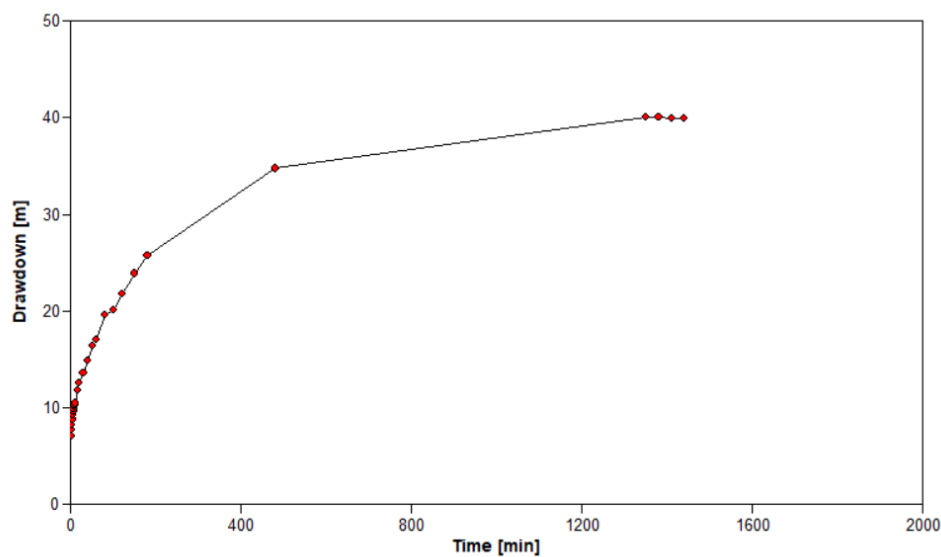


Figura 3.3 - Curva de rebaixamento do TB12. Comportamento típico de aquífero de dupla porosidade: rebaixamento amortecido, múltiplas fases e estabilização precoce, com participação expressiva da matriz porosa na sustentação do fluxo ao longo do tempo.

Esses dois modelos ilustram, de forma clara, os diferentes comportamentos hidrodinâmicos no Subsistema R_3/Q_3 e reforçam a importância da aplicação de modelos analíticos capazes de capturar essa complexidade. Em especial, o modelo de Moench é eficaz para representar as curvas dos testes TB12 por incorporar fatores como troca variável entre domínios, efeito de pele e armazenamento no poço. Por outro lado, o teste TB3 pode ser satisfatoriamente interpretado por modelos clássicos ou pelo modelo de Warren e Root, dada a sua maior simplicidade e ausência de múltiplas fases.

Ajuste aos Modelos Analíticos

A comparação entre os modelos analíticos de Warren e Root (1963) e Moench (1984) aplicada aos testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R_3/Q_3 demonstrou que, de modo geral, os dois métodos apresentaram comportamentos gráficos bastante semelhantes. Em testes o TB-3, localizado em zona de borda, ambos os modelos forneceram ajustes praticamente coincidentes (Figura 3.4), o que indica que em áreas onde o fluxo é dominado pelas fraturas, os modelos conseguem representar adequadamente a resposta hidráulica do sistema, independentemente da abordagem analítica adotada.

Por outro lado, em testes como o TB-15 e o TB-22, ambos localizados no interior das chapadas, existem diferenças no ajuste entre os dois modelos (Figura 3.5). Nesses casos, o modelo de Moench (1984) apresentou melhor ajuste às curvas de rebaixamento observadas, especialmente durante a fase de transição entre o escoamento inicial e o regime quasi-estacionário. Isso se deve à

capacidade do modelo de Moench de incorporar explicitamente o parâmetro γ (fator de troca) que representa a taxa de troca entre o domínio fraturado e poroso, que proporciona uma representação mais robusta do comportamento transiente típico de sistemas com dupla porosidade.

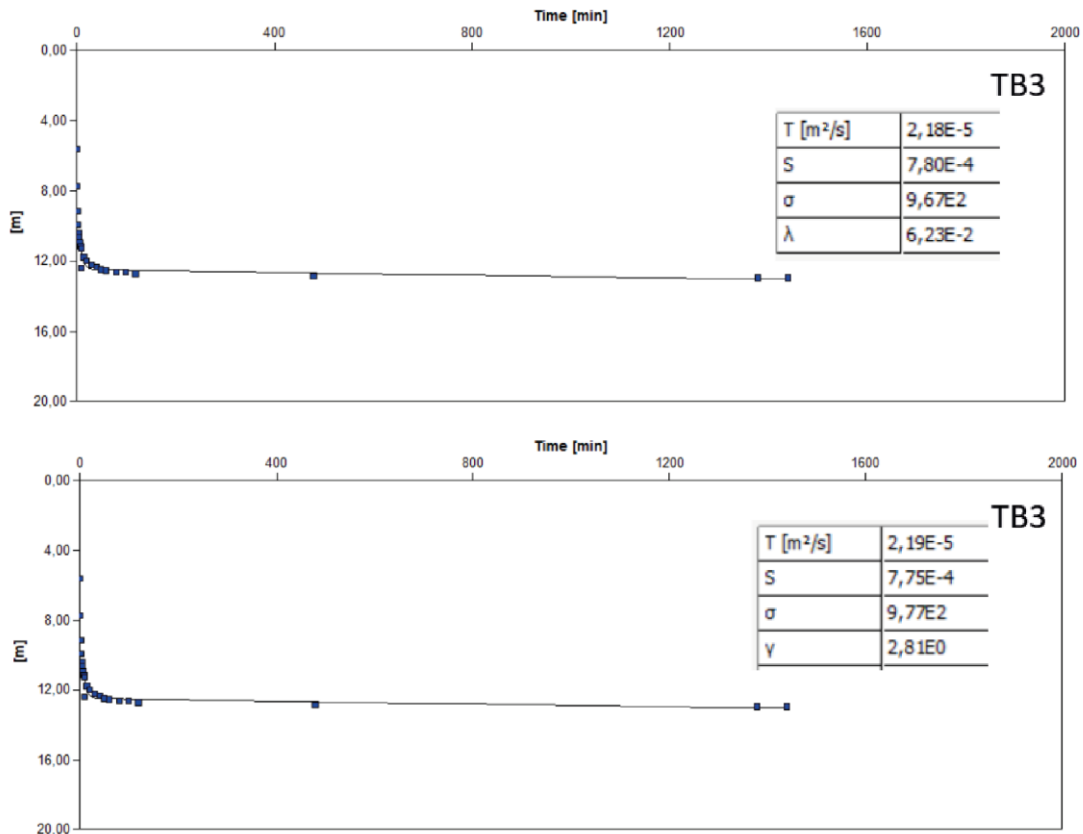


Figura 3.4 - Ajuste dos modelos analíticos Warren e Root e Moench, respectivamente, aplicados ao teste TB-3, localizado na borda da chapada. Os resultados indicam comportamento gráfico similar entre os dois modelos, sugerindo que, nesta região, o escoamento é dominado por fraturas com baixa contribuição da matriz porosa. A resposta hidráulica do sistema pode ser adequadamente representada pelos dois métodos.

É importante destacar que essa melhor aderência do modelo de Moench não foi limitada a uma única posição geográfica, observada tanto em áreas de interior quanto em alguns testes localizados em bordas.

A similaridade entre os ajustes dos modelos em muitos dos testes evidencia que, em vários setores do aquífero, a resposta hidráulica pode ser bem descrita por abordagens baseadas em fraturas simples. No entanto, a observação de ajustes mais adequados com Moench em outros pontos indica que a dupla porosidade é um elemento presente e relevante.

Dessa forma, os resultados sugerem que, embora nenhum método isoladamente se sobressaia em todos os casos, o de Moench apresenta maior flexibilidade para representar variações locais na dinâmica de fluxo, especialmente em áreas onde há indícios de armazenamento significativo na matriz porosa e fluxo retardado entre domínios.

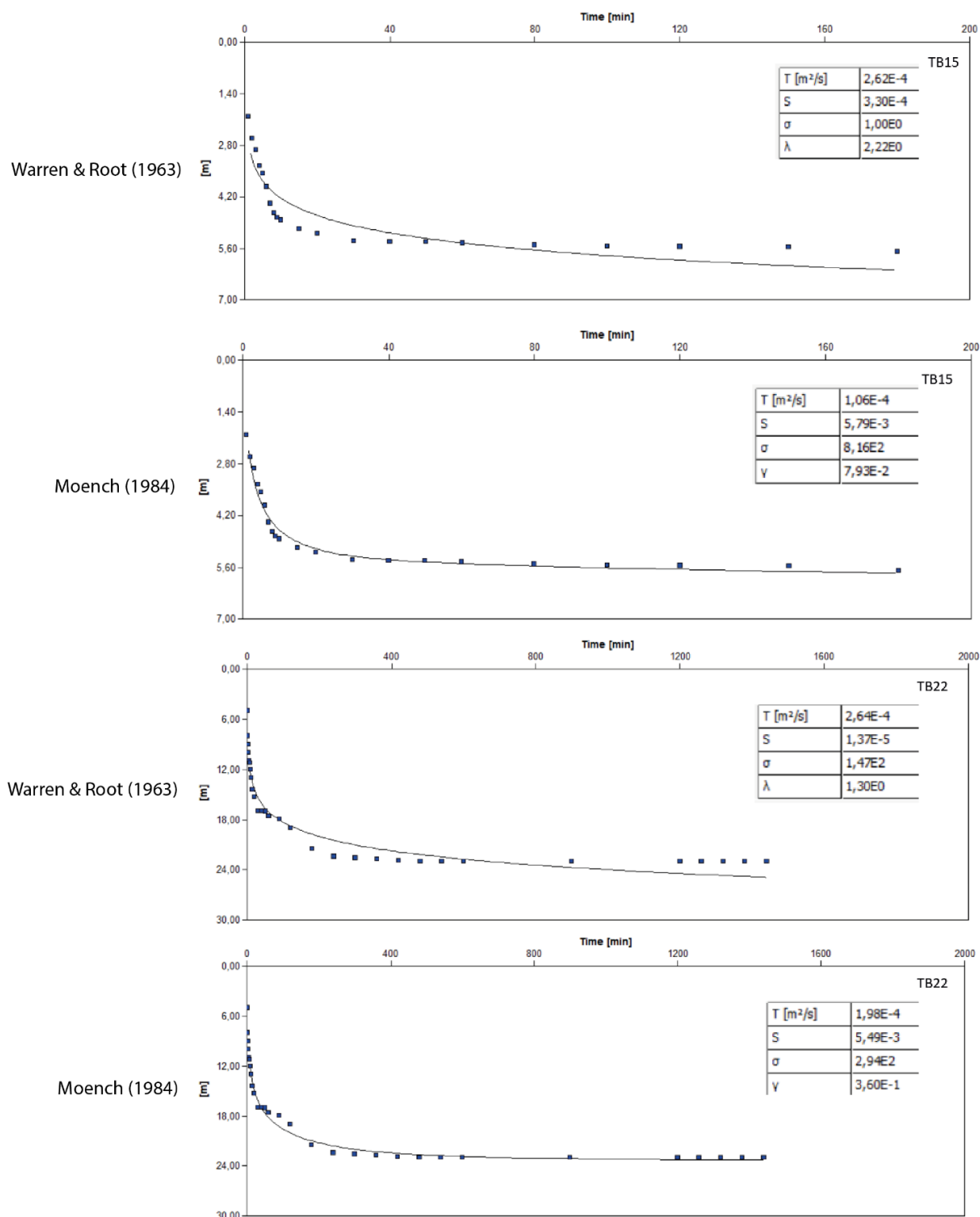


Figura 3.5 - Comparação entre os ajustes dos modelos analíticos aplicados aos testes TB-15 e TB-22, localizados no interior das chapadas. Observa-se que o modelo de Moench apresentou melhor aderência às curvas de rebaixamento, principalmente na fase de transição, que evidencia a influência do mecanismo de dupla porosidade nesses setores. A modelagem com o modelo de Moench captura de forma realista o fluxo retardado proveniente da matriz porosa, comportamento que justifica seu melhor ajuste.

Análise dos Parâmetros Hidrodinâmicos e Vazão

A análise dos 24 testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R₃/Q₃ permitiu estimar os principais parâmetros hidrodinâmicos (Apêndice 4), que incluem a transmissividade (T), condutividade hidráulica (K), coeficiente de armazenamento (S) e vazão (Q), obtidos a partir do ajuste dos testes aos modelos analíticos de Warren e Root (1963) e Moench (1984).

Embora haja variações individuais nos valores obtidos, os resultados se mantêm dentro da faixa esperada para aquíferos de dupla porosidade, com transmissividade entre 10⁻³ e 10⁻⁵ m²/s, condutividade hidráulica entre 10⁻⁵ e 10⁻⁷ m/s e coeficiente de armazenamento entre 10⁻¹ e 10⁻³. Esses resultados são coerentes com o potencial hidrodinâmico do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ em áreas já reconhecidas por sua produtividade, o que indica que as médias obtidas refletem de forma adequada os comportamentos reais do sistema.

As pequenas variações observadas entre os testes podem estar associadas à heterogeneidade geológica natural do aquífero e, em menor grau, às limitações operacionais dos ensaios, como variações na qualidade construtiva dos poços e possíveis incertezas nas condições de contorno. Ao considerar que parte significativa desses testes foi realizada em décadas passadas, é possível que nem todos os procedimentos atualmente recomendados (como a definição precisa das zonas produtivas, o correto posicionamento de filtros, a vedação eficaz de seções improdutivas) tenham sido rigorosamente seguidos. Outro fator relevante é a definição imprecisa da espessura saturada (b). Em alguns testes, esse valor foi estimado com base na profundidade perfurada e não com base na efetiva espessura produtiva do aquífero. Como a condutividade hidráulica é derivada da transmissividade ($K = \frac{T}{b}$), esse tipo de imprecisão pode conduzir a subestimações significativas deste parâmetro.

Tabela 3.2 - Resumo estatístico dos parâmetros hidrodinâmicos (T, K, S), das vazões de estabilização (Q) e da espessura da zona saturada (b) dos 24 testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R₃/Q₃, com valores mínimos, máximos e médios estimados a partir dos modelos de Moench (1984) e Warren e Root (1963).

	Moench (1984)			Warren e Root (1963)		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
T (m ² /s)	8,45x10 ⁻⁴	2,40x10 ⁻⁶	1,40x10 ⁻⁴	2,60x10 ⁻²	1,09x10 ⁻⁷	1,16x10 ⁻³
K (m/s)	3,56x10 ⁻⁶	1,76x10 ⁻⁸	8,67x10 ⁻⁷	3,63x10 ⁻⁶	1,76x10 ⁻⁸	9,31x10 ⁻⁷
S	4,18x10 ⁻²	3,14x10 ⁻¹⁰	5,71x10 ⁻³	1,96x10 ⁻²	9,25x10 ⁻¹⁰	2,74x10 ⁻³

	Máximo	Mínimo	Média
Q (m ³ /h)	46	2,2	12,83
b (m)	237,3	46,7	134,21

Em contraste, nos poços localizados no interior das chapadas, os valores de T e K foram significativamente mais elevados, mesmo diante das limitações metodológicas já discutidas. As transmissividades médias se aproximaram da faixa esperada para aquíferos com características de dupla porosidade e as condutividades hidráulicas refletiram um meio poroso e conectado (Tabela 3.3). As vazões médias também foram superiores, com destaque para poços em condomínios da região, nos quais foram registradas as maiores vazões absolutas de todos os testes realizados.

Nos poços localizados nas bordas das chapadas, os valores estimados de transmissividade e condutividade hidráulica foram baixos em geral, assim como as vazões obtidas (Tabela 3.4). Nessa região, o escoamento é predominantemente controlado por fraturas, com espessura saturada reduzida e conectividade hidráulica limitada, o que restringe tanto o armazenamento quanto a transmissividade. A ausência de perfis lateríticos ou de saprolito espesso também reduz a contribuição da matriz porosa, o que resulta em um comportamento hidrogeológico mais próximo de um sistema fraturado clássico, com menor capacidade de resposta a longo prazo.

Esse padrão é coerente com o modelo conceitual do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, que prevê participação da matriz porosa nas zonas planas, associada a um grau avançado de intemperismo, espessura saturada expressiva e presença de saprolito. A associação entre vazões, transmissividades elevadas e a localização dos poços no interior das chapadas reforça a compreensão de que essas porções do aquífero funcionam como um sistema de dupla porosidade funcionalmente ativo.

A análise espacial dos resultados evidenciou uma distinção clara entre os poços localizados nas bordas e das chapadas. Nas bordas, os valores médios foram sistematicamente baixos, o que é compatível com comportamento hidrogeológico dominado apenas por fraturas com interconexão espessura saturada. Nessas áreas, a ausência de saprolito espesso e de perfis de alteração desenvolvidos reduz significativamente a contribuição da matriz porosa ao escoamento subterrâneo.

Por outro lado, os poços do interior das chapadas apresentam valores consistentemente altos de T, K e Q. Esse padrão indica que, nessas regiões, o Subsistema Aquífero R₃/Q₃ opera com características claras de dupla porosidade, associadas à presença de zonas intemperizadas espessas, continuidade entre matriz e fraturas e capacidade de armazenamento e fluxo. A existência de poços com altas vazões nessas áreas reforça essa interpretação.

Dessa forma, os comportamentos hidrodinâmicos observados nos testes de bombeamento analisados estão intimamente relacionados às características geológicas e geomorfológicas do Subsistema Aquífero R₃/Q₃. A variação nos valores de transmissividade, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e vazão entre os poços investigados reflete a natureza

estruturalmente heterogênea do Grupo Paranoá, que abriga zonas de fraturamento intenso, níveis de alteração distintos e presença variável de matriz porosa.

Tabela 3.3 - Parâmetros hidrodinâmicos e vazões obtidos em poços localizados no interior das chapadas, evidenciando os maiores valores de T, K, S, Q e b associados à contribuição da matriz porosa e à maior espessura saturada típica da porção planáltica do aquífero.

Interior das Chapadas Elevadas						
	Moench (1984)			Warren e Root (1963)		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
T (m ² /s)	8,45x10 ⁻⁴	7,35x10 ⁻⁶	1,96x10 ⁻⁴	8,62x10 ⁻⁴	6,15x10 ⁻⁶	2,07x10 ⁻⁴
K (m/s)	3,56x10 ⁻⁶	9,32x10 ⁻⁸	1,14x10 ⁻⁶	3,6 x10 ⁻⁶	6,72x10 ⁻⁸	1,24x10 ⁻⁶
S	4,18x10 ⁻²	3,14x10 ⁻¹⁰	6,65x10 ⁻³	1,96x10 ⁻²	9,25x10 ⁻¹⁰	2,68x10 ⁻³

	Máximo	Mínimo	Média
Q (m ³ /h)	46,00	2,20	15,14
b (m)	237,3	48,4	147,18

Tabela 3.4 - Parâmetros hidrodinâmicos e vazões obtidos em poços localizados nas bordas das chapadas, caracterizados por menores valores médios de T, K, S, Q e b, compatíveis com um comportamento fraturado com menor espessura saturada e baixa conectividade hidráulica.

Borda das Chapadas Elevadas						
	Moench (1984)			Warren e Root (1963)		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
T (m ² /s)	8,80 × 10 ⁻⁵	2,40 × 10 ⁻⁶	2,80 × 10 ⁻⁵	8,81 × 10 ⁻⁵	2,40 × 10 ⁻⁶	2,81 × 10 ⁻⁵
K (m/s)	1,12 × 10 ⁻⁶	1,76 × 10 ⁻⁸	3,21 × 10 ⁻⁷	1,12 × 10 ⁻⁶	1,76 × 10 ⁻⁸	3,22 × 10 ⁻⁷
S	7,75 × 10 ⁻³	7,14 × 10 ⁻⁴	3,85 × 10 ⁻³	6,47 × 10 ⁻³	7,14 × 10 ⁻⁴	2,85 × 10 ⁻³

	Máximo	Mínimo	Média
Q (m ³ /h)	15,23	3,3	8,21
b (m)	194,2	46,7	115,21

Em relação aos modelos aplicados, os modelos de Warren e Root (1963) e Moench (1984) foram capazes de ajustar as curvas de rebaixamento, porém com diferentes níveis de aderência em função do comportamento local do aquífero. O modelo de Moench mostrou-se mais eficaz nos testes realizados em áreas do interior das chapadas, especialmente por sua capacidade de

representar o fluxo retardado da matriz porosa através do parâmetro γ , o que é característico de sistemas de dupla porosidade. Já o modelo de Warren e Root se ajustou melhor a situações com resposta mais direta e linear ao bombeamento, sendo útil em contextos em que a troca entre matriz e fraturas é menos significativa.

3.2.3 Considerações Finais

A análise integrada dos 24 testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R₃/Q₃ permitiu identificar padrões hidrodinâmicos distintos entre os poços localizados nas bordas e no interior das chapadas. Observou-se que alguns poços apresentaram parâmetros compatíveis com o comportamento de dupla porosidade, especialmente aqueles situados nas porções centrais das chapadas. Nesses setores, também foram registradas as vazões, o que reforça a correlação entre espessura de alteração, contribuição significativa da matriz porosa e produtividade. As médias gerais dos parâmetros transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e armazenamento (S) se mantiveram dentro da faixa esperada para aquíferos compostos, o que reflete adequadamente o potencial hidrodinâmico do sistema.

Dessa forma, os resultados reafirmam a importância da adoção de modelos de dupla porosidade na interpretação hidrodinâmica do Subsistema Aquífero R₃/Q₃, sobretudo no interior das chapadas, onde há evidências concretas de escoamento composto. O modelo de Moench (1984) demonstrou maior capacidade de ajuste aos dados nessas áreas, o que sugere que sua aplicação deve ser priorizada em contextos em que há forte interação entre fraturas e matriz porosa. A diferenciação entre compartimentos hidrológicos internos ao aquífero também fortalece o modelo conceitual proposto que reconhece um comportamento hidrogeológico variável e sensível às mudanças geomorfológicas e pedológicas.

CAPÍTULO IV - PROPOSTA DE ENQUADRAMENTO DO SUBSISTEMA AQUÍFERO R₃/Q₃ COMO RESERVATÓRIO DE DUPLA POROSIDADE

4.1 APLICAÇÃO DO CONCEITO DE AQUÍFERO DE DUPLA POROSIDADE

A teoria do fluxo através de meios porosos foi originada no século passado, quando Henry Darcy publicou em 1856 uma relação empírica tradicionalmente conhecida como lei de Darcy. Esta equação relaciona o fluxo de fluido ao gradiente de pressão por uma constante de proporcionalidade que depende da permeabilidade do meio poroso. Estudos sobre meios fraturados frequentemente se baseavam na suposição de que o fluxo de água através de fraturas e blocos porosos estaria em conformidade com esta lei. No entanto, dados experimentais disponíveis para justificar a validade e aplicabilidade da lei de Darcy ajudaram a evoluir um consenso de que há um limite superior e um limite inferior além dos quais a lei linear de Darcy não se aplica (Basak, 1977).

Dessa forma, a modelagem do fluxo e transporte de fluidos em rochas fraturadas continua a ser um dos maiores desafios da hidrogeologia. Os aquíferos associados a rocha fraturada são caracterizados pela anisotropia associada às variações da condutividade hidráulica e podem também ter elevados graus de heterogeneidade. A quantificação do fluxo e do transporte nessas rochas foi analisada por Neuman (2005), que investigou sobre a quantificação do fluxo e do transporte, desde uma fratura individual até um reservatório aquífero.

A hidrogeologia aplicada aos sistemas fraturados é analisada em detalhes pelo National Research Council (1996) e por Singhal e Gupta (2010). Em uma perspectiva hidrogeológica aplicada, as principais questões técnicas são a caracterização e a representação de sistemas de fraturamento, a quantificação da interconexão entre a estrutura planar com os blocos de matriz adjacentes e a determinação das propriedades hidráulicas da fratura.

Uma fratura é definida como uma fenda, junta ou ruptura em rocha originada por falha mecânica como resultado de uma tensão aplicada, estrutura que pode ser orientada de forma paralela, perpendicular ou oblíqua ao esforço principal (Fossen, 2017). Fraturas abertas e hidraulicamente ativas são importantes nos aquíferos de rochas sedimentares, na medida em que podem ter uma condutividade hidráulica superior à da matriz do aquífero e, assim, aumentar a transmissividade e a condutividade hidráulica equivalente (vertical e horizontal) dos aquíferos e dos aquitardes. Por outro lado, as fraturas que são preenchidas por algum material, podem atuar como barreiras ao fluxo de água subterrânea.

Nas rochas cristalinas, a circulação de água subterrânea ocorre predominantemente por meio das fraturas, que representam a única fonte significativa de porosidade e permeabilidade,

condicionadas à abertura e continuidade hidráulica dessas estruturas planares. Em contrapartida, nas rochas sedimentares e metassedimentares de baixo grau metamórfico, além das fraturas associadas a planos de acamamento e estruturas tectônicas, a matriz rochosa ainda preserva porosidade primária intergranular. Essa combinação de condutividade em fraturas e armazenamento na matriz confere ao meio um comportamento típico de dupla porosidade, o que torna insuficiente a adoção de um modelo conceitual baseado apenas na premissa de aquífero fraturado

A definição de um aquífero de dupla porosidade surgiu com a necessidade de descrever o comportamento dos fluxos de água e solutos em formações geológicas com porosidades intergranular e planar (Wong, 2007). Esses aquíferos são caracterizados pela presença de dois sistemas de armazenamento e transporte de fluidos distintos e interligados: a matriz intergranular e as fraturas, com um sistema de entrelaçamento de caminhos preferenciais que facilita o fluxo de fluido através do material.

O estudo do fluxo em meios porosos fraturados teve início com os trabalhos de Barenblatt (1960), no contexto da indústria do petróleo. Esses autores observaram que o fraturamento do meio ao redor de um poço poderia aumentar significativamente sua produtividade, sugerindo que os mecanismos de fluxo em meios fraturados não poderiam ser adequadamente representados por modelos de porosidade única. Como alternativa, propuseram um modelo conceitual em que o meio é composto por dois domínios sobrepostos: uma rede de fraturas, responsável pela condução do fluxo, e uma matriz porosa, que armazena água e solutos

Embora esse modelo inicial tenha marcado um avanço conceitual importante, sua formulação era simplificada e voltada principalmente para aplicações em reservatórios de petróleo. Nas décadas seguintes, o conceito foi ampliado e refinado por diversos autores, como Warren e Root (1963), Duguid *et al.* (1977), Aifantis (1987) que trataram de aspectos mais complexos do acoplamento hidráulico entre os domínios. Um avanço decisivo veio com o trabalho de Moench (1984), que desenvolveu uma abordagem mais completa para sistemas de dupla porosidade, incorporando efeitos como armazenamento no poço (wellbore storage), efeito de pele (skin effect) e variações de taxa de intercâmbio entre matriz e fraturas ao longo do tempo.

O modelo de Moench é amplamente utilizado em testes de bombeamento em aquíferos fraturados com comportamento composto, por permitir a identificação de múltiplas fases no comportamento de fluxo, como o regime inicial nas fraturas e o retardado associado à matriz.

Posteriormente, Khalili (2003) demonstrou que a negligência do acoplamento entre os domínios pode levar a interpretações hidrodinâmicas incorretas, especialmente na resposta do sistema em tempos iniciais. Desde então, o modelo de dupla porosidade tem sido objeto de

inúmeros estudos aplicados à hidrogeologia, com adaptações e aprimoramentos contínuos para representar com maior fidelidade os sistemas subterrâneos compostos.

Paula e Campos (2016) confirmam a teoria e mostram que aquíferos com fluxos simultaneamente controlados pela porosidade intergranular e planar são classificados como sistemas de dupla porosidade. Um exemplo típico no Brasil são os aquíferos Raizama e Diamantino, no Mato Grosso do Sul, formados por metassedimentos de baixo grau metamórfico. Esses aquíferos se estendem ao longo de faixas estruturais e exibem anisotropias que afetam diretamente a permeabilidade e a capacidade de armazenamento.

No modelo clássico de sistema de dupla porosidade em rochas sedimentares, o fluxo de água ocorre predominantemente através da rede de fraturas, o que aumenta frequentemente parte da transmissividade do aquífero, enquanto parte do armazenamento de água e soluto ocorre na matriz rochosa. O fraturamento é importante para o fluxo de água subterrânea à medida em que influencia as propriedades hidráulicas do aquífero. A concentração do fluxo de água subterrânea por meio de redes de fraturas, que constitui uma parte muito pequena do volume total dos estratos, resulta em velocidades de fluxo muito mais altas sob um determinado gradiente hidráulico e transmissividade quando comparado a uma rocha com sistemas de porosidade única e uniformemente porosa. A abordagem mais simples consiste em tratar a matriz rochosa como um reservatório de armazenamento não condutor (domínio imóvel) e as fraturas como um meio condutor com uma capacidade de armazenamento negligenciável (domínio móvel).

No modelo de dupla porosidade, a interação entre os dois sistemas de porosidade é governada pela diferença de pressão entre os poros da matriz e as fraturas. À medida que o fluido se desloca pelas fraturas, ele pode ser transferido para os poros da matriz e vice-versa, dependendo da variação do gradiente hidráulico (Moench, 1984). Essa formulação tem sido utilizada em estudos de hidrologia e engenharia de petróleo, onde a descrição precisa do fluxo em meios porosos fraturados é essencial para a gestão de recursos hídricos subterrâneos e para a otimização da extração de hidrocarbonetos.

A formulação de uma teoria para o fluxo de fluidos através de meios porosos fraturados é dificultada pela variação no tamanho dos diferentes tipos de aberturas intersticiais presentes no meio. Os poros primários formados durante a deposição são pequenos e constituem até 30% do volume total do meio. Em contraste, as fraturas representam apenas 1% a 3% do volume total, mas permitem fluxos muito mais rápidos devido ao seu maior tamanho e permeabilidade (Dughid, 1977). O tamanho característico de um poro primário médio é muitas vezes menor do que a largura de uma fratura média. Assim, a magnitude do coeficiente de permeabilidade e a velocidade do fluxo são substancialmente maiores nas fraturas do que nos poros primários (Altinors, 2010).

Modelos numéricos, como o proposto por Wilson e Aifantis (1982), contribuíram para a descrição do movimento da água em meios de porosidade mista, ao desenvolver métodos de elementos finitos que simulam com maior precisão o comportamento do fluxo em sistemas de dupla porosidade.

Os estudos de Paula e Campos (2016) ilustram a relevância da aplicação do conceito de dupla porosidade na região do Alto Paraguai, no Mato Grosso. Esses sistemas, embora mais complexos, oferecem uma visão realista do comportamento hidrodinâmico, em contraste com os modelos que consideram exclusivamente porosidade intergranular ou planar. As análises de bombeamento realizadas nos aquíferos Raizama e Diamantino revelaram que, embora o fluxo seja predominantemente controlado pelas fraturas, as capacidades específicas são maiores nesses sistemas de dupla porosidade do que nos aquíferos exclusivamente fraturados. Esse comportamento destaca a importância da matriz rochosa como fonte de armazenamento, mesmo que o movimento da água ocorra de forma mais significativa nas fraturas. Em sistemas exclusivamente fraturados, o fluxo é muito mais restrito às fraturas, o que pode resultar em rebaixamentos mais acentuados durante a extração.

Blessent *et al.* (2014) oferecem uma aplicação prática do conceito de dupla porosidade e explora as diferenças nos padrões de fluxo em aquíferos fraturados em comparação com sistemas de porosidade única. Nesse estudo, os autores utilizam três modelos distintos para prever o transporte de contaminantes em um aquífero argiloso fraturado: o modelo de dupla porosidade (DP), o meio poroso equivalente (MPE) e o modelo de difusão matricial de fraturas discretas (DMFD).

As simulações realizadas revelam que os três modelos podem ser calibrados para reproduzir com precisão o avanço de contaminantes em certas condições de fluxo. No entanto, ao variar a velocidade da água subterrânea ou modificar as taxas de degradação dos contaminantes, o modelo de dupla porosidade mostrou concentrações de contaminantes que diferiam em até três ordens de magnitude em relação ao modelo de fraturas discretas. No modelo poroso equivalente, que considera o aquífero como um meio homogêneo, as simulações mostraram que era necessário utilizar dispersividades irrealisticamente altas para reproduzir o comportamento observado no modelo de fraturas. Esse exemplo evidencia as limitações dos modelos de porosidade única quando aplicados a aquíferos fraturados e reforça a importância de considerar as características específicas de cada tipo de aquífero ao desenvolver modelagens conceituais.

Dessa forma, percebe-se que os aquíferos de dupla porosidade representam sistemas hidrogeológicos complexos, cujo comportamento hidrodinâmico heterogêneo e anisotrópico exige uma abordagem específica para sua compreensão e gestão. O desenvolvimento teórico e a

modelagem numérica desses sistemas têm se mostrado essenciais para entender suas características únicas, sendo que o uso de modelos adequados, como o de difusão matricial de fraturas discretas, permite previsões mais precisas em comparação com modelos simplificados de porosidade única. Considerar as interações dinâmicas entre as fraturas e a matriz possibilita uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos subterrâneos em regiões fraturadas, além de oferecer maior confiabilidade na previsão da disponibilidade hídrica e no comportamento de contaminantes.

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE DUPLA POROSIDADE AO SUBSISTEMA R₃/Q₃

Com base nos fundamentos teóricos discutidos no tópico anterior, nos quais foram apresentados a definição, os princípios e a aplicabilidade do conceito de aquífero de dupla porosidade, este segundo tópico tem como objetivo demonstrar de maneira prática, por meio de dados de campo, registros fotográficos e seções delgadas a aplicabilidade desse modelo para o Subsistema Aquífero R₃/Q₃. A partir das evidências estruturais, texturais e morfológicas observadas em afloramentos e amostras meso e microscópicas da região do Distrito Federal, foi possível ilustrar como os mecanismos descritos (como a reabertura de planos de acamamento, o papel da neotectônica e a interação entre porosidade fraturada e intergranular) se manifestam nos quartzitos e metarritmitos.

Dessa forma, busca-se validar a interpretação dessas rochas como um sistema aquífero de dupla porosidade, a partir da exposição de registros visuais e geológicos que permitiram compreender como estruturas como o acamamento, as fraturas e os processos de intemperismo contribuem para a complexa dinâmica de armazenamento e fluxo da água subterrânea, em consonância com o modelo conceitual proposto para parte deste aquífero.

4.2.1 Desenvolvimento do Modelo Conceitual de Dupla Porosidade na Porção Superior do Subsistema R₃/Q₃

Em sucessões metassedimentares de baixo grau metamórfico, o desenvolvimento de um aquífero de dupla porosidade pode ocorrer como resultado da interação entre estruturas primárias preservadas (como acamamento e porosidade matricial) e estruturas tectônicas superpostas (como fraturas, falhas e zonas de cisalhamento). Essas rochas, originalmente sedimentares, sofreram recristalização incipiente que permitiu que os espaços deposicionais intergrãos permaneçam abertos mesmo após o metamorfismo. Por outro lado, parte do cimento silicoso desenvolvido durante a diagênese pode ser eliminado por processos intempéricos. Uma das principais vias para o surgimento da dupla porosidade nesse contexto é a manutenção da porosidade intergranular ou

abertura de espaços intergranulares por dissolução em metarritmitos ou quartzitos friáveis, associados ao desenvolvimento de fraturas e planos de acamamento reativados que funcionam como porosidade planar.

Essa associação permite que a água subterrânea se mova tanto por entre os grãos (em zonas friáveis) quanto ao longo de planos estruturais, o que resulta em um fluxo complexo, típico de aquíferos de dupla porosidade. Além disso, o baixo grau metamórfico favorece a preservação de minerais instáveis (como feldspatos e micas), que podem sofrer alteração ao longo do tempo e gerar porosidade secundária adicional por processos de intemperismo. A dissolução de cimentos silicosos e carbonáticos também contribui para o surgimento de espaços porosos intergranulares em profundidade, processo esse que pode ser facilitado pela infiltração de águas meteóricas ao longo de fraturas com maior abertura, vinculadas a processos neotectônicos posteriores.

Outro mecanismo importante é a intercalação litológica, comum em rochas metassedimentares como metarritmitos. A alternância entre camadas mais porosas (quartzitos friáveis) e menos porosas (pelitos ou quartzitos silicificados) pode formar domínios heterogêneos de porosidade, onde as zonas intergranulares atuam como reservatórios e os planos fraturados e de acamamento como condutos. Isso reforça o comportamento hidráulico de dupla porosidade, com diferenciação entre domínios de armazenamento e de transmissão na mesma unidade litológica. A herança deposicional da bacia pode influenciar fortemente o padrão de faturamento, pois as anisotropias das rochas sedimentares condicionam a deformação tectônica superimposta.

Possibilidades de desenvolvimento de aquífero de dupla porosidade no subsistema R₃/Q₃ podem incluir:

- *Quartzito de baixo grau metamórfico submetido à dissolução por intemperismo diferencial*

Cenário: quartzito metamorfizado com alto teor de sílica intergranular devido à diagênese e metamorfismo.

Processo: ação de águas meteóricas levemente ácidas (rico em CO₂) pode dissolver parcialmente o cimento sílico e liberar espaço entre os grãos.

Porosidade: intergranular que pode ser ampliada pela lixiviação de grãos do arcabouço; ou secundária planar: manutenção ou ampliação de planos de acamamento preexistentes, que atuam como planos primários sub-horizontais.

Exemplo prático: áreas da Formação Ribeirão Contagem do Grupo Paranoá, especialmente no contato entre metarritmitos e quartzitos. É possível observar na transição do quartzito cimentado para quartzito friável com elevada porosidade.

Evidência de campo: camadas desagregadas, com cor amarelada.

- *Metarritmito intemperizado com plano de acamamento oxidado*

Cenário: metarritmitos com alternância de camadas de metassiltito e quartzito, submetidos a intemperismo em clima tropical úmido.

Processo: o intemperismo ataca preferencialmente as camadas mais finas (pelíticas), libera óxidos de ferro e abre microcanais ao longo dos planos de acamamento

Porosidade: planar com abertura do acamamento reativado e oxidado, que funciona como plano condutor; e intergranular nas camadas arenosas, especialmente quando friáveis.

Exemplo prático: cortes de estrada em Planaltina de metarritmitos com planos fortemente oxidados e coloração avermelhada, com surgências e gotejamento de água visíveis nos planos entre as camadas.

Evidência de campo: manchas de óxido de ferro e veios de sílica reprecipitada por intemperismo químico.

- *Fraturas preenchidas parcialmente por quartzo syntaxial (hidrotermalização leve)*

Cenário: zonas fraturadas em metassedimentos com circulação prolongada de sílica em solução.

Processo: a sílica se reprecipita sob forma de quartzo syntaxial e preenche parcialmente as fraturas.

Com o tempo, o intemperismo diferencial reabre esses espaços e gera porosidade secundária.

Porosidade: planar em fraturas subverticais e sub-horizontais com preenchimento parcial; e intergranular residual entre cristais de quartzo recristalizado.

Exemplo prático: na porção oeste do DF são comuns fraturas com brilho vítreo, que evidenciam recristalização e posterior dissolução parcial.

Importância: essas fraturas reativadas se comportam como condutos profundos de água.

- *Metarritmito arcoseano intemperizado com plano de acamamento dilatados*

Cenário: metarritmitos arcoseanos, submetidos a intemperismo com alteração parcial ou total dos grãos de feldspato.

Processo: o intemperismo altera os feldspatos com transformação de argilominerais e alívio de pressão na porção crustal.

Porosidade: planar com dilatação dos planos de acamamento; e intergranular nos espaços gerados pela eliminação dos componentes instáveis.

Exemplo prático: cortes da DF-410 (de acesso ao Núcleo Rural Taquara) em que as camadas se tornam friáveis devido à retirada da massa argilosa gerada pela alteração dos grãos de feldspatos.

Evidência de campo: camadas de quartzitos rosados e pouco coesos.

A caracterização do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ como um sistema de dupla porosidade é corroborada diretamente pelas observações feitas em campo ao longo dos afloramentos mapeados. As evidências reunidas, por meio de fotografias georreferenciadas e descrições estruturais e litológicas, reforçam a tese de que a porção superior desta unidade hidroestratigráfica se adequa ao conceito de dupla porosidade.

Importante salientar que neste caso os dois tipos de porosidade ocorrem nas mesmas rochas, ao contrário de situações em que há sobreposição de aquíferos como um regolito sobre rocha fraturada, com dois meios porosos distintos fisicamente separados. No caso do Subsistema R₃/Q₃, há uma clara coexistência desses tipos de porosidade no próprio maciço rochoso, produto de herança deposicional e de modificações tectônicas e intempéricas superimpostas.

4.2.2 O Papel da Porosidade Planar Primária

Dentre as estruturas, os planos de acamamento se destacam como elementos-chave para compreender o comportamento hídrico do aquífero. Mesmo após o metamorfismo de baixo grau, esses planos se preservam como anisotropias de alta continuidade lateral e elevada densidade, que funcionam como zonas de fraqueza reativáveis por eventos neotectônicos. Ao contrário das litologias ígneas, como os granitos, onde o alívio de pressão reflete novas fraturas, nos metassedimentos o alívio litostático tende a reabrir estruturas deposicionais pré-existentes, como os próprios estratos sedimentares (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Plano de acamamento bem definido em metarritmito, evidenciando porosidade planar primária associada à estrutura deposicional da rocha (acamamento).

Essa reabertura transforma os planos de acamamento em superfícies sub-horizontais ou inclinadas de alta condutividade, que favorecem o fluxo lateral da água e, em casos específicos, a recarga direta nos flancos das unidades, conforme o mergulho dos estratos. Dessa forma, a orientação dos planos de acamamento influencia diretamente os vetores de fluxo e a conectividade hidráulica do sistema, como um dos principais controles estruturais da dinâmica hídrica regional.

A importância desses planos no contexto do aquífero decorre de dois processos principais:

- **Reativação mecânica:** em áreas de maior relevo topográfico, como no Distrito Federal, a erosão progressiva provoca o alívio da carga litostática, que favorece a reabertura desses planos como zonas de fraqueza. Ao contrário de litologias ígneas e metamórficas de alto grau, que respondem ao alívio de carga com novas fraturas subparalelas ao relevo, os metassedimentos

tendem a liberar tensão por meio da reativação de estruturas pré-existentes, especialmente os planos de acamamento.

- Modificações químicas e intempéricas: a infiltração de água meteórica ao longo dessas superfícies facilita processos de oxidação, dissolução seletiva de cimentos e deposição de minerais secundários. Em muitos casos, planos de acamamento apresentam-se colorações avermelhadas ou amareladas decorrentes de óxidos de ferro precipitados por águas oxigenadas e ricas em gás carbônico, que indica circulação recorrente de água subterrânea ao longo dessas estruturas.

O mergulho dos estratos exerce papel decisivo na dinâmica do aquífero. Em regiões onde os planos de acamamento alcançam a superfície, esses atuam como vias de recarga direta, pois canalizam de forma mais eficiente as águas pluviais para as porções profundas do aquífero. Nos trechos com camadas em baixo ângulo ou disposição sub-horizontal, a água percorre longas distâncias, estabelece conexão entre fraturas verticais ou de alto ângulo de mergulho e compartimentos internos e modifica o tempo de resposta hídrica em poços e nascentes. Essa estruturação confere ao Subsistema R₃/Q₃ uma compartimentação natural, marcada por zonas de condutividade variável conforme a orientação e a continuidade dos planos.

4.2.3 O Papel da Porosidade Intergranular Secundária

Além da atuação dos planos de acamamento como condutos dominantes de fluxo, o Subsistema Aquífero R₃/Q₃ apresenta evidências claras de porosidade intergranular secundária, desenvolvida sobretudo em níveis específicos de quartzitos friáveis (Figura 4.2). Essa porosidade, embora não seja primária no sentido estrito (isto é, diretamente herdada do depósito sedimentar inicial), é resultado de processos telodiagenéticos e intempéricos que atuaram sobre a matriz rochosa ao longo do tempo geológico mais recente.

Nos metassedimentos do Grupo Paranoá, existem registros frequentes de camadas menos silicificadas, nas quais a cimentação foi parcialmente dissolvida por ação química ou lixiviação meteórica. Esse processo gera espaços porosos entre os grãos minerais, que reativa a porosidade do tipo intergranular e se comporta como um meio poroso capaz de armazenar e transmitir água. A localização dessas camadas é frequentemente controlada por zonas de maior permeabilidade ou por estruturas geológicas que facilitaram o ingresso de fluidos reativos.

Essa porosidade secundária intergranular tem papel essencial na dinâmica hídrica do sistema por duas razões principais:

- Armazenamento hídrico: por se distribuir em volumes relativamente contínuos ao longo de horizontes, essa porosidade oferece maior capacidade de armazenamento de água do que as

fraturas isoladas. Embora a condutividade hidráulica seja menor, sua contribuição ao armazenamento é significativa, especialmente em períodos de recarga ou nas porções superiores do subsistema aquífero.



Figura 4.2 - Quartzito intemperizado exibindo porosidade intergranular secundária resultante da dissolução parcial dos cimentos silicáticos entre os grãos.

- Integração com estruturas planas: em muitos locais, os horizontes com porosidade intergranular secundária estão associados a planos de acamamento ou níveis fraturados, formando zonas híbridas onde o fluxo de água ocorre tanto por canais preferenciais quanto por difusão entre os grãos. Isso configura a essência do conceito de dupla porosidade: um meio onde coexistem um domínio de fluxo rápido (fraturas/planos) e outro de armazenamento lento (matriz porosa).

A Tabela 4.1 traz a síntese das principais características observadas no Subsistema R₃/Q₃ que demonstram que sua porção superior pode ser enquadrada no modelo de dupla porosidade.

4.2.4 Evidências em afloramentos

As evidências dessa dinâmica foram registradas em diferentes pontos de cinco áreas de exposição do Subsistema R₃/Q₃ no Distrito Federal (Figura 4.3) e são apresentadas a seguir.

Tabela 4.1 - Representação dos tipos de porosidade presentes na porção superior do Subsistema R₃/Q₃, destacando sua coexistência e características como origem, processo gerador e função hidrogeológica.

Tipo de Aquífero	Tipo de Porosidade	Origem da Porosidade	Processo Gerador da Porosidade	Função Hidrogeológica Principal	Exemplo Geológico	Observações Relevantes
Dupla porosidade	Intergranular	Primária	Eodiagênese (compactação parcial e cimentação incompleta)	Armazenamento de água	Arenito pouco cimentado	Alta capacidade de armazenamento; baixa a moderada conectividade hidráulica
		Secundária	Intemperismo físico e químico (pedogênese / telodiagênese) com dissolução de cimentos silicosos	Aumento da conectividade e armazenamento superficial	Quartzito friável, arenito silicificado alterado	Comum em zonas intemperizadas profundas, gera areões com alta porosidade efetiva
	Planar	Primária	Deposição sedimentar: planos de acamamento preservados	Condução preferencial de fluxo	Quartzito ou arenito fortemente acamadado	Anisotropia horizontal persistente, conecta unidades de porosidade intergranular
		Secundária	Tectonismo compressivo (fraturamento), fraturas de alívio (descompressão)	Alta condutividade hidráulica, principal via de fluxo	Quartzito ou ritmito fraturado	Fraturas abertas ou parcialmente preenchidas; importância aumentada em profundidade e em zonas de dobra

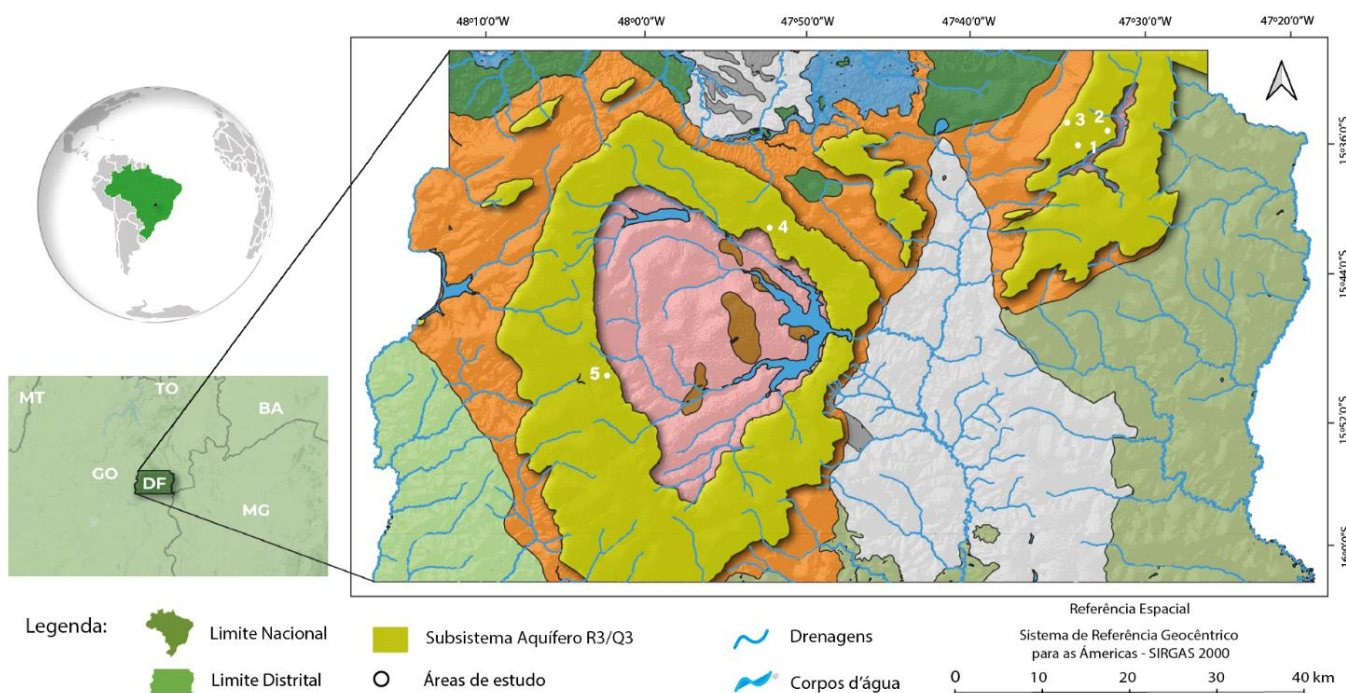


Figura 4.3 - Localização dos principais afloramentos de rochas associadas ao Subsistema Aquífero R₃/Q₃.

- Ponto 1 - Corte de estrada no balão de entroncamento da BR-020 com a GO-118 (15°35'07"S 47°34'17"W)

O afloramento representa o contato entre as formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem, que evidencia a transição e coexistência entre diferentes tipos de porosidade (Figuras 4.3 e 4.4). No contato observa-se a ocorrência conjunta de fraturas abertas e porosidade intergranular residual em quartzitos parcialmente intemperizados, além de metarritmitos com planos de acamamento bem-marcados e cimento alterado por intemperismo, caracterizado como um sistema de dupla porosidade. A Formação Ribeirão Contagem mostra uma progressiva transição desde porções totalmente silicificadas com fraturas preenchidas até porções muito intemperizadas como horizontes arenosos, marcado por significativa porosidade intergranular.



Figura 4.4 - Sequência de amostras mesoscópicas de quartzito que ilustra a sequência contínua de alteração e evolução da porosidade, do nível mais intemperizado (friável), com visível desagregação dos grãos e perda de coesão, que predomina porosidade intergranular, até o nível mais maciço fortemente silicificado (compacto) com porosidade única planar secundária. A sequência evidencia a heterogeneidade textural e estrutural típica da dupla porosidade, fundamental para o comportamento hidrogeológico do aquífero R₃/Q₃.

- Ponto 2 - Corte de estrada na DF-130, 6 Km sentido oeste (15°34'53"S 47°30'33"W)

Exposição de metarritmito fortemente acamadado no Córrego do Pipiripau (Figura 4.5A), com presença de fraturas preenchidas por quartzo syntaxial e oxidação nas superfícies (Figura 4.5B), que indica alteração hidrotermal e circulação de água. A estrutura estratificada do metarritmito favorece o fluxo ao longo dos planos de acamamento, enquanto a matriz alterada por dissolução e intemperismo reflete em uma porosidade intergranular. Apesar da litologia argilosa,

o metarritmito apresenta comportamento hidráulico expressivo comparável ao de quartzitos, principalmente em função da densidade de planos de acamamento e do alto ângulo de mergulho da estrutura monoclinal, que favorecem a conectividade hidráulica.

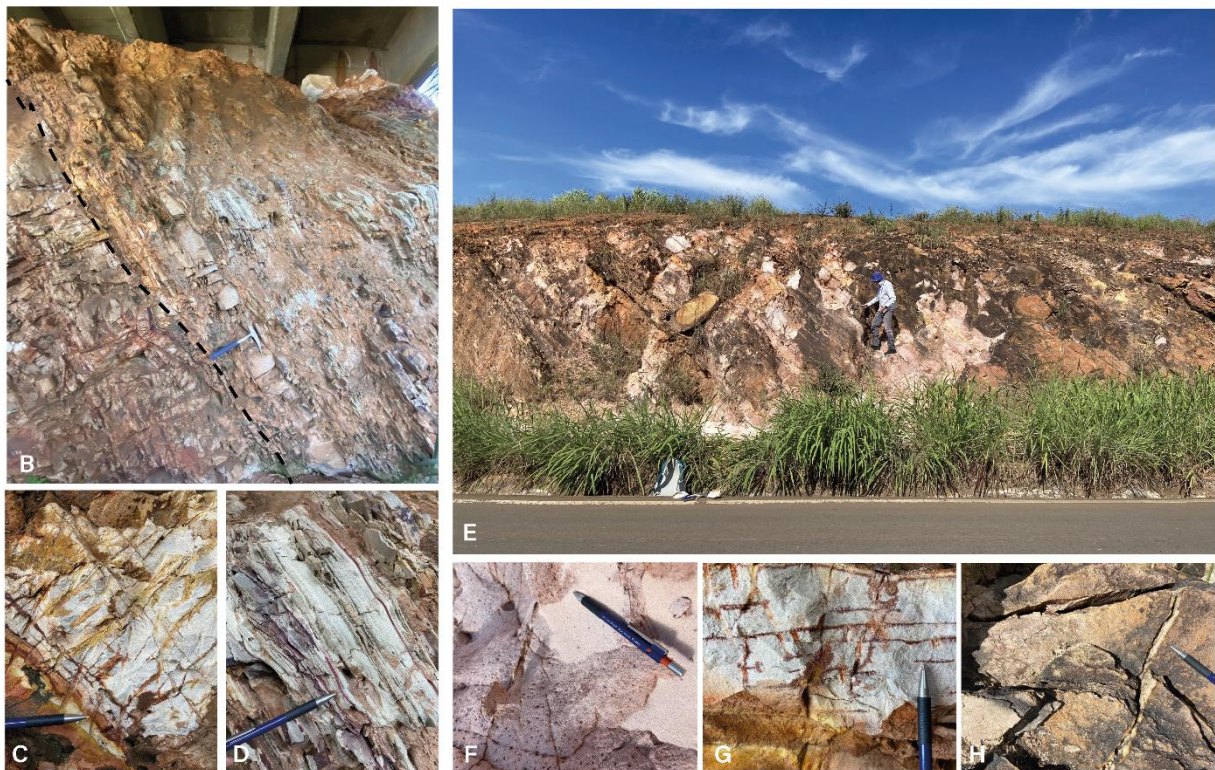
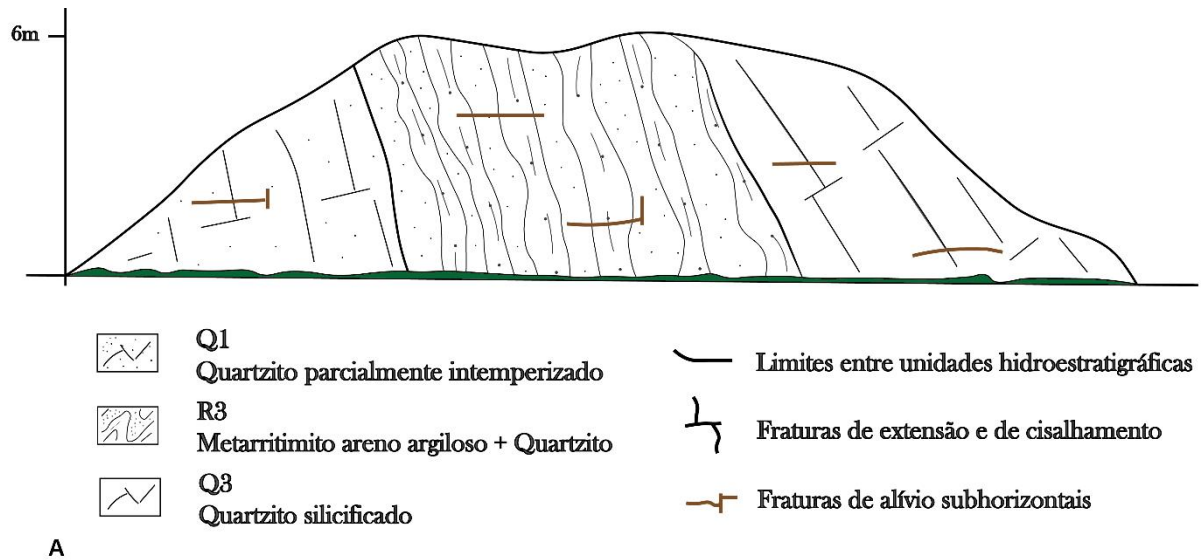


Figura 4.5 - A) Croqui do Ponto 1 no contato entre as formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem. B) Contato do quartzito parcialmente intemperizado (Q1) e metarritmito (R3) com plano de acamamento expressivo. C) Quartzito com fraturas abertas e zona friável com porosidade intergranular residual, que indica presença de duas porosidades na mesma unidade litológica. D) Em metarritmito observa-se porosidade intergranular na matriz alterada por dissolução e planos de acamamento como porosidade planar primária. E) Quartzito composto por rocha parcialmente intemperizada (Q3). F) Porção intemperizada representada por areias com porosidade exclusivamente intergranular. G) Porção intermediária com intemperismo parcial e início de desagregação, com dupla porosidade. H) Porção silicificada com fraturas abertas, com porosidade exclusivamente secundária planar.



Figura 4.6 - A) Camadas com planos de acamamento bem definidos, o que indica que mesmo após o metamorfismo evidencia sua resistência e continuidade estrutural. **B)** A oxidação é sinal de fluxo preferencial ao longo dessas superfícies, o que confirma sua relevância como elemento condutor horizontal, estruturando o fluxo subterrâneo e sustentando a hipótese da dupla porosidade.

- Ponto 3 - KM 3,2 da DF-410, zona rural (15°36'30"S 47°32'49"W)

Afloramento de metarritmito com dobras em chevron, no qual o alívio de tensões reabre planos de acamamento, que atuam como porosidade primária planar (Figura 4.6). O acamamento representa a principal via de fluxo, enquanto a matriz intemperizada entre os planos apresenta porosidade intergranular, mesmo em feições aparentemente pouco fraturadas. Destaca-se o papel dos planos primários como condutos preferenciais.

- Ponto 4 - Corte de estrada no viaduto que dá acesso ao Taquari (15°41'58"S 47°53'02"W)

O afloramento observado está localizado dentro da unidade rítmica (Formação Serra da Meia Noite), com destaque a presença do banco de quartzito basal da unidade intercalado aos metarritmitos argilosos, especialmente na porção inferior da sequência, próxima à Formação Ribeirão do Torto (Figura 4.7A). No local, existe denso microfraturamento e evidências visuais de intensa percolação de água, reconhecível pela presença de óxidos de ferro ao longo das fraturas, indicativas de zonas de circulação preferencial (Figura 4.7B). A superfície vítrea do quartzito, associada à maior silicificação, favorece a geração de fraturas em detrimento da porosidade

intergranular. As fraturas observadas apresentam variações de textura (lisas e rugosas), abertura (abertas e fechadas) e preenchimento (com e sem cimentação), consequência de um histórico de deformações e eventos de circulação de fluidos. Os metarritmitos apresentam matriz muito alterada marcada por veios de quartzo que preenchem os planos originalmente abertos.

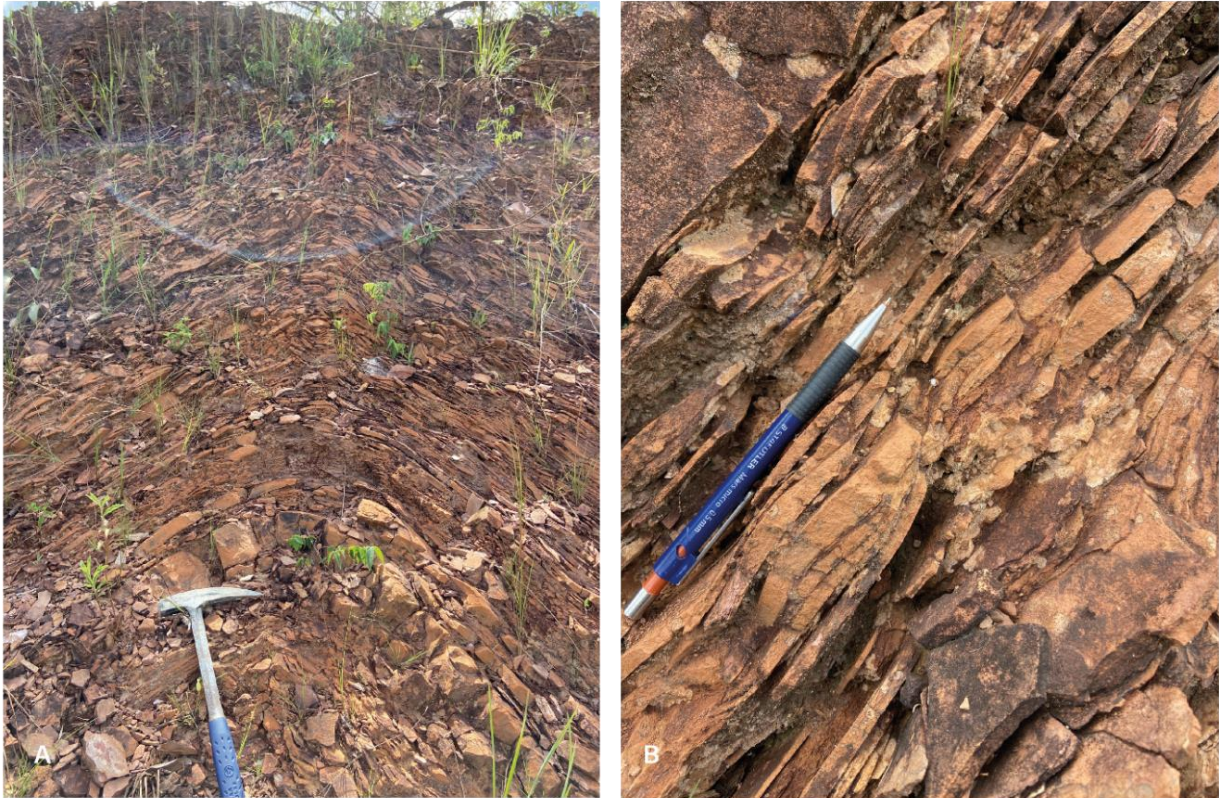


Figura 4.7 - A) Dobra em chevron no metarritmito com planos de acamamento bem marcados por alívio de tensão. **B)** Porosidade planar ampliada sem a presença de fraturamento.

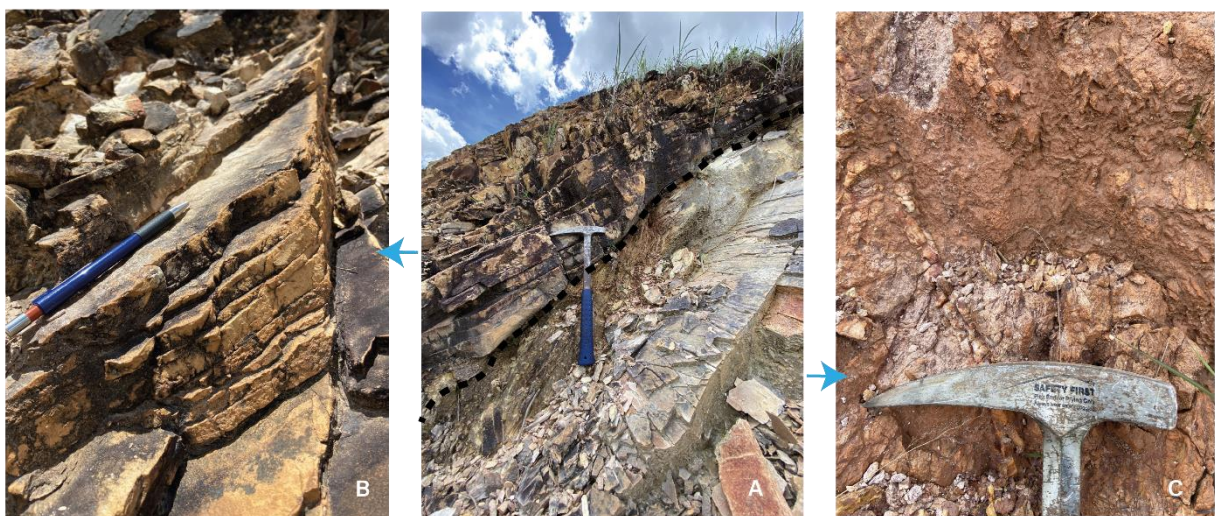


Figura 4.8 - A) Contato entre bloco de quartzito maciço e metarritmito estratificado. **B)** Quartzito densamente fraturado, com porosidade planar evidente. **C)** Metarritmito com matriz alterada com veios de quartzo preenchendo a porosidade planar.

- Ponto 5 - Corte de estrada na marginal sul da DF-085 - EPTG (15°49'49"S 48°02'10"W)

O afloramento apresenta uma transição do solo para um metarritmito friável, com densa rede de fraturas preenchidas por veio de quartzo (Figura 4.8). O fraturamento superficial associada à friabilidade da matriz caracteriza o ambiente como um sistema onde o armazenamento ocorre pela porosidade intergranular e o escoamento ocorre preferencialmente pelos planos fraturados, característico da dupla porosidade de forma clássica.



Figura 4.9 - A) Metarritmito com fraturas preenchidas por veios de quartzo, indício de circulação de fluidos e possível alteração hidrotermal. B) Detalhe da coexistência de porosidade intergranular, associada à matriz intemperizada, e fraturas preenchidas.

4.2.5 Dados de Seções Delgadas

A análise petrográfica em seções delgadas permite aprofundar a compreensão sobre os mecanismos que controlam o desenvolvimento da dupla porosidade no Subsistema Aquífero R₃/Q₃. A partir de uma sequência de imagens de lâminas em microscópio, busca-se correlacionar diferentes graus de silicificação e intemperismo com os tipos de porosidade predominantes em cada estágio. Essas observações complementam os dados obtidos em campo e fornecem evidências texturais e estruturais em escala microscópica que reforçam o modelo de porosidade combinada no aquífero. As imagens abaixo seguem uma progressão diagenética e intempérica:

1. Quartzito intensamente silicificado e fraturado: a rocha apresenta cimentação completa por quartzo syntaxial, com pouca porosidade representada pelas fraturas, que se configuram como o único meio de fluxo possível (Figura 4.9). Esse estágio representa a porosidade exclusivamente do tipo fraturada.



Figura 4.10 - Quartzito fraturado e silicificado. Porosidade exclusivamente secundária planar, com poros primários completamente cimentados por quartzo.

2. Quartzito com porosidade intergranular incipiente: observa-se a presença de poros residuais entre os grãos de quartzo, resultado da dissolução parcial dos cimentos (Figura 4.10). A porosidade intergranular é secundária à fraturada, mas já sugere a atuação de processos intempéricos e circulações fluidas que modificam a matriz rochosa.
3. Quartzito com porosidade intergranular predominante sobre a planar: nesse estágio, a dissolução dos cimentos é mais expressiva, conferindo maior conectividade entre os poros intergranulares (Figura 4.11). O fraturamento ainda está presente, mas sua contribuição para o fluxo é comparativamente menor. Essa configuração representa uma fase madura do desenvolvimento da dupla porosidade.
4. Quartzito intensamente intemperizado, com porosidade exclusivamente intergranular: neste estágio final, os processos de intemperismo removeram quase totalmente os cimentos silicosos, liberaram os contatos entre os grãos e conferiram elevada porosidade intergranular conectada (Figura 4.12). A ausência de fraturamento expressivo indica que o fluxo de água ocorre por entre os grãos soltos da matriz.

Localmente ainda é possível observar seções delgadas que preservam o contato entre poções que podem ser potencialmente classificadas como eminentemente de dupla porosidade com aquífero exclusivamente fraturado (Figura 4.13).



Figura 4.11 - Quartzito com início de abertura de porosidade intergranular. A dissolução parcial do cimento gera poros residuais entre os grãos. A porosidade secundária planar também é evidente nos planos oxidados.



Figura 4.12 - Quartzito com dupla porosidade. Predomínio da porosidade intergranular sobre a fraturada, evidenciando intemperismo avançado. Os grãos de feldspato apresentam-se alterados e parcialmente removidos.



Figura 4.13 - Quartzito intensamente intemperizado. Porosidade exclusivamente intergranular, com matriz desagregada e fraturas pouco ativas.



Figura 4.14 - Contato de aquífero de dupla porosidade com poros matriciais e intergranulares (porção superior da imagem), com porção intensamente silicificada e micro fraturada classificada como meio exclusivamente fraturado (porção inferior).

4.3 NEOTECTÔNICA

A atividade neotectônica, ou seja, a tectônica recente e ativa desde o Neógeno até os dias atuais, têm implicações diretas e intensas sobre a evolução e o comportamento hidrogeológico dos aquíferos, especialmente em sistemas fraturados e com características de dupla porosidade. Isso ocorre, pois, esses eventos recentes tendem a ampliar a abertura de zonas de fraqueza preexistentes, como falhas, zonas de cisalhamento e fraturas, o que intensifica a conectividade hidráulica entre as camadas e favorece a criação de novos caminhos para a percolação vertical e horizontal da água subterrânea, inclusive em profundidades superiores a 100 metros.

Nessas zonas inicialmente marcadas apenas por fraturas, a dissolução dos cimentos silicáticos pode gerar porosidade intergranular secundária. A coexistência entre porosidade planar e intergranular promove ao sistema uma complexidade hidrodinâmica característica dos aquíferos de dupla porosidade, mesmo em profundidades elevadas, sem que haja separação física entre os domínios de fluxo.

No contexto do Distrito Federal e de seu entorno, existem evidências de reativações tectônicas, falhamentos recentes e reorganizações estruturais que influenciam diretamente características dos sistemas aquíferos, como os exemplos dos grábens do Maranhão e de São Sebastião (Oliveira, 2010). Como consequência, a neotectônica favorece o intercâmbio entre domínios fraturados e porosos, amplia a interface de dupla porosidade do aquífero e modifica a dinâmica do fluxo e os parâmetros hidrodinâmicos. Dessa forma, o fluxo subterrâneo passa a ocorrer com maior eficiência e capacidade de transmissão em relação à configuração original da rocha, o que favorece a infiltração e o transporte da água para níveis cada vez mais profundos.

O processo de reativação das fraturas e a criação de novas zonas porosas modificam de forma significativa os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero. A transmissividade e a condutividade hidráulica, por exemplo, aumentam substancialmente, e zonas anteriormente consideradas pouco permeáveis passam a permitir maior mobilidade da água. Em formações como quartzitos e metarritmitos, comumente encontrados na região do Distrito Federal, a dissolução de cimentos silicáticos e a alteração de grãos detríticos de feldspatos pela ação da água meteórica transformam a porosidade primária original em porosidade secundária intergranular, o que eleva a capacidade de armazenamento e transmissão de água.

Outro fator relevante é a associação entre neotectônica e relevo. Áreas tectonicamente rebaixadas, como vales e zonas de subsidência, funcionam como zonas de descarga, enquanto áreas elevadas, como cristas estruturais e chapadas elevadas, geralmente atuam como zonas de recarga. Essa distribuição estrutural afeta diretamente os gradientes hidráulicos e altera a direção do fluxo subterrâneo em escala regional. A compreensão desses controles estruturais é, portanto,

essencial para a definição dos limites hidráulicos dos aquíferos e para o delineamento dos fluxos regionais de água subterrânea.

No caso do Subsistema R₃/Q₃, a influência da neotectônica se mostra evidente e deve ser incorporada à modelagem hidrogeológica. A presença de estruturas reativadas altera não apenas o padrão de fluxo, mas também os parâmetros, as reservas hídricas e a produtividade do aquífero.

Assim, torna-se necessário adotar modelos de fluxo que considerem a heterogeneidade da matriz porosa e a complexa interação entre zonas de fraturas. Modelos que assumem fluxo não uniformemente distribuído representam melhor a realidade hidrodinâmica desses sistemas. Em última instância, compreender os efeitos da neotectônica sobre aquíferos com comportamento de dupla porosidade é essencial para uma avaliação precisa dos recursos hídricos subterrâneos e para o planejamento adequado do uso e da gestão desses recursos, sobretudo em áreas sensíveis e com ocupações urbanas densas como no Distrito Federal, onde a dinâmica estrutural interfere diretamente na disponibilidade, qualidade e sustentabilidade dos mananciais subterrâneos.

4.4 RESPOSTA GEOFÍSICA DO SUBSISTEMA R₃/Q₃

A caracterização geofísica do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ foi considerada como um argumento adicional em favor da existência de um modelo de dupla porosidade, ainda que não seja a evidência mais determinante ou esclarecedora. Contudo, algumas seções de tomografia elétrica possibilitaram a identificação de evidências da presença de porosidade intergranular, associada à zonas alteradas e de saprolitos.

O relatório da ADASA (2018) apresenta 29 perfis de eletrorresistividade (com aplicação do método dipolo-dipolo e distância entre eletrodos de 10 metros) que contribuem com dados relevantes ao delinear zonas potencialmente produtivas, ao sugerir uma heterogeneidade que pode refletir a coexistência de porosidade matricial e fraturada.

A eletrorresistividade avalia a resposta elétrica de um meio geológico à passagem de corrente elétrica, com alta sensibilidade à umidade presente no meio estudado. Áreas saturadas ou com presença de água tendem a apresentar baixa resistividade, devido à boa condutividade da água com íons dissolvidos. Já materiais secos, compactos ou com pouca porosidade apresentam resistividade mais elevada. O contraste entre essas zonas permite identificar estruturas hidrogeológicas importantes, como porções alteradas, fraturas ou possíveis zonas aquíferas.

O resultado da aquisição é um conjunto de dados de resistividade elétrica obtido em profundidades que formam uma pseudo-seção. Cada material geológico mostra um intervalo amplo de resistividade, que depende principalmente da composição mineralógica da rocha, da

quantidade de fluídos presentes nos poros, e da salinidade do fluído. Os dados foram obtidos utilizando o equipamento SYSCAL Pro 72, com arranjo dipolo-dipolo, e interpretação em pseudo-seções. A aquisição dos dados foi feita preferencialmente ao longo de trilhas e estradas, perpendiculares aos principais lineamentos estruturais, a fim de interceptar zonas de fraturamento. Dos 29 perfis realizados, foram selecionados 3 para avaliação no presente estudo (Figura 4.15).

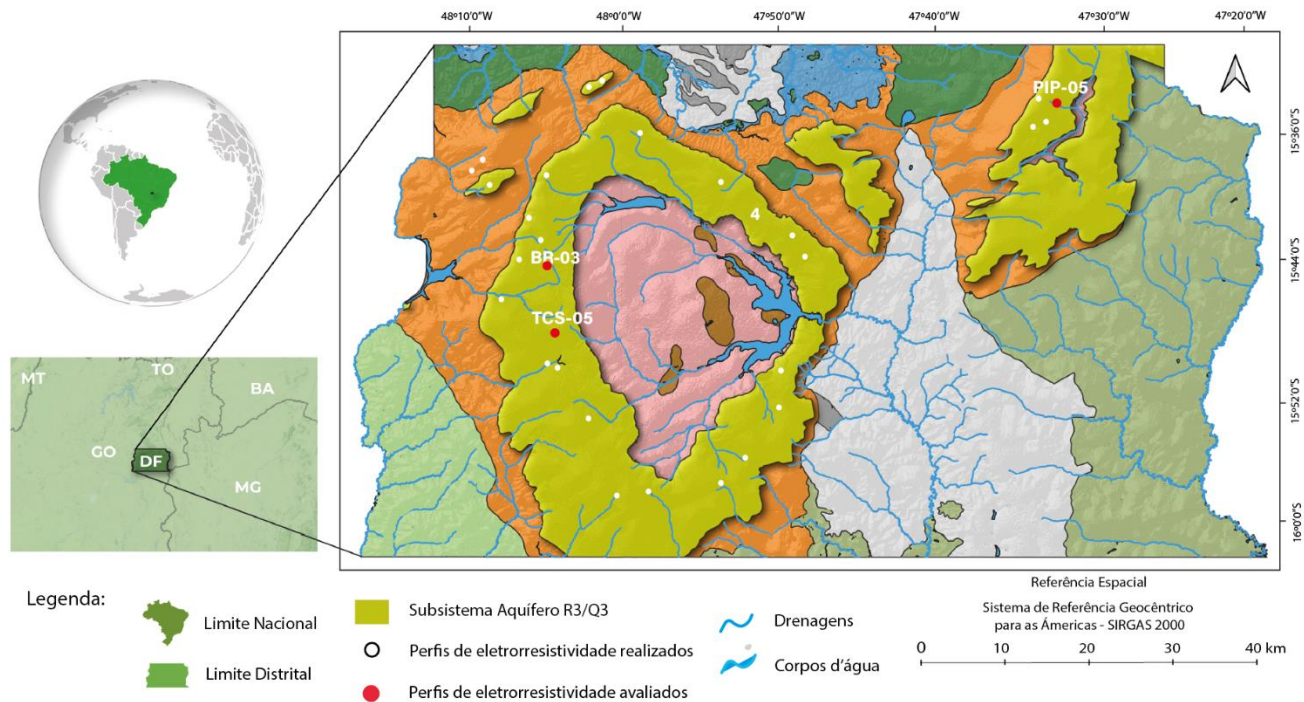


Figura 4.15 - Localização dos perfis do levantamento geofísico de eletrorresistividade (ADASA, 2018) e seções escolhidas para avaliação no presente estudo.

Na interpretação dos dados para o trabalho, buscou-se:

- Identificar zonas contínuas de baixa resistividade (indicativas da presença de porosidade intergranular);
- Delimitar anomalias verticais e descontínuas (representativas de porosidade planar);
- Associar regiões com ambas as respostas como zonas de dupla porosidade.

Embora a resistividade não permita separar diretamente os tipos de porosidade, é possível associar faixas de resistividade a faixas de saturação e, portanto, estimar porosidades aparentes:

- Porosidade intergranular estimada entre 3% e 7%, associada a zonas de alteração espessa.
- Porosidade efetiva total estimada em zonas de dupla porosidade: pode superar 10%, especialmente em áreas com alta conectividade entre fraturas e saprolito.

No caso do Subsistema R₃/Q₃, que inclui quartzitos, metarritmitos e metassiltitos parcialmente alterados, a heterogeneidade de porosidade se manifesta de modo distinto no perfil geofísico. As pseudo-seções revelam padrões que sugerem forte influência do grau de alteração da

rocha e da presença de fraturas ativas. Dentre as principais observações destacam-se:

- Zonas de saprolito espesso (10 a 30 m) com resistividades de 30 a 100 Ohm.m, representativas de porosidade intergranular predominante. Baixa resistividade contínua sem a presença de fraturas mapeadas, que indica controle puramente litológico.
- Contrastes abruptos em profundidade, com resistividades de 100 a 300 Ohm.m separadas por zonas mais condutivas, são interpretados como zonas fraturadas saturadas, provavelmente interconectadas com zonas de intemperismo na porção superior mais rasa.
- Perfis mistos (especialmente em áreas rebaixadas adjacentes a drenagens), exibem tanto zonas contínuas de baixa resistividade quanto anomalias pontuais verticais, padrão compatível com a concepção de dupla porosidade. Nesses casos, a eletrorresistividade reflete a conectividade entre a umidade do manto de alteração e a circulação preferencial ao longo de fraturas.

- Perfil TCS-05 (UTM 22S 815252 / 8249503)

Localizado na Região Administrativa de Samambaia, em uma área com topografia suavemente dissecada que favorece o intemperismo diferencial. O perfil mostra duas zonas condutivas profundas, interpretadas no estudo como “zonas anômalas com água” (Figura 4.16). A posição das anomalias indica fraturas com circulação de água em profundidade sobrepostas por camadas menos resistivas que podem estar associadas à alteração litológica superficial ou saprolito. O padrão mostra verticalização e alongamento das zonas de baixa resistividade, sugerindo conexão hidráulica entre as porosidades. A estrutura revela zona saturada contínua, com prováveis vias de fluxo tanto matriciais (alteração da matriz), quanto estruturais (fraturas condutivas). Pode representar a lógica de funcionamento hidrodinâmico misto do Subsistema R₃/Q₃.

- Perfil BR-03 (UTM 812973 / 8258381)

Localizado em área sem expressivos lineamentos superficiais, o perfil mostra duas zonas condutivas verticais profundas, bem definidas e com caimento suave para o centro da seção, indicativas de fraturas preenchidas com água (Figura 4.17). A zona superior do perfil exhibe camada condutiva contínua, compatível com saprolito úmido ou alteração intensiva da rocha. A geometria das anomalias e sua conexão com o horizonte superficial sugerem estrutura vertical contínua entre matriz dos metarritmitos e fraturas profundas, que favorece a recarga direta.

A porção entre as duas zonas interpretadas como fraturas (entre 160 e 220 metros) apresentam resistividades intermediárias que podem ser potencialmente interpretadas como região do aquífero como porosidades mistas. Neste caso a resistividade aparente, será um valor médio entre rochas não alteradas e secas e as zonas fraturadas com elevada circulação de água.

TCS 05

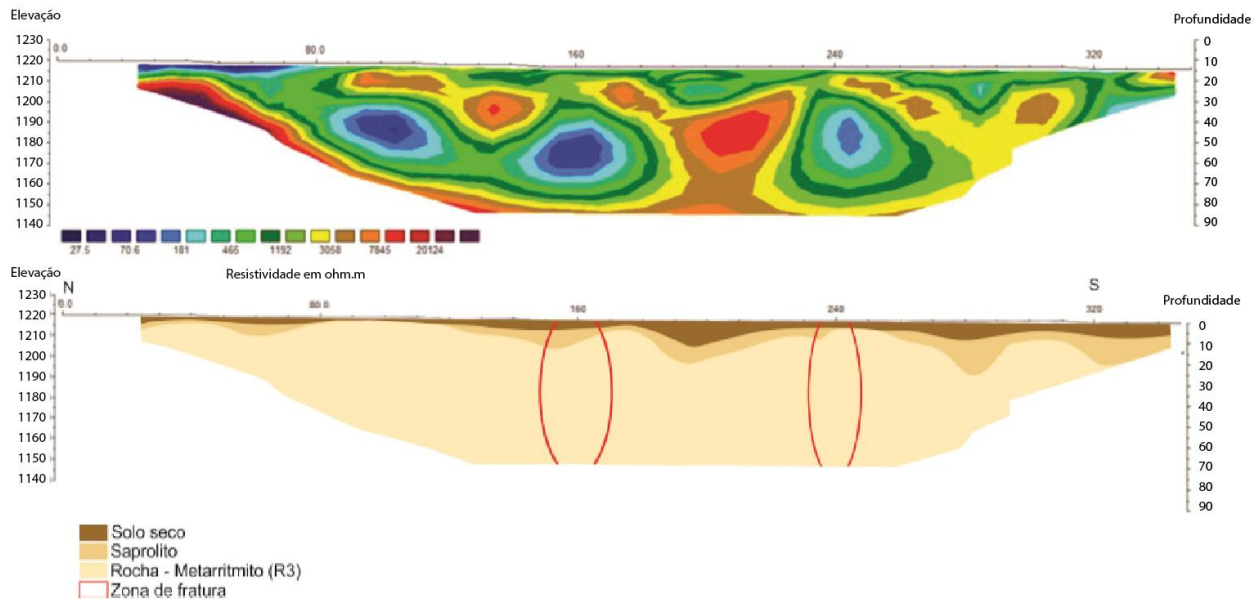


Figura 4.16 - Seção da resistividade do modelo invertido (inversão por quadrados mínimos) com a topografia local e respectiva interpretação pedo-geológica. A porção mais condutiva sob as coberturas de solos entre 80 e 120 metros é interpretada como região potencial de ocorrência de aquífero associado ao modelo de duas porosidades.

BR 03

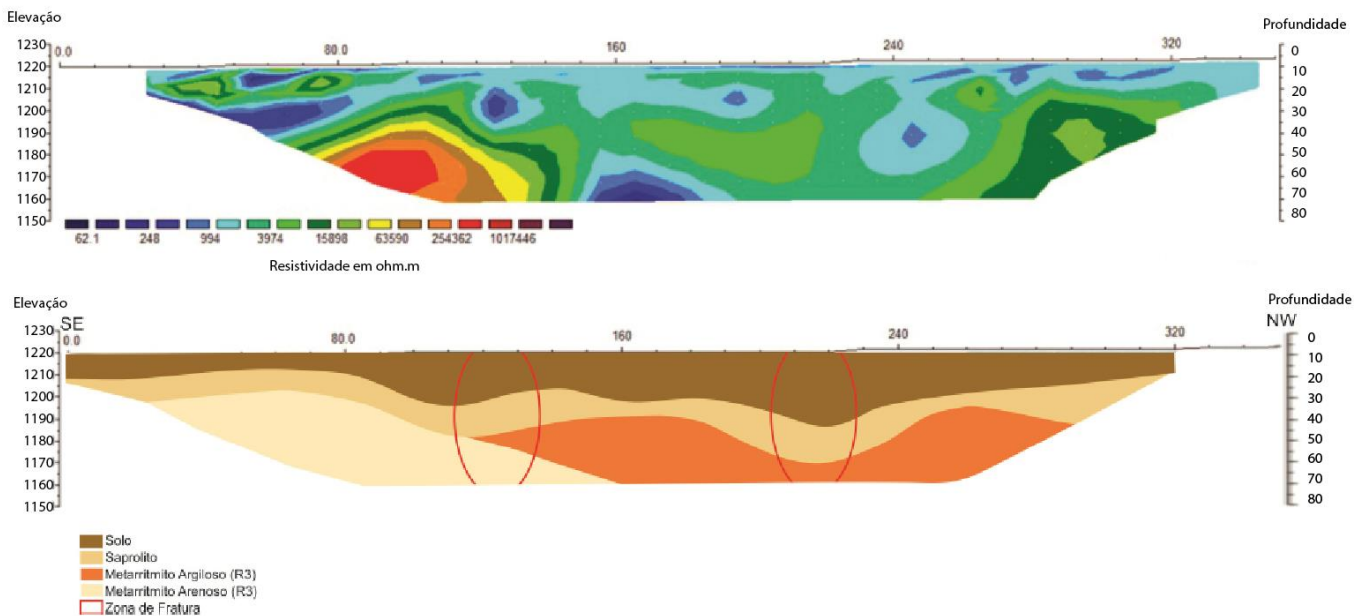


Figura 4.17 - Seção da resistividade aparente (inversão por quadrados mínimos) com topografia e interpretação pedo-geológica. Toda a região entre 160 e 220 metros é interpretada como potencialmente associada a dupla porosidade

- Perfil PIP-05 (227335 / 8278009)

Este perfil apresenta uma forte anomalia condutiva bem definida e vertical, localizada a cerca de 140 metros do início da linha, que cruza meios menos condutivos, interpretados como uma matriz da rocha sem alteração. A zona condutiva se destaca em relação às adjacências resistivas, com geometrias irregulares que indicam rocha maciça e seca. Entre 210 metros até o fim do perfil há valores intermediários de resistividades que são interpretados como uma possível região de aquífero de dupla porosidade vinculado ao Subsistema R₃/Q₃ (Figura 4.18). A combinação de anomalia vertical com zonas adjacentes mais condutivas em superfície é fortemente indicativa de sistema misto em que fraturas canalizam o fluxo e zonas de porosidade intergranular atuam como reservatórios. A presença de anomalias distintas e bem desenvolvidas reforça a interpretação de vias de fluxo preferenciais em meio parcialmente saturado.

PIP 05

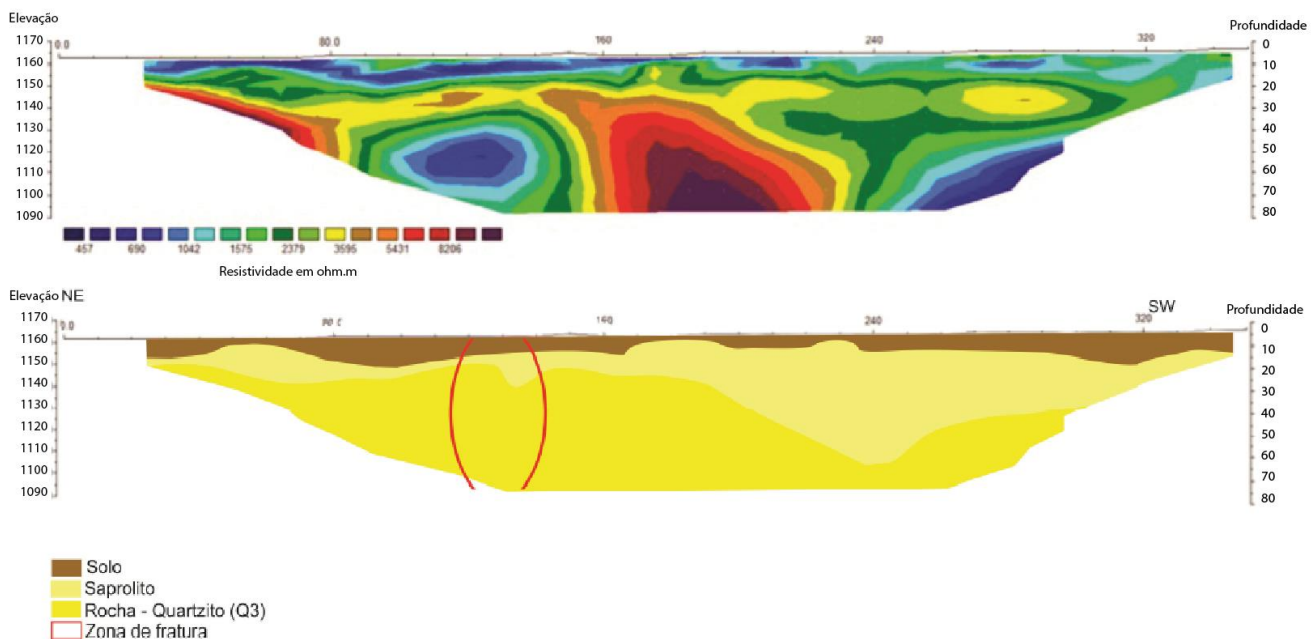


Figura 4.18 - Seção de resistividade com inversão a partir do método dos quadrados mínimos, com a topografia e interpretação pedo-litológica. O trecho entre 210 e 300 metros com profundidade entre 15 e 50 metros é reinterpretado como representativo da dupla porosidade.

Embora a eletrorresistividade não seja o método ideal para identificar diretamente as feições vinculadas ao conceito de dupla porosidade (por não distinguir entre fraturas e poros intergranulares com clareza), em perfis como TCS 05, BR 03 e PIP 05 há indícios compatíveis com a presença conjunta e conectada dos dois tipos de porosidades.

CAPÍTULO V - DISCUSSÕES

5.1 MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual é a base de qualquer estudo hidrogeológico, que atua como uma representação simplificada e cientificamente embasada das principais características físicas, estruturais e hidrodinâmicas de um sistema aquífero. Segundo NRC (1996), trata-se de uma hipótese científica preliminar sobre como a água subterrânea é armazenada, desloca-se e interage com o meio geológico, ao integrar informações sobre litologia, geometria das unidades, parâmetros hidráulicos, zonas de recarga e descarga.

A construção desse modelo é, por natureza, um processo iterativo: é continuamente à medida que novos dados de campo, testes de bombeamento, análises geofísicas e simulações numéricas são incorporados. Esse refinamento é particularmente crítico em meios anisotrópicos como os aquíferos de dupla porosidade, onde o fluxo ocorre simultaneamente em dois domínios com propriedades contrastantes: fraturas de alta condutividade e baixa capacidade de armazenamento, e matriz porosa de baixa condutividade e alta capacidade de armazenamento.

A formulação clássica de Warren e Root (1963) apresentou um dos primeiros modelos matemáticos capazes de representar aquíferos com dupla porosidade, ao afirmar que o fluxo em meios fraturados não ocorre exclusivamente pelas fraturas, mas também envolve a troca de água com a matriz porosa. Nesse modelo, a matriz não participa diretamente do fluxo regional, mas transfere água às fraturas de forma lenta, o que afeta a forma da curva de rebaixamento observada nos testes de bombeamento. O modelo desenvolvido por Moench (1984) ampliou esse conceito ao incluir o efeito da camada mineralizada (“skin”) nas paredes das fraturas, que atua como controle adicional na transferência de fluxo entre os dois domínios.

Posteriormente Moench (1998) ainda avançou no conhecimento na consideração da aplicação do método para avaliação de dados de testes de bombeamento para poços parcialmente penetrantes. Essa abordagem é especialmente relevante em aquíferos como o Subsistema R₃/Q₃, onde o comportamento hidrodinâmico observado em testes de bombeamento apresenta inflexões nas curvas de rebaixamento e respostas bifásicas, que não podem ser explicadas por modelos homogêneos ou puramente fraturados. O uso dos métodos de Warren e Root (1963) e de Moench (1984) são fundamentais para interpretar com fidelidade a resposta hidrodinâmica do sistema de forma a corroborar a reclassificação parcial do reservatório como um aquífero de dupla porosidade.

Ainda que a simulação numérica expresse quantitativamente o comportamento de um sistema, a qualidade das previsões depende diretamente da robustez do modelo conceitual. Como destacam Freeze e Cherry (1979) e NRC (1996), erros conceituais podem comprometer os

resultados por ordens de magnitude. Essa limitação se agrava em meios fraturados onde a distribuição, geometria e conectividade das fraturas raramente são conhecidas em larga escala, e os parâmetros hidráulicos obtidos em sondagens refletem apenas uma pequena fração da realidade tridimensional do meio.

No presente trabalho, o modelo conceitual é considerado o aspecto mais importante da reinterpretação parcial do Subsistema Aquífero R₃/Q₃. Tradicionalmente tratado como um aquífero exclusivamente fraturado (Campos e Freitas-Silva, 1999) (Figura 5.1), este subsistema apresenta, na realidade, evidências estruturais, texturais e hidrodinâmicas de um comportamento de dupla porosidade, sobretudo em sua porção superior nas áreas de chapadas elevadas.

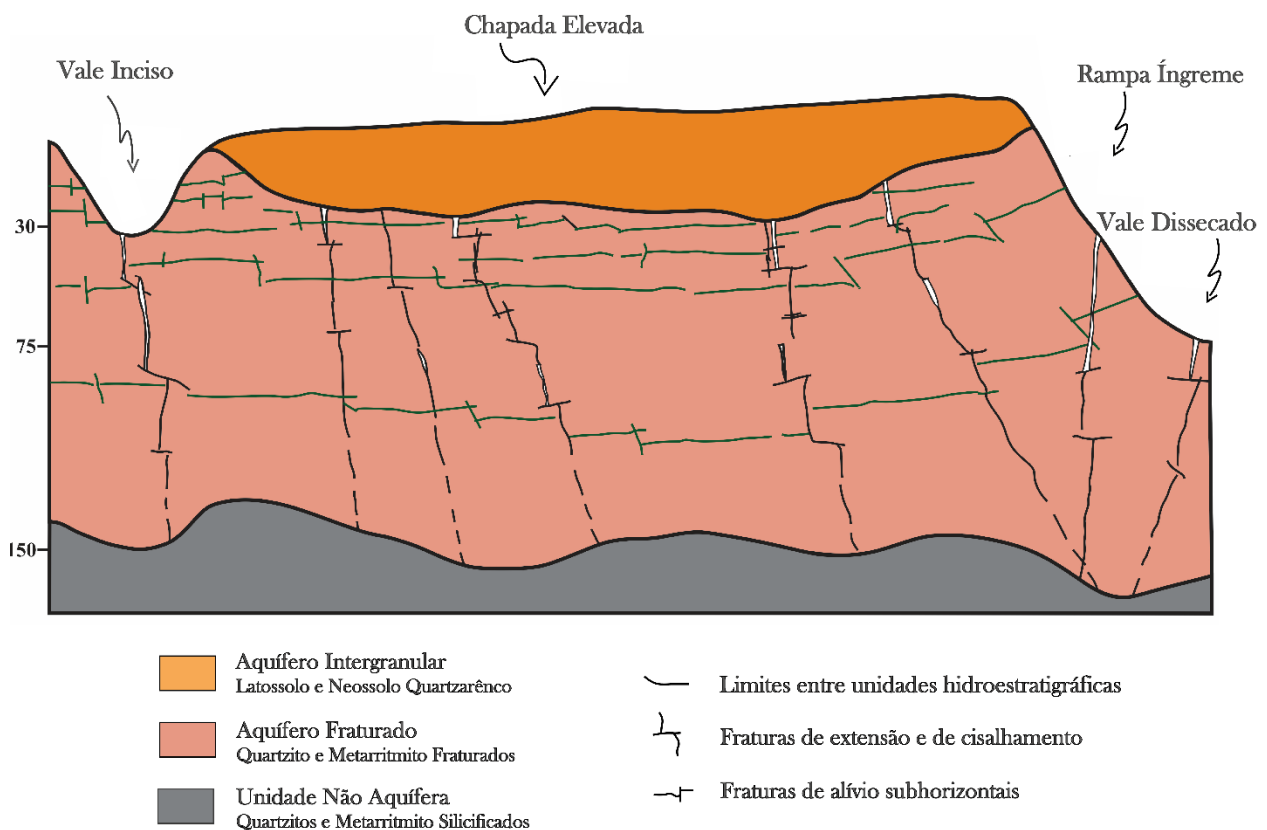


Figura 5.1 - Croqui esquemático da estruturação hidroestratigráfica tradicionalmente atribuída ao Subsistema Aquífero R₃/Q₃ nas áreas de chapadas elevadas no Distrito Federal. A configuração mostra uma zona superficial com porosidade intergranular (solo e saprolito), sobreposta diretamente a uma zona de rocha fraturada.

5.1.1 Novo Modelo Conceitual do Subsistema Aquífero R₃/Q₃: Integração da Porosidade Matricial

Baseado nos modelos conceituais propostos por Campos e Freitas-Silva (1998) e Lousada (2005), o Subsistema Aquífero R₃/Q₃ é interpretado, em função do contexto geomorfológico e

estrutural, em duas configurações distintas. Nas áreas elevadas do relevo, especialmente na porção interior das chapadas, o sistema apresenta duas superfícies potenciométricas, correspondentes a uma zona porosa superior, geralmente associada ao manto de alteração e a uma zona fraturada inferior na rocha menos intemperizada. Em regiões de relevo suave ou em áreas próximas a escarpas e bordas de chapadas, onde a espessura do intemperismo é reduzida, o Subsistema Aquífero R₃/Q₃ se comporta segundo um modelo de superfície potenciométrica única, não confinada, no qual o fluxo subterrâneo ocorre predominantemente em um único domínio hidráulico.

Essas duas configurações representam respostas hidrodinâmicas distintas dentro de um mesmo sistema aquífero, condicionadas principalmente pela espessura do perfil de alteração, pela densidade de fraturas e pelas condições locais de recarga e descarga. Entretanto, com base nos dados apresentados no presente trabalho, propõe-se uma revisão conceitual significativa. A nova abordagem reconhece a existência de três zonas hidroestratigráficas superpostas no interior das chapadas elevadas: uma zona porosa superior, composta por regolito espesso com porosidade exclusivamente intergranular; uma zona intermediária de dupla porosidade, que caracteriza um regime de troca hidráulica entre os dois meios; e uma zona fraturada profunda, correspondente à rocha sã, onde o fluxo ocorre quase exclusivamente ao longo de planos de fraturas (Figura 5.2). Essa estrutura vertical condiz com a formulação teórica de Moench (1984) para interpretação dos testes de bombeamento e permite compreender o comportamento bifásico observado nas curvas de rebaixamento: um escoamento inicial rápido pelas fraturas seguido por uma resposta mais lenta ligada à contribuição da matriz porosa.

Do ponto de vista dimensional, essa nova interpretação implica em diferenças relevantes entre o interior das chapadas e suas bordas. Nas áreas mais elevadas, observa-se um perfil de alteração espesso, frequentemente superior a 20 metros, com porosidade total variando entre 27% e 33% e porosidade efetiva considerada entre 10% e 15%.

Essa configuração favorece o acúmulo de água no saprolito e uma regulação mais eficiente da superfície potenciométrica, mesmo em períodos secos. A espessura saturada total pode atingir 40 a 50 metros, o que confere ao sistema uma notável capacidade de armazenamento. Já nas bordas das chapadas, a espessura de intemperismo é consideravelmente menor, e a zona porosa superior é descontínua e mais delgada. Nesses locais, a porosidade total dos solos varia entre 20% e 25% e a efetiva entre 5% e 10%. O domínio fraturado tende a ser mais raso e menos conectado, com espessura saturada inferior a 30 metros, o que justifica a predominância do modelo de superfície única e comportamento não confinado nestas áreas.

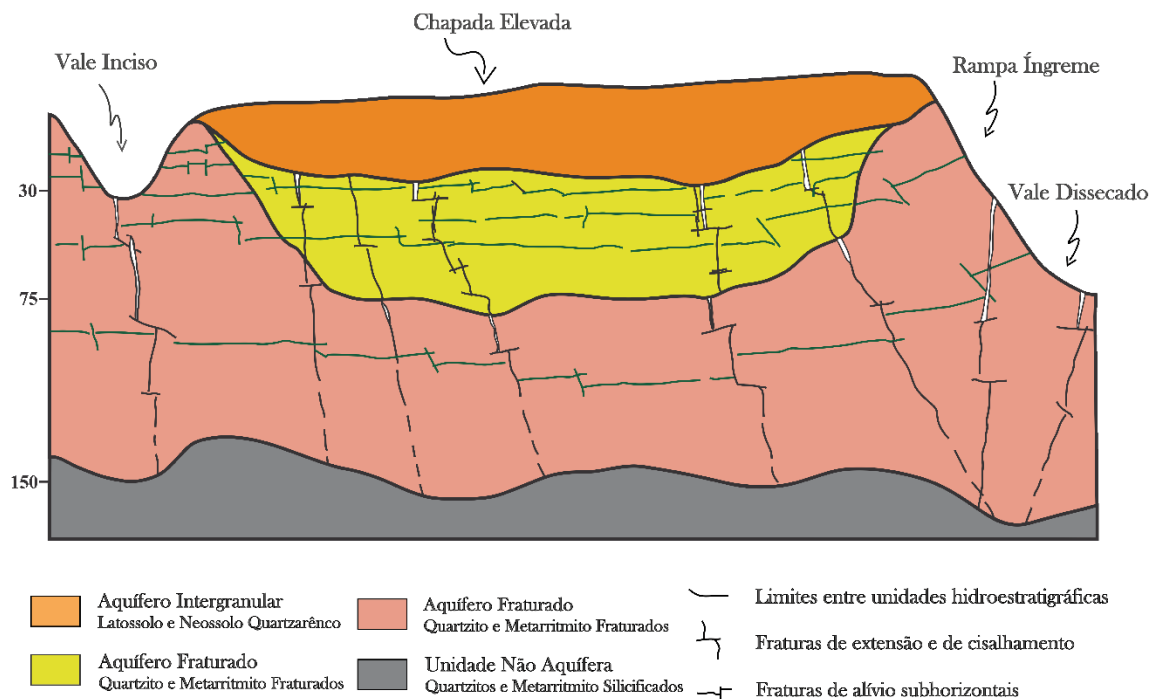


Figura 5.2 - Croqui esquemático representando o novo modelo conceitual proposto para o Subsistema Aquífero R₃/Q₃. A estruturação vertical compreende três zonas distintas: (i) Camada superficial de regolito espesso com porosidade predominantemente intergranular; (ii) Zona intermediária com comportamento típico de dupla porosidade, caracterizada pela interação entre matriz porosa alterada e planos condutores; e (iii) Zona profunda de rocha sã, com fluxo concentrado em fraturas com desenvolvimento variável.

Em relação aos parâmetros hidrodinâmicos, a condutividade hidráulica acompanha a estrutura vertical do aquífero. No regolito, onde os poros são conectados, os valores médios da condutividade hidráulica são ordem de grandeza de 10^{-5} m/s, principalmente em função da textura média a arenosa dos materiais constituintes (saprolitos de quartzitos e metarritmitos arenosos). Na zona intermediária de dupla porosidade, esse valor é reduzido para uma faixa média da ordem de grandeza de 10^{-6} m/s devido a resistência ao fluxo imposta pelas interfaces entre matriz e fraturas.

No domínio exclusivamente fraturado, a condutividade hidráulica apresenta maior heterogeneidade, com valores em torno de 10^{-7} m/s, em função da densidade, orientação e grau de preenchimento das fraturas. A transmissividade segue essa distribuição, com valores mais elevados no interior das chapadas, onde o aporte simultâneo da matriz e das fraturas, aliado à maior espessura saturada, permite alcançar faixas entre 10^{-4} e 10^{-5} m²/s. Nas bordas, os valores de transmissividade geralmente não ultrapassam 10^{-5} m²/s.

O coeficiente de armazenamento tende a diminuir com o aumento da profundidade, sendo atribuídos os seguintes valores médios de referência: aquífero superior livre, da ordem de $1,5 \times 10^{-1}$; porção de dupla porosidade, entre $1,0 \times 10^{-1}$ e 5×10^{-2} ; e porção fraturada, da ordem de 10^{-2} .

Esses valores caracterizam os diferentes aquíferos sobrepostos como sistemas não confinados.

O comportamento do fluxo subterrâneo no novo modelo conceitual (Figura 5.3) é consideravelmente mais complexo e realista em comparação com a caracterização anterior. A água circula de forma preferencial nas fraturas abertas, especialmente nos planos de acamamento sub-horizontais e nas fraturas verticais reativadas, que atuam como condutos verticais descendentes. Ao mesmo tempo, a matriz porosa armazena e libera lentamente volumes significativos de água, o que confere ao sistema uma resposta hidrodinâmica bifásica. Essa dinâmica é confirmada pelas curvas de rebaixamento observadas nos testes de bombeamento, que exibem inflexões e platôs indicativos de esvaziamento lento da matriz, um comportamento que não seria reproduzido adequadamente pelo modelo fraturado tradicional.

Em termos de recarga e sustentabilidade, a redefinição do modelo conceitual amplia significativamente a compreensão sobre os mecanismos de renovação hídrica. A presença de porosidade intergranular na porção matricial favorece a infiltração difusa e o armazenamento prolongado, enquanto as fraturas contribuem para escoamentos mais rápidos e pontuais. Essa combinação permite uma recarga mais eficiente e resiliente, especialmente em áreas de topo de chapada e vertentes suaves, onde a infiltração é favorecida pelos solos e relevo. Como consequência, o sistema é capaz de sustentar vazões estáveis por períodos mais longos, com manutenção da recarga aos períodos de chuvas mais intensas.

Do ponto de vista da gestão dos recursos hídricos, a adoção do modelo de dupla porosidade implica na necessidade de uma revisão na forma como o Subsistema R₃/Q₃ é avaliado e explorado. Ao considerar a possibilidade da contribuição da água armazenada na matriz, a outorga neste ambiente pode ser majorada, a partir dos volumes anteriormente praticados. Outro aspecto se refere à análise de vulnerabilidade à contaminação que a partir da nova perspectiva deverá considerar maiores áreas para a delimitação de zonas de proteção, uma vez que, áreas com maior contribuição intergranular são mais susceptíveis à infiltração de contaminantes, exigindo maior controle sobre o uso do solo e proteção das áreas de recarga.

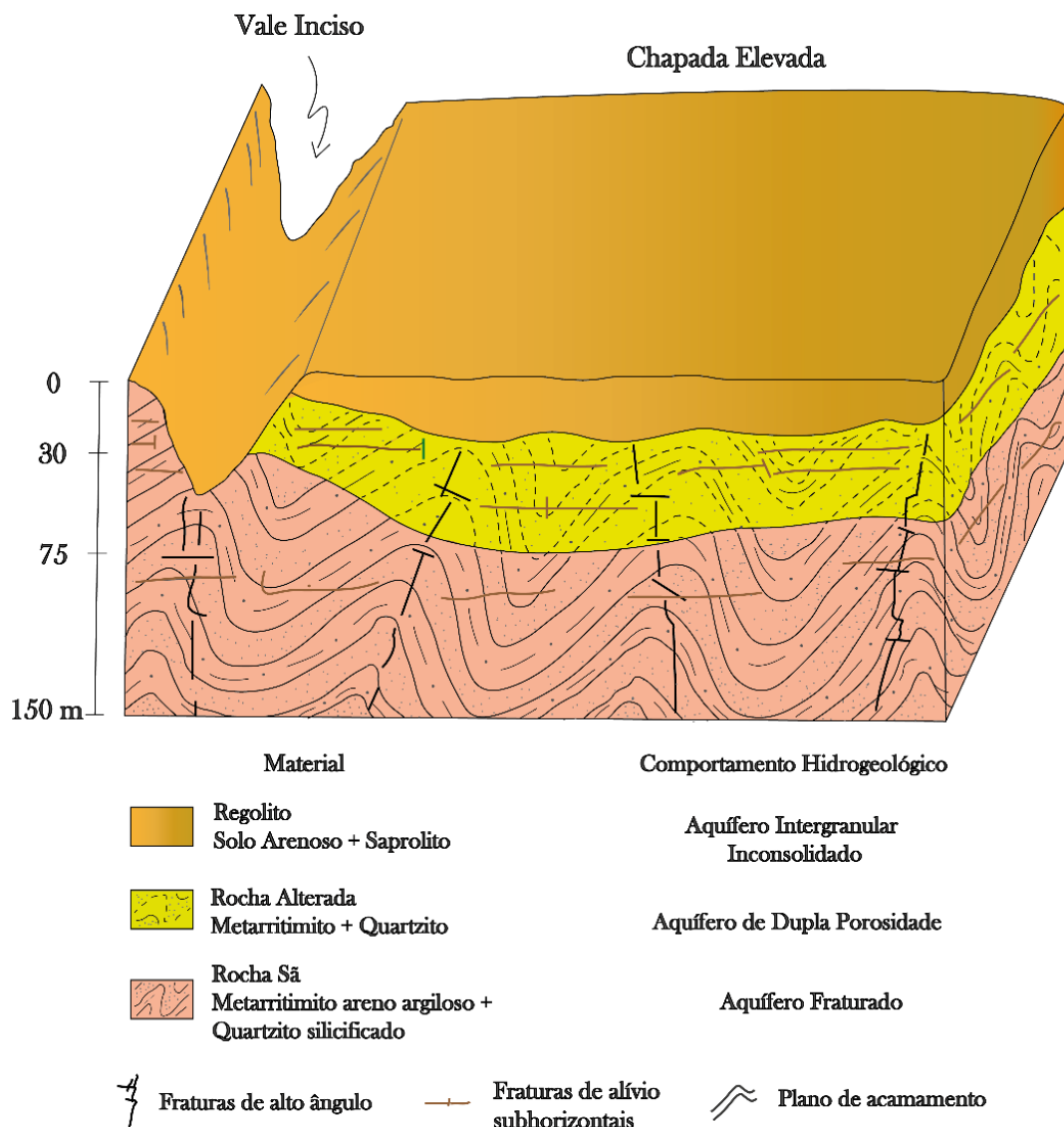


Figura 5.3 - Bloco-diagrama esquemático do novo modelo conceitual proposto para o Subsistema Aquífero R₃/Q₃ nos planos elevados do Distrito Federal. A ilustração representa a compartimentação vertical do sistema em três zonas hidroestratigráficas: uma zona superior com porosidade intergranular dominante (saprolito), uma zona intermediária de dupla porosidade (matriz e fraturas em interação) e uma zona inferior fraturada (rocha sã), onde o fluxo ocorre principalmente pelas fraturas. O modelo expressa a transição gradativa entre os domínios porosos e fraturados, incorporando os controles litológicos e geomorfológicos sobre o fluxo subterrâneo, e fundamenta a reinterpretação do sistema como aquífero de dupla porosidade.

5.2 ESTIMATIVA DE RESERVAS HÍDRICAS

O conhecimento das disponibilidades hídricas subterrâneas constitui um instrumento essencial para o planejamento e a gestão sustentável dos aquíferos, em especial em contextos urbanos densamente ocupados, como o Distrito Federal. Segundo Costa (1988), o cálculo das reservas de águas subterrâneas subdivide-se em três categorias principais: reservas renováveis, reservas permanentes e reservas exploráveis.

As reservas renováveis (ou reguladoras) correspondem ao volume de água que recarrega o aquífero a cada ano, geralmente estimado com base na infiltração efetiva da precipitação sobre as áreas de recarga. Esse valor representa a parcela de água que, em um ciclo hidrológico completo, alcança efetivamente as zonas saturadas e pode ser explorada com maior segurança.

As reservas permanentes (ou seculares) representam o volume de água armazenado abaixo do nível freático mínimo, ou seja, aquele que permanece no sistema mesmo após períodos prolongados de estiagem. Nos aquíferos fraturados, como tradicionalmente se interpretava o Subsistema R₃/Q₃, essas reservas são estimadas com base no índice de fraturas interconectadas (Ifi), que reflete a fração da rocha efetivamente capaz de armazenar e transmitir água.

As reservas exploráveis (ou disponibilidades), por sua vez, são definidas como o volume de água que pode ser retirado do sistema de forma sustentável, que respeita os limites da recarga e os estoques permanentes. A ADASA aplica as seguintes diretrizes para a estimativa da disponibilidade: $Re = R_r + (R_p \times \alpha)$; onde:

- Re = reserva explorável (ou disponibilidade efetiva),
- R_r = reserva renovável,
- R_p = reserva permanente,
- α = fração da reserva permanente, por ano, considerada disponível, variável conforme as características do sistema.

Esse critério permite ajustar o volume explorável à dinâmica específica de cada sistema e incorporar elementos como tipo de solo, cobertura vegetal, regime de bombeamento e estrutura do aquífero.

5.2.1 Cálculo das Reservas do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ (Fraturado)

Para o Subsistema R₃/Q₃, classificado originalmente como aquífero fraturado, os cálculos de reserva adotaram as equações consagradas pela literatura (Costa, 1988; Campos, 2012) e os mesmos parâmetros definidos pela ADASA. A área considerada para o Subsistema R₃/Q₃ foi de 1.400 km² e a recarga efetiva para a porção fraturada foi estimada em 5% da precipitação média de 1.450 mm/ano.

a) Para a reserva renovável do meio fraturado (R_{rf}), foi utilizada a equação:

$R_{rf} = A \times P \times r$, onde A é a área do sistema, P é a precipitação média e r é a recarga efetiva (percentual da chuva que retorna ao aquífero como recarga, considerado 5% da precipitação).

$$R_{rf} = 1400 \text{ km}^2 \times (1,45 \times 10^{-3} \text{ km/ano}) \times 0,05$$

$$R_{rf} = 0,1015 \text{ km}^3/\text{ano}.$$

b) Para a reserva permanente (R_p), foi utilizada a equação:

$R_{pf} = A \times b \times Ifi$, onde A é a área do sistema, b é a espessura saturada e Ifi é o índice de fraturas interconectadas. Para a proposição dos valores de espessura e do Ifi foram mantidos os valores do intervalo mais profundos proposto pela ADASA: b de 120 a 180 m = 60 m de $Ifi = 0,02$.

Dessa forma a reserva permanente para a porção fraturada do aquífero é:

$$R_{pf} = 1400 \text{ km}^2 \times 0,06 \text{ km} \times 0,02,$$

$$R_{pf} = 1,68 \text{ km}^3$$

c) Para a reserva explotável (R_{ef}), foi utilizada a fórmula e considerado que até 5% da reserva permanente pode compor a disponibilidade:

$$R_{ef} = R_r + (\alpha \times R_p)$$

$$R_{ef} = 0,1015 \text{ km}^3/\text{ano} + (1,68 \text{ km}^3) \times (0,05/\text{ano})$$

$$R_{ef} = 0,1855 \text{ km}^3/\text{ano}.$$

Dessa forma:

- Reserva renovável (R_{rf}): aproximadamente 0,1015 km³/ano.
- Reserva permanente (R_{pf}): aproximadamente 1,68 km³
- Reserva explotável (R_{ef}): aproximadamente 0,1855 km³/ano.

5.2.2 Cálculo das Reservas do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ (Dupla Porosidade)

Para a estimativa da porção do aquífero enquadrada como de dupla porosidade foram considerados os seguintes parâmetros:

- Área igual a 75% do total do Subsistema R₃/Q₃, com vista que 25% ocupam as porções de bordas de chapadas em que este modelo não está presente. Assim, área é igual a 1050 km²;
- Porosidade média total = planar + matricial, igual a 7%;
- Recarga efetiva considerada 10% da precipitação (por ser um meio com maior interconexão da porosidade que funciona como uma esponja para absorção das águas de precipitação, além de ocorrerem em áreas com padrão de relevo suave ondulado);
- A contribuição da reserva permanente para as disponibilidades foi considerada de 10% e assim os valores são estimados, em:

a) Para a reserva renovável do meio de dupla porosidade (R_{rdp}), foi utilizada a equação:

$$R_{rdp} = A \times P \times r$$

$$R_{rdp} = 1050 \text{ km}^2 \times (1,45 \times 10^{-3} \text{ km}) \times 0,1$$

$$R_{rdp} = 0,15225 \text{ km}^3/\text{ano}.$$

b) Para a reserva permanente do meio de dupla porosidade (R_{pdp}), foi utilizada a equação:

$R_{pdp} = A \times b \times ne$, onde A é a área do sistema, b é a espessura saturada e ne é a porosidade efetiva média. E para a proposição dos valores de espessura foi considerado: b de 50 a 120 m, isto é, igual a 70 m.

Dessa forma a reserva permanente para a porção de dupla porosidade do aquífero é:

$$R_{pdp} = 1050 \text{ km}^2 \times 0,07 \text{ km} \times 0,07$$

$$R_{pdp} = A \times b \times ne$$

$$R_{pdp} = 5,145 \text{ km}^3$$

c) Para a reserva explotável do meio de dupla porosidade (Re_{dp}), foi considerado que até 10% da reserva permanente pode compor a disponibilidade:

$$Re_{dp} = R_r + (\alpha \times R_p)$$

$$Re_{dp} = 0,15225 \text{ km}^3/\text{ano} + (5,145 \text{ km}^3 \times 0,1/\text{ano})$$

$$Re_{dp} = 0,6667 \text{ km}^3/\text{ano}.$$

Considerando que 25% da área seja enquadrada no modelo fraturado (que envolve as bordas de chapadas no contexto do novo modelo), tem-se que:

- $R_{rf} = 0,1015 \times 0,25 = 0,025375 \text{ km}^3/\text{ano}$
- $R_{pf} = 1,68 \times 0,25 = 0,420 \text{ km}^3$
- $Re_f = 0,1855 \times 0,25 = 0,046375 \text{ km}^3/\text{ano}$

Dessa forma:

- Reserva renovável total (R_{rt}) = $0,15225 + 0,025375 = 0,177625 \text{ km}^3/\text{ano}$
- Reserva permanente total (R_{pt}) = $5,145 + 0,420 = 5,565 \text{ km}^3$
- Reserva explotável (Re_t) = $0,6667 + 0,046375 = 0,713075 \text{ km}^3/\text{ano}.$

5.2.3 Comparação dos Modelos e Implicações para a Gestão Hídrica

A comparação entre os resultados obtidos pelos dois modelos hidrogeológicos aplicados ao aquífero R₃/Q₃ evidencia diferenças expressivas, tanto nos valores estimados de reserva quanto nas implicações práticas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal (Figura 5.4). Enquanto o modelo tradicional considerava o Subsistema R₃/Q₃ como um aquífero exclusivamente fraturado, o novo modelo propõe uma “configuração mista”, que reconhece que aproximadamente 75% da área funciona como um sistema de dupla porosidade, com a presença significativa de saprolito e zona de transição com maior porosidade efetiva.

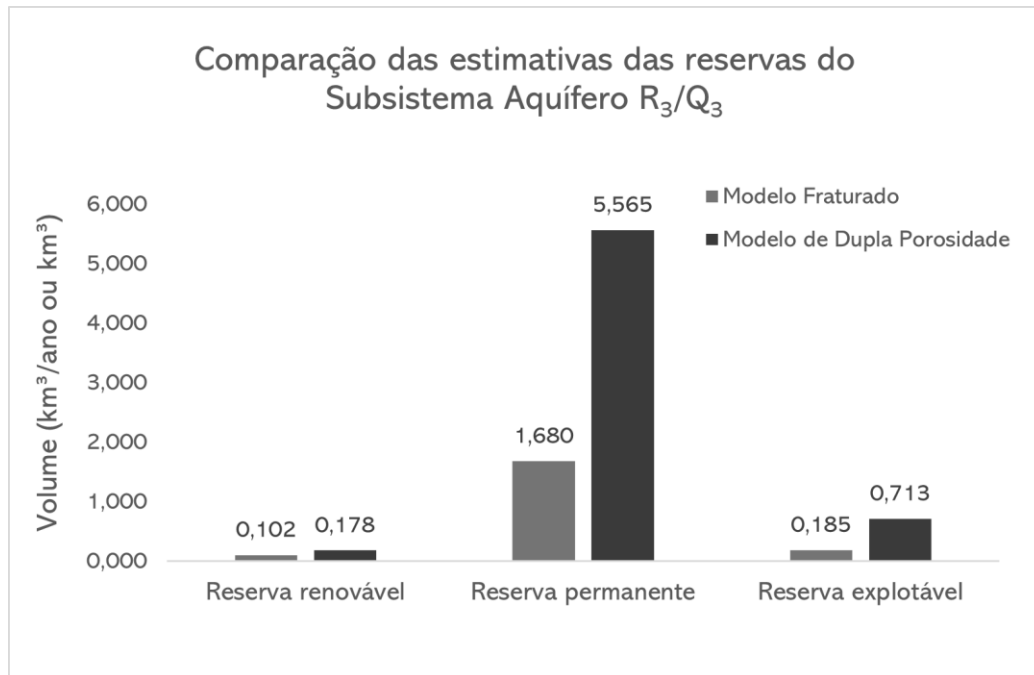


Figura 5.4 - O gráfico apresenta a comparação entre os volumes estimados de reserva renovável, permanente e explorável do Subsistema Aquífero R₃/Q₃ com base em dois modelos conceituais. O modelo fraturado, de 2007, representado pelas barras cinza-claro, considera o aquífero como um sistema exclusivamente fraturado, enquanto o modelo de dupla porosidade, de 2025, representado pelas barras cinza-escuro, incorpora três compartimentos verticais (saprolito, zona de transição e fraturado profundo). Os resultados mostram aumento expressivo nas reservas permanente e explorável, com maior potencial de armazenamento e uma representação mais realista da dinâmica hídrica do sistema.

Do ponto de vista quantitativo, a estimativa de reserva explorável aumenta de 0,1855 km³/ano para 0,7131 km³/ano, um incremento de 284% na disponibilidade anual de água subterrânea potencialmente utilizável de forma sustentável. Esse ganho decorre da inclusão da matriz porosa da rocha friável ou pouco litificada como um compartimento com porosidade efetiva superior às fraturas da rocha sã, que proporciona maior capacidade de armazenamento e maior resiliência em períodos secos.

A reserva permanente também apresenta ampliação significativa, com valores que passam de 1,68 km³ para 5,565 km³, o que demonstra um volume muito superior de água armazenada disponível no longo prazo. Já a reserva renovável cresce de 0,1015 km³/ano para 0,1776 km³/ano, mesmo considerando uma taxa de recarga mais conservadora no novo modelo, devido à melhor representação das características físicas do meio.

Do ponto de vista qualitativo, o modelo de dupla porosidade representa um avanço significativo no conhecimento técnico e na capacidade de previsão do comportamento do aquífero. Ao incorporar as propriedades hidráulicas do regolito e da matriz porosa, o modelo permite simular com maior realismo a resposta observada nos testes de bombeamento, marcadamente bifásica, com uma fase inicial de escoamento rápido e posterior liberação lenta de água da matriz. Essa leitura

realista do sistema também fornece subsídios mais robustos para a delimitação das áreas prioritárias de conservação e recarga, especialmente nas chapadas elevadas, onde a espessura do manto de intemperismo é mais expressiva.

5.3 SUSTENTABILIDADE DE EXPLOTAÇÃO DO SUBSISTEMA AQUÍFERO R₃/Q₃

A sustentabilidade da exploração dos recursos hídricos subterrâneos é uma questão crítica em contextos urbanos em rápida expansão, como o caso do Distrito Federal. Desde sua fundação em 1960, a região passou por um crescimento populacional intenso, que passou de cerca de 140 mil habitantes nos anos 1960, para mais de 3,2 milhões em 2022, conforme dados do IBGE (2022). Esse crescimento foi acompanhado por um processo de urbanização acelerado, frequentemente marcado por ocupações desordenadas, expansão de áreas periféricas e parcelamentos irregulares, que pressionaram sobremaneira os recursos naturais da região, especialmente a água.

Tradicionalmente, o abastecimento de água no Distrito Federal baseou-se predominantemente em mananciais superficiais, como os sistemas Descoberto e Santa Maria/Torto. Contudo, com o aumento da demanda, a degradação das bacias hidrográficas e episódios críticos como a crise hídrica de 2016–2018, observou-se uma intensificação no uso de águas subterrâneas como fonte alternativa de abastecimento. Nesse contexto, aquíferos como o Sistema Paranoá, especialmente o Subsistema R₃/Q₃, ganharam papel de destaque.

5.3.1 Conceito de Sobreexploração

A sobreexploração de aquíferos ocorre quando a retirada de água subterrânea supera a taxa de recarga natural, resultando em impactos como rebaixamento contínuo do nível potenciométrico, redução da vazão de nascentes, secamento de poços, subsidência e degradação da qualidade da água (Freeze e Cherry, 1979; Foster e Chilton, 2003; Custodio, 2002). Segundo Custodio, sua detecção exige séries históricas confiáveis de níveis estáticos e dados de vazão, além de um bom entendimento do sistema aquífero.

No Brasil, a falta de redes de monitoramento contínuo dificulta diagnósticos precisos, exigindo uma gestão preventiva. Em aquíferos fraturados ou de dupla porosidade, como os do Grupo Paranoá, a recarga e o armazenamento são mais complexos, tornando difícil estabelecer limites claros entre exploração sustentável e sobreexploração. Nesses casos, aplica-se o conceito de equilíbrio dinâmico: se os níveis piezométricos variam dentro de uma faixa aceitável ao longo do tempo, o sistema ainda pode ser considerado sustentável.

5.3.2 Histórico de Ocupação e Demanda Hídrica no Distrito Federal

A ocupação do Distrito Federal, impulsionada pela transferência da capital em 1960, superou as previsões iniciais de 500 mil habitantes e resultou na formação da RIDE, que atualmente abriga mais de 4,6 milhões de pessoas (CODEPLAN, 2022). Esse crescimento aumentou de forma significativa a pressão sobre os recursos hídricos da região. A partir dos anos 1990, bairros como Jardim Botânico, São Sebastião, Sobradinho e Paranoá passaram por forte expansão urbana, muitas vezes por meio de parcelamentos irregulares e sem infraestrutura de saneamento, o que levou ao uso intensivo de poços particulares como principal fonte de abastecimento.

Estudos da ADASA (2007; 2018) e da ANA (2021) demonstram que, embora as águas subterrâneas representem uma parcela menor do abastecimento total do DF, exercem papel estratégico nas regiões não atendidas pela CAESB, onde a dependência é total. A urbanização alterou as condições naturais de recarga, ao substituir áreas vegetadas por superfícies impermeáveis, o que reduziu a infiltração e agravou o risco de sobreexploração.

Durante períodos de seca, como entre 2016 e 2018, usuários públicos e privados passaram a utilizar água subterrânea em substituição à superficial, muitas vezes sem planejamento técnico, monitoramento ou outorga, inviabilizando uma avaliação precisa sobre a sustentabilidade desse uso. Assim, o histórico de expansão urbana desordenada, a crescente dependência de aquíferos e a escassez de dados contínuos reforçam a necessidade de adotar uma gestão preventiva e sustentável, especialmente no contexto do aquífero R₃/Q₃.

5.3.3 Sustentabilidade da Exploração Subterrânea no Distrito Federal Diante da Escassez de Dados

A análise da sustentabilidade da exploração hídrica no Distrito Federal enfrenta um entrave estrutural: a falta de dados de monitoramento em áreas críticas, onde a pressão sobre os aquíferos é mais intensa. As redes da ADASA concentram-se principalmente em regiões de baixa exploração, como unidades de conservação ou zonas rurais, o que distorce a compreensão real da dinâmica dos aquíferos em áreas urbanizadas. Essa lacuna inviabiliza a definição de limites seguros de uso e compromete a gestão eficaz dos recursos subterrâneos. Diante disso, é imprescindível instalar poços de monitoramento em locais com maior intensidade de exploração, de modo a obter dados representativos das zonas mais vulneráveis. Sem esse monitoramento, qualquer iniciativa de regulação se apoia em estimativas genéricas, pouco úteis para a realidade local.

A adoção do modelo conceitual de dupla porosidade para o aquífero R₃/Q₃ contribui para representar com maior precisão o comportamento hidráulico desses sistemas. Para avançar, a gestão hídrica deve se apoiar na produção de conhecimento técnico, no fortalecimento institucional, no mapeamento participativo de poços e na integração de informações hidrogeológicas com dados socioeconômicos. Ignorar essas diretrizes aumenta o risco de sobreexploração silenciosa dos aquíferos, de forma a comprometer a resiliência hídrica da região.

5.3.4 Diretrizes para a Gestão Sustentável da Exploração do Subsistema R₃/Q₃

Diante da fragilidade dos dados e da crescente demanda por água subterrânea em áreas de ocupação irregular, torna-se urgente adotar medidas estruturais para garantir a gestão sustentável dos aquíferos. Entre as principais diretrizes, destaca-se a necessidade de instalar poços de monitoramento em áreas críticas. A ADASA e demais órgãos competentes devem implantar poços específicos para o acompanhamento piezométrico e da qualidade da água em regiões com alta densidade de poços particulares, como o Jardim Botânico, Altiplano Leste, Grande Colorado, Setor Habitacional Tororó e Sobradinho. A distribuição desses poços deve levar em conta a geologia local e o histórico de uso da água.

Também se faz necessário promover a regularização e o georreferenciamento dos poços existentes. Muitos poços particulares continuam fora do controle institucional. A adoção de políticas de regularização simplificada, aliada a campanhas educativas, pode ampliar significativamente o cadastro de usuários e melhorar a qualidade da base de dados oficial.

Outro ponto fundamental é o desenvolvimento de modelos hidrogeológicos integrados. A elaboração de modelos conceituais e numéricos para as principais áreas de ocorrência do subsistema R₃/Q₃ permite simular cenários de uso e estabelecer limites sustentáveis de exploração. A reinterpretação desse sistema aquífero como de dupla porosidade, por exemplo, fornece uma base mais coerente para representar o fluxo subterrâneo e suas particularidades.

Além disso, a água subterrânea deve ser incorporada ao planejamento urbano e ambiental. A gestão dos aquíferos não pode ocorrer de forma isolada, devendo integrar-se ao ordenamento territorial, ao licenciamento de novos parcelamentos urbanos e à definição de áreas prioritárias para recarga e conservação. Instrumentos como as Zonas de Proteção Ambiental (ZPA) e soluções de infraestrutura verde podem favorecer a infiltração da água e reduzir a pressão sobre os mananciais subterrâneos.

Por fim, é imprescindível ampliar a rede de monitoramento da recarga. Nas áreas mais vulneráveis do Distrito Federal, quase não existem instrumentos adequados para quantificar com precisão a recarga, como pluviômetros e estações de medição de infiltração. Expandir essa rede é

essencial para aprimorar as estimativas de disponibilidade hídrica e embasar uma gestão mais eficiente e técnica dos recursos subterrâneos.

5.4 AVALIAÇÃO DA RECARGA DO SUBSISTEMA AQUÍFERO R₃/Q₃

A avaliação da recarga natural dos aquíferos constitui uma etapa fundamental para a caracterização da dinâmica hidrogeológica, especialmente em sistemas com comportamento complexo, como o Subsistema R₃/Q₃ do Sistema Paranoá. A recarga representa o volume de água que efetivamente infiltra no solo e atinge a zona saturada, que contribui para a manutenção dos níveis freáticos e a sustentabilidade dos usos antrópicos (Ribeiro *et al.*, 2015). A estimativa dessa reposição, bem como a identificação de seus condicionantes naturais e antrópicos, é essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal (ADASA, 2015).

A configuração geomorfológica da região exerce um papel determinante na recarga. O Subsistema Aquífero R₃/Q₃ está amplamente distribuído sobre chapadas elevadas, típicas do Planalto Central, com altitudes que frequentemente superam os 1.100 metros e com padrão de relevo plano a suave ondulado. Esse contexto morfológico favorece a infiltração da água da chuva por meio de diversos mecanismos:

- Precipitação orográfica mais intensa em áreas elevadas;
- Presença de solos espessos e porosos, como latossolos e neossolos quattzarênicos, com alta capacidade de infiltração;
- Declividades suaves, que favorecem a infiltração e reduzem as perdas por escoamento superficial e fluxo interno;
- Existência de zona de regolito espessa e permeável, que atua como reservatório intermediário, retarda a percolação e promove recarga difusa e sustentada.

Essas características fazem das áreas onde o Subsistema R₃/Q₃ ocorre, em chapadas elevadas, zonas de alta relevância hidrogeológica, que funcionam como principais áreas de recarga do próprio aquífero e dos demais que ocorrem em áreas topograficamente mais rebaixadas (CPRM, 2010; Ribeiro *et al.*, 2015).

Além da morfologia favorável, o modelo hidrogeológico proposto nesta dissertação amplia a compreensão dos processos de recarga. Ao contrário do modelo tradicional, em que a água recarrega o sistema apenas pelas fraturas conectadas à superfície, o novo modelo incorpora o papel do regolito e da matriz porosa alterada da zona de intemperismo. A porção de dupla porosidade do aquífero apresenta vazios totais, significativamente maiores, entre 8% e 10%, em comparação aos índices típicos de meios exclusivamente fraturados (1% a 2%), o que permite maior armazenamento e liberação progressiva da água subterrânea (Moench, 1984; ADASA, 2015).

A vegetação nativa do Cerrado também tem papel determinante. Suas raízes profundas e estruturação granular das porções rasas dos perfis de solos favorecem a infiltração e reduzem perdas por escoamento superficial e erosão. Em contrapartida, a substituição por áreas urbanas impermeabilizadas, agrícolas compactadas ou a supressão da vegetação nativa, reduzem drasticamente a recarga efetiva (Ribeiro *et al.*, 2015; ZEE-DF, 2020).

É importante destacar que as zonas de maior recarga coincidem com áreas de dupla porosidade apresentadas neste estudo. Nesses trechos, a água infiltra, armazena no regolito e percola gradualmente até alcançar as fraturas mais profundas, o que aumenta a eficiência hidrodinâmica da recarga (Bakhmatov *et al.*, 2014). Esse tipo de integração entre porosidade da matriz e condutividade das fraturas garante a manutenção dos níveis piezométricos mesmo em períodos prolongados de estiagem.

De acordo com o Zoneamento Ecológico-Econômico do DF (ZEE-DF, 2020) e os mapas hidrogeológicos da CPRM (2010), mais de 70% da área de ocorrência do Subsistema R₃/Q₃ se encontra em zonas de alta ou média prioridade para conservação hídrica. Isso ressalta a necessidade de ações para proteger as áreas de recarga, que incluem: delimitação de zonas de proteção de mananciais subterrâneos, controle da impermeabilização do solo e recuperação de áreas degradadas.

Dessa forma, a consideração da existência e viabilidade do modelo de dupla porosidade modifica significativamente as estimativas de disponibilidade hídrica, de forma a ampliar a reserva explotável do aquífero. Essa nova visão permite maior segurança no planejamento do uso sustentável das águas subterrâneas, desde que acompanhada por monitoramento, regulação e controle da ocupação territorial compatíveis com a dinâmica dos sistemas aquíferos (ADASA, 2015; ZEE-DF, 2020).

5.4.1 Diferenças no Processo de Recarga entre os Modelos Fraturado e de Dupla Porosidade no Subsistema Aquífero R₃/Q₃

A forma como a recarga se processa no Sistema Aquífero R₃/Q₃ varia substancialmente de acordo com o modelo hidrogeológico adotado para sua interpretação. A concepção clássica como um aquífero fraturado difere de forma marcante do comportamento observado e previsto quando o sistema é compreendido como um aquífero de dupla porosidade, com implicações diretas na eficiência da recarga, no armazenamento e na resposta do sistema às pressões antrópicas e climáticas (Figura 5.5).

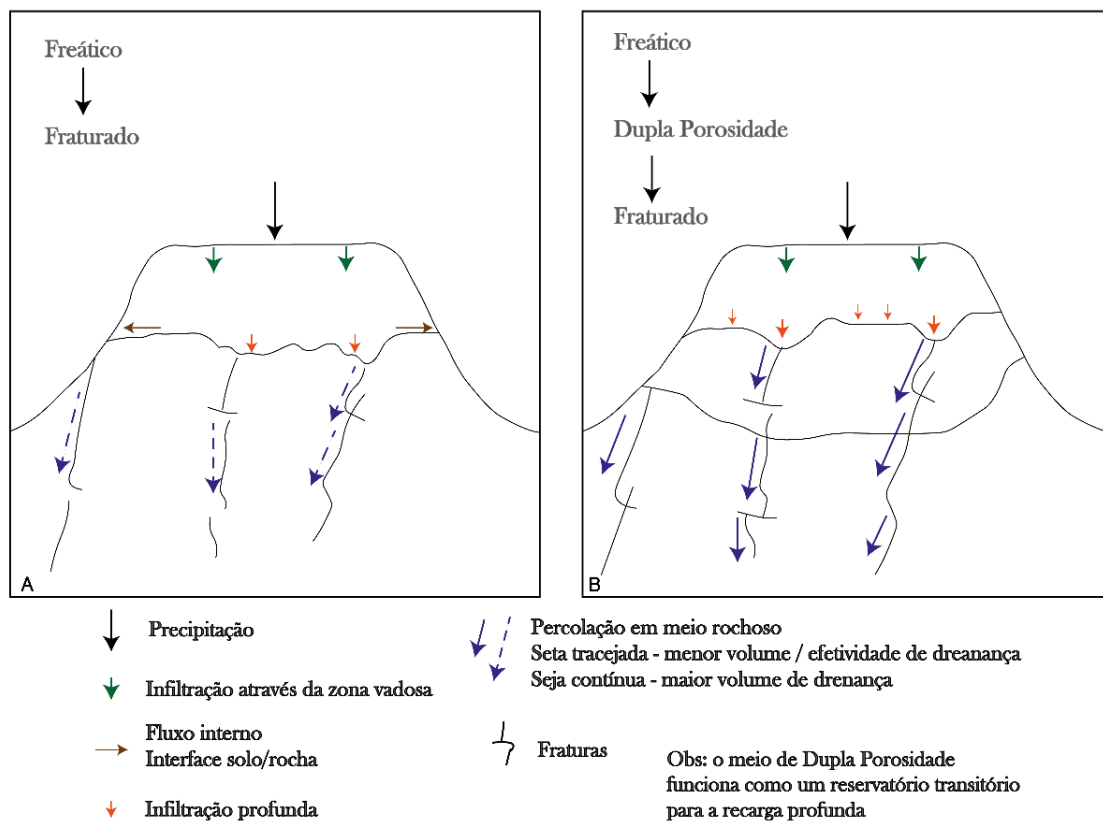


Figura 5.5 - Comparação esquemática entre os mecanismos de recarga no Subsistema Aquífero R₃/Q₃ conforme os modelos fraturado e de dupla porosidade, com ênfase nas diferenças de intensidade, distribuição e tipo de fluxo. **(A)** No modelo tradicionalmente classificado como aquífero fraturado, a recarga é predominantemente pontual e ocorre quase exclusivamente através de fraturas abertas conectadas diretamente à superfície. As setas horizontais amarronzadas indicam o *interflow*, reflexo da impermeabilidade da rocha fraturada que diminui o fluxo hídrico do aquífero fraturado. As setas azuis finas e localizadas representam o fluxo concentrado e rápido pelas fraturas verticais, enquanto a matriz atua apenas como meio de suporte, sem armazenamento efetivo. A baixa espessura da zona de alteração e a limitada conectividade entre fraturas reduzem a capacidade de infiltração e a eficiência do armazenamento. **(B)** No modelo de dupla porosidade a recarga é difusa, vertical e progressiva. A água se armazena temporariamente na matriz porosa, sendo liberada gradualmente para as fraturas profundas, que funcionam como condutos preferenciais. As setas de diferentes espessuras e tonalidades indicam a multiplicidade dos caminhos de fluxo e a variabilidade quantitativa de percolação entre os domínios poroso e fraturado.

No modelo fraturado, a recarga ocorre prioritariamente de forma pontual e preferencial, restrita à percolação direta por fraturas expostas e conectadas. A matriz rochosa, neste caso, é impermeável e o fluxo de água subterrânea depende exclusivamente da conectividade, abertura e continuidade das fraturas. Essa condição torna o processo de recarga condicionado à variabilidade espacial das estruturas geológicas e à cobertura superficial, com áreas densamente fraturadas que favorecem a recarga e outras funcionam como barreiras hidráulicas. A ausência de um meio poroso intergranular funcional significa que não há armazenamento intermediário significativo - a água infiltra, atinge as fraturas ativas e escoar rapidamente ou permanece estagnada se não houver conexão com o aquífero freático sobreposto.

Por outro lado, no modelo de dupla porosidade, a recarga se dá de maneira escalonada, com importante participação da porosidade matricial como compartimento de armazenamento e transferência. Nessa configuração, a água infiltrada nas zonas de topo, caracterizadas por solos espessos e baixa declividade, é inicialmente armazenada no regolito que possui porosidade efetiva muito superior aos valores típicos das fraturas isoladas. Parte da água percola lentamente até as fraturas mais profundas, funcionando como um sistema bifásico, com escoamento rápido pelas fraturas e liberação lenta da matriz para o sistema fraturado (Moench, 1995).

Uma das diferenças mais marcantes entre os modelos está na ocorrência de fluxo interno (fluxo lateral subsuperficial). No modelo fraturado, a ausência de um gradiente poroso entre o regolito e as fraturas mais profundas favorece perdas por escoamento lateral antes que a água chegue à zona saturada, especialmente em encostas e áreas com menor cobertura de solo. Esse *interflow* tende a se manifestar como escoamento superficial retardado, que contribui mais para a vazão de drenagens superficiais do que para a recarga efetiva do aquífero profundo.

No modelo de dupla porosidade, a transição graduada entre o regolito e a matriz alterada da rocha limita o fluxo interno como barreira intermediária ao processo de recarga, alimentando gradualmente as fraturas profundas, com menores perdas. Esse mecanismo confere ao sistema capacidade de armazenamento temporário, especialmente importante em períodos de seca prolongada ou em eventos de chuvas intensas, em que o sistema retém água por mais tempo antes de recarregar o aquífero de forma efetiva.

A resposta da recarga em aquíferos de dupla porosidade é caracteristicamente mais atenuada e persistente, com menores flutuações no nível freático, uma vez que a liberação da água armazenada na matriz ocorre de forma lenta. Isso contrasta com a resposta abrupta e transitória de sistemas exclusivamente fraturados, onde a recarga é rápida, mas pouco sustentada, que resulta em níveis freáticos mais instáveis e sensíveis à variabilidade climática.

Portanto, caracterizar o Subsistema R₃/Q₃ como um sistema de dupla porosidade implica em reconhecer uma maior eficiência no aproveitamento da recarga natural, principalmente em áreas com regolito espesso, de relevo elevado e aplainado, onde o balanço hídrico entre infiltração, interfluxo, armazenamento e descarga subterrânea é mais equilibrado.

Essa distinção é crucial para orientar estratégias de gestão hídrica que considerem a real capacidade de renovação dos aquíferos e os riscos associados ao uso excessivo em cenários de mudança climática e expansão urbana, inclusive para o futuro desenvolvimento de projetos voltados à recarga artificial dos aquíferos.

Tabela 5.1 - Tabela comparativa detalhada entre o modelo clássico de aquífero fraturado e o modelo de aquífero de dupla porosidade, que destaca os principais aspectos hidrogeológicos que diferenciam os dois modelos e suas implicações na recarga do Subsistema Aquífero R₃/Q₃.

Aspecto	Modelo Fraturado	Modelo de Dupla Porosidade
Mecanismo principal de armazenamento	Fraturas abertas e conectadas	Fraturas + matriz porosa alterada
Mecanismo de recarga	Pontual, rápida e dependente da conectividade das fraturas	Difusa, lenta e sustentada ao longo do tempo
Eficiência de infiltração	Baixa, concentrada em zonas com fraturas expostas	Alta, devido à infiltração nos solos e armazenamento no saprolito
Porosidade efetiva típica	1% a 2%	8% a 10% na matriz porosa
Resposta a eventos de chuva	Rápida e transitória	Bifásica: rápida pelas fraturas e lenta pela matriz
Distribuição espacial da recarga	Heterogênea, restrita às áreas fraturadas e expostas	Ampla, abrangendo áreas com regolito espesso e solos porosos
Sensibilidade à cobertura vegetal e uso do solo	Alta - recarga reduzida em áreas impermeabilizadas	Alta - porém mitigada pela capacidade de armazenamento do regolito
Capacidade de armazenamento	Limitada, com liberação rápida da água	Maior, com liberação progressiva ao longo do tempo
Vulnerabilidade à sazonalidade	Alta - com tendência à secagem durante o período seco	Baixa - armazenamento prolongado sustenta níveis freáticos nos períodos secos
Implicações para gestão hídrica	Estimativas conservadoras de disponibilidade; menor explorabilidade	Estimativas mais realistas e otimistas; maior explorabilidade, desde que bem monitorada

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação propôs uma mudança no modelo hidrogeológico conceitual aplicado ao Subsistema Aquífero R₃/Q₃, tradicionalmente classificado como um sistema exclusivamente fraturado (Figura 6.1). A partir de uma abordagem integrada, que reuniu análises petrográficas, estruturais, geofísicas, hidrodinâmicas e interpretação crítica dos dados de campo, foi possível apresentar um modelo conceitual mais realista. Esse modelo considera a presença de um aquífero de dupla porosidade, composto por três compartimentos hidrogeológicos: regolitos porosos, que formam um aquífero intergranular inconsolidado; uma zona de transição com dupla porosidade, composta por rocha alterada e fraturada; e uma zona profunda de rocha sã fraturada, caracterizada como aquífero fraturado.

O trabalho de campo teve papel essencial nesse processo. As atividades incluíram análise de afloramentos, perfis geológicos, descrições estruturais e a leitura direta de seções de eletrorresistividade em diferentes setores de ocorrência do Subsistema R₃/Q₃. A presença de planos de acamamento reativados e o estado de alteração das rochas foram observados em detalhe, evidenciando que a conectividade do aquífero depende não apenas da presença de fraturas abertas, mas também da preservação da matriz porosa remanescente - sobretudo na zona de transição, onde a dissolução de cimentos e o processo intempérico mantêm porosidade efetiva considerável.

As análises petrográficas de lâminas delgadas contribuíram para essa interpretação. Foram observadas texturas intergranulares preservadas em quartzitos submaturos, com porosidade secundária associada à dissolução de cimentos silicosos e presença de feições de alteração química ao redor dos grãos. Em diversos casos, foi observado a existência de microfraturas interconectadas, preenchidas parcialmente por argilominerais ou óxidos de ferro, que caracteriza domínios típicos de dupla porosidade interconectada. Essas observações reforçaram o argumento de que o sistema não pode ser descrito apenas com base na presença de fraturas condutivas, mas requer o reconhecimento do papel ativo da matriz porosa no armazenamento e liberação de água.

No campo hidrodinâmico, os testes de bombeamento foram fundamentais para comprovar o comportamento bifásico do sistema, identificado a partir de curvas de rebaixamento que exibem inflexões. A aplicação de modelos analíticos específicos, como Moench (1984) e Warren e Root (1963), permitiu simular o intercâmbio entre fraturas e matriz, comportamento incompatível com modelos homogêneos de porosidade única.

Tabela 6.1 - Tabela comparativa detalhada entre o modelo clássico de aquífero fraturado e o modelo de aquífero de dupla porosidade, com foco nas particularidades do Subsistema Aquífero R₃/Q₃

Aspecto	Modelo Clássico de Aquífero Fraturado	Modelo de Dupla Porosidade (Aplicado ao Subsistema R ₃ /Q ₃)
Meio condutor dominante	Fraturas abertas ou parcialmente preenchidas.	Planos primários e/ou secundários + porosidade intergranular primária e/ou secundária.
Origem da porosidade	Única – secundária (resultante de processos tectônicos).	Mista – primária (intergranular e plano de acamamento) e secundárias (matriz alterada e fraturamento).
Comportamento hidrodinâmico	Predominantemente anisotrópico e heterogêneo, com dependência da conectividade fraturada.	Mais complexo: fluxo dual com interações entre matriz porosa e aberturas planares.
Conectividade hidráulica	Discreta e dependente da densidade/fratura.	Aumentada por planos de acamamento e conectividade entre poros/fraturas.
Armazenamento de água	Baixo – depende do volume de fraturas.	Moderado a alto – matriz porosa contribui significativamente para o armazenamento.
Transmissividade	Alta em fraturas conectadas; quase nula fora delas.	Moderada – fraturas conduzem, matriz armazena e transmite lentamente.
Exemplo típico	Granitos, gnaisses e basaltos fraturados.	Metassedimentos com ritmitos, quartzitos friáveis e arenitos silicificados.
Tempo de resposta ao bombeamento	Rápido e com grandes variações de nível.	Duplo comportamento: resposta rápida inicial (fraturas) + resposta lenta prolongada (matriz).
Recarregabilidade	Limitada – requer exposição direta de fraturas.	Aumentada – presença de planos de acamamento interconectados favorece infiltração profunda.
Permeabilidade vertical	Dependente da densidade e orientação das fraturas.	Favorecida por fraturas verticais e contato com porosidade intergranular contínua.
Permeabilidade horizontal	Altamente variável, geralmente baixa.	Elevada ao longo dos planos de acamamento reabertos.
Influência da tectônica recente	Reativa fraturas preexistentes, podendo aumentar a condutividade.	Reativa fraturas e planos de acamamento, facilitando a conexão entre domínios porosos.
Evidências em campo (R₃/Q₃)	Fraturas com óxidos de ferro e preenchimentos parciais; poços com nível estático profundo.	Presença de areões friáveis, quartzitos porosos, fraturas oxidadas, ritmitos muito acamadados.
Evolução com o intemperismo	Fraturas superficiais podem se alargar, mas sem ganho de porosidade matricial.	Dissolução de cimentos + ação do intemperismo gera porosidade intergranular secundária.
Zona saturada	Fraturas profundas com saturação descontínua.	Saturação contínua na matriz + fraturas atuando como condutos principais.
Resiliência à superexploração	Baixa – rápido rebaixamento dos níveis piezométricos.	Maior – devido ao efeito de retardo da liberação de água da matriz para as fraturas.
Implicações para modelagem numérica	Modelos discretos baseados em redes de fraturas.	Necessidade de modelos de fluxo duplo.
Gestão e proteção de mananciais	Difícil prever recarga e comportamento de fluxo.	Melhor previsibilidade, maior tempo de residência e proteção contra contaminação rápida.

A reinterpretção do modelo conceitual resultou em implicações diretas na reviso das reservas hídras do subsistema aquífero. Com base na estrutura fraturada tradicional, a reserva renovável foi estimada em 0,1015 km³/ano, a permanente em 1,68 km³ e a explotável em 0,1855 km³/ano. Ao considerar a presença do modelo de dupla porosidade, ajustado à nova estrutura conceitual e à precipitação média atualizada (1.477,4 mm/ano), com recarga efetiva de 10%, as estimativas foram elevadas para 0,1776 km³/ano (Rr), 5,565 km³ (Rp) e 0,7131 km³/ano (Re). Esses novos valores representam incrementos de 231% na reserva permanente e 284% na explotável, que consolida o potencial subestimado do aquífero quando tratado apenas como fraturado.

Finalmente, os resultados obtidos nesta dissertação contribuem para redefinir o papel do Subsistema R₃/Q₃ como aquífero estratégico para o abastecimento sustentável do Distrito Federal. Ao revelar sua real estrutura de armazenamento e fluxo, propõe-se não apenas uma nova base científica para o seu gerenciamento, mas também um novo paradigma para a interpretação dos aquíferos metassedimentares, especialmente aqueles com fácies similares às observadas no Grupo Paranoá. A valorização da matriz porosa, o reconhecimento da existência da dupla porosidade e o papel dos planos de acamamento (além do faturamento), não representam apenas ajustes conceituais, mas avanços técnicos com impacto direto sobre o potencial do aquífero, a segurança hídrica, a outorga racional e a conservação dos recursos subterrâneos.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Com base nas evidências empíricas, análises quantitativas e proposições conceituais desenvolvidas nesta dissertação, propõem-se as seguintes recomendações para a gestão e aprofundamento do conhecimento sobre o Subsistema Aquífero R₃/Q₃:

- Reenquadramento institucional e técnico do Aquífero R₃/Q₃
Atualizar o enquadramento oficial do aquífero junto aos órgãos gestores (ADASA, ANA, SEMA/DF), reconhecer sua estrutura de dupla porosidade e incorporar os parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais revisados nos instrumentos de outorga, enquadramento e alocação de recursos hídricos.
- Estudos laboratoriais complementares
Realizar ensaios de porosidade e permeabilidade em amostras rochosas por meio de equipamentos como porosímetros e permeômetros, com diferentes graus de alteração e tipos litológicos.
- Testes de bombeamento com padrão técnico elevado

Incentivar a realização de testes de bombeamento com instrumentação adequada, utilizando poços de observação independentes do poço de bombeamento. Esses ensaios devem ser interpretados com modelos compatíveis com sistemas de dupla porosidade, como Moench (1984) e Warren e Root (1963).

- Integração sistemática dos dados de ensaios

Tratar e integrar os dados históricos e atuais de testes de bombeamento em banco de dados georreferenciado. Aplicar análises estatísticas para definir faixas de variabilidade de condutividade hidráulica e transmissividade e considerar as diferentes zonas do aquífero.

- Monitoramento piezométrico de longo prazo

Instalar e operar poços de monitoramento nas áreas críticas e de maior exploração do Aquífero R₃/Q₃, com registros contínuos por ao menos 5 anos. Isso permitirá análises temporais de resposta ao bombeamento e à recarga natural, essenciais para avaliar a sustentabilidade do uso.

- Reclassificação de aquíferos similares

Estender a abordagem de dupla porosidade a outros aquíferos (como o Subsistema S/A, por exemplo), especialmente em regiões com características litológicas, estruturais e padrões de relevo semelhantes.

- Desenvolvimento de modelagens numéricas tridimensionais

Criar modelos numéricos com base em dados integrados (perfil construtivo, resistividade elétrica, curvas de rebaixamento e testes laboratoriais) para simular cenários de exploração, recarga e contaminação, em apoio a políticas públicas adaptativas.

- Educação ambiental e regulamentação de poços privados

Estimular programas de regularização de poços não outorgados e educação comunitária sobre o uso racional da água subterrânea, integrando-os a um sistema distrital de informação hidrogeológica.

- Estudos isotópicos e geoquímicos das águas

Investir em estudos com isótopos estáveis e radiogênicos, além de elementos traços para caracterizar o tempo de residência da água, a contribuição entre domínios aquíferos e avaliar o grau de vulnerabilidade das zonas de recarga.

- Aplicação de critérios específicos de outorga para sistemas mistos

Desenvolver diretrizes próprias para a concessão de uso da água subterrânea em aquíferos de dupla porosidade, com base na interação entre os domínios e na variabilidade espacial de armazenamento e transmissão de água.

REFERÊNCIAS

- ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. *Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo*. São Paulo: ABGE, 1996. (Boletim, n. 4). 15 p.
- ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. *Diagnóstico da situação dos aquíferos do Distrito Federal*. Brasília: ADASA, 2015.
- ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. *Outorga de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal*. Brasília: ADASA, 2007.
- ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Resolução n. 16, de 18 de julho de 2018. Dispõe sobre critérios e procedimentos para outorga do uso de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Brasília, 2018.
- ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. *Resumo teórico e prático para testes de aquíferos na zona saturada e não saturada: ensaios de infiltração in situ, slug test e testes de bombeamento*. Brasília, 2016. 5 p.
- AIFANTIS, E. C. The physics of plastic deformation. *International Journal of Plasticity*, v. 3, n. 3, p. 211-247, 1987.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 349-364, 197
- ALMEIDA, F. F. M. Observações sobre o Pré-Cambriano da região central do Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 21. 1967, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: SBG, 1967. p. 19-22.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 7. 1987, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: SBG, 1987. p. 363-392.
- ALTINÖRS, A.; ÖNDER, H. A double-porosity model for a fractured aquifer with non-Darcian flow in fractures. *Hydrological Sciences Journal*, v. 53, n. 4, p. 868-882, 2010.
- AMORE, L. Fundamentos para uso e proteção das águas subterrâneas do Distrito Federal. 1994. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água - panorama nacional*. Brasília: ANA, 2010. v. 1, 34 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: informe anual*. Brasília: ANA, 2021.
- ARRAES, T.M. *et al.* Hidroquímica das águas subterrâneas profundas do Distrito Federal. Brasília: Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 2005. 16 p. (Relatório de Estágio Supervisionado).
- BAKHMATOV, I. N.; PEREIRA, A. J.; COUTINHO, A. P. *Hidrogeologia aplicada à gestão das águas subterrâneas em áreas cristalinas e fraturadas do Brasil Central*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 44, n. 3, p. 435-450, 2014.
- BAPTISTA, G. M. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, p. 1-15, 1997.
- BARENBLATT, G. I.; ZHELTOV, I. P.; KOCHINA, I. N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, v. 24, n. 5, p. 1286-1303, 1960.
- BARROS, J.G.C. Geologia e hidrogeologia do Distrito Federal. In: GDF; CAESB. *Inventário*

- hidrogeológico do Distrito Federal. Brasília: GDF/CAESB, 1987. p. 79-330.
- BARROS, J.G.C. Caracterização geológica e hidrogeológica do Distrito Federal. In: PINTO, M. N. (org.). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. 2. ed. Brasília: Editora UnB/SEMATEC, 1994. p. 265–283.
- BASAK, P. Non-penetrating well in a semi-infinite medium with non-linear flow. *Journal of Hydrology*, v. 33, p. 375-382, 1977.
- BLESSENT, D.; JØRGENSEN, P.R.; THERRIEN, R. Comparing discrete fracture and continuum models to predict contaminant transport in fractured porous media. *Groundwater*, v. 52, n. 1, p. 84-95, 2014.
- BRAZIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM); Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Províncias hidrogeológicas do Brasil. Brasília: DNPM/CPRM, 1983.
- BRAUN, O.P.G. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, p. 3-39, 1971.
- BOULTON, N. S. Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 26, n. 3, p. 469-482, 1963.
- BOULTON, N. S. The drawdown of the water table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined aquifer. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 3, p. 564-579, 1954.
- BOUWER, H.; RICE, R.C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, Washington, v. 12, n. 3, p. 423-428, 1976.
- CADAMURO, A.L.M. Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- CADAMURO, A.L.M. *et al.* Artificial recharge in fractured rocks? An example from the Federal District of Brazil for the sustainability of the system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUNDWATER, 4. 2002, Adelaide. Proceedings [...]. Adelaide: ISAR, 2002. v. 1, p. 56-60.
- CADAMURO, A.L.M.; CAMPOS, J.E.G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2005.
- CAMPOS, J.E.G.; FREITAS-SILVA, F.H. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, 1998. v. 4. 85 p. (Relatório Técnico).
- CAMPOS, J.E.G.; FREITAS-SILVA, F.H. Arcabouço hidrogeológico do Distrito Federal. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 12. 1999, Brasília. Anais [...]. Brasília: SBG, 1999. p. 113.
- CAMPOS, J.E.G.; TROGER, U. Groundwater occurrence in hard rocks in the Federal District of Brasília: a sustainable supply? In: SILILO, O. (ed.). Groundwater: past achievements and future challenges. Proceedings of the XXX IAH Congress. Cape Town: Balkema, 2000. p. 109–113.
- CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 41–48, 2004.
- CAMPOS, J.E.G. Relatório do meio físico e biótico. In: *Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal - ZEE*. Brasília: GDF, 2011. Cap. III.

- CAMPOS, J.E.G. *Meio físico do Distrito Federal*. Brasília: SEDAHB/GDF, 2012. (Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal, Subproduto 3.1). 172 p.
- CAMPOS, J. E. G. *et al.* Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 43, n. 3, p. 461-476, 2013.
- CAMPOS, J.E.G.; XAVIER, T.O.; FREITAS-SILVA, F.H. Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal. *Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 203-219, 2016.
- CARMELO, A.C. *Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas*. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 179 p.
- CASTANHEIRA, D. *Enquadramento dos corpos hídricos subterrâneos do Distrito Federal: parâmetros hidrogeológicos e ambientais*. 2016. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 78p.
- COIMBRA, A.R.S.R. Balanço hídrico preliminar do Distrito Federal. In: *Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal*. Brasília: GDF/CAESB, 1987. p. 50-78.
- CODEPLAN - Companhia do Desenvolvimento do Planalto Central. Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios - PDAD 2021: principais resultados. Brasília, 2022.
- CODEPLAN - Companhia do Desenvolvimento do Planalto Central. Classificação climática de Köppen do Distrito Federal. Brasília: CODEPLAN, 1984.
- COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 27, n. 4, p. 526-534, 1946.
- COSTA, W. D. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. *Revista Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-12, 1998.
- CUSTODIO, E. Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 254-277, 2002.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 2. ed. Brasília: CPRM, 2000.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Mapa hidrogeológico do Distrito Federal*. Brasília: CPRM, 2010.
- DASHTI, Z.; NAKHAEI, M.; VADIATI, M.; KARAMI, G. H.; KISI, O. A literature review on pumping test analysis (2000-2022). *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 239, 2023.
- DUGUID, J.O.; LEE, S.M. Flow in fractured porous media. *Water Resources Research*, v. 13, n. 3, p. 558-566, 1977.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Mapa de solos do Distrito Federal (1:100.000)*. Brasília: EMBRAPA-EPI – Serviço de Produção de Informação, 1978.
- FARIA, A. *Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João d'Aliança -Alto Paraíso de Goiás*. 1995. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1979. 604p.
- FREITAS-SILVA, F.H. *Enquadramento litoestratigráfico e estrutural do depósito de ouro do Morro do Ouro, Paracatu - MG*. 1990. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 151p.
- FREITAS-SILVA, F.H. *Metalogênese do depósito do Morro do Ouro, Paracatu - MG*. 1996. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 338p.
- FREITAS-SILVA, F.H.; CAMPOS, J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: *Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal - Parte I*. Brasília:

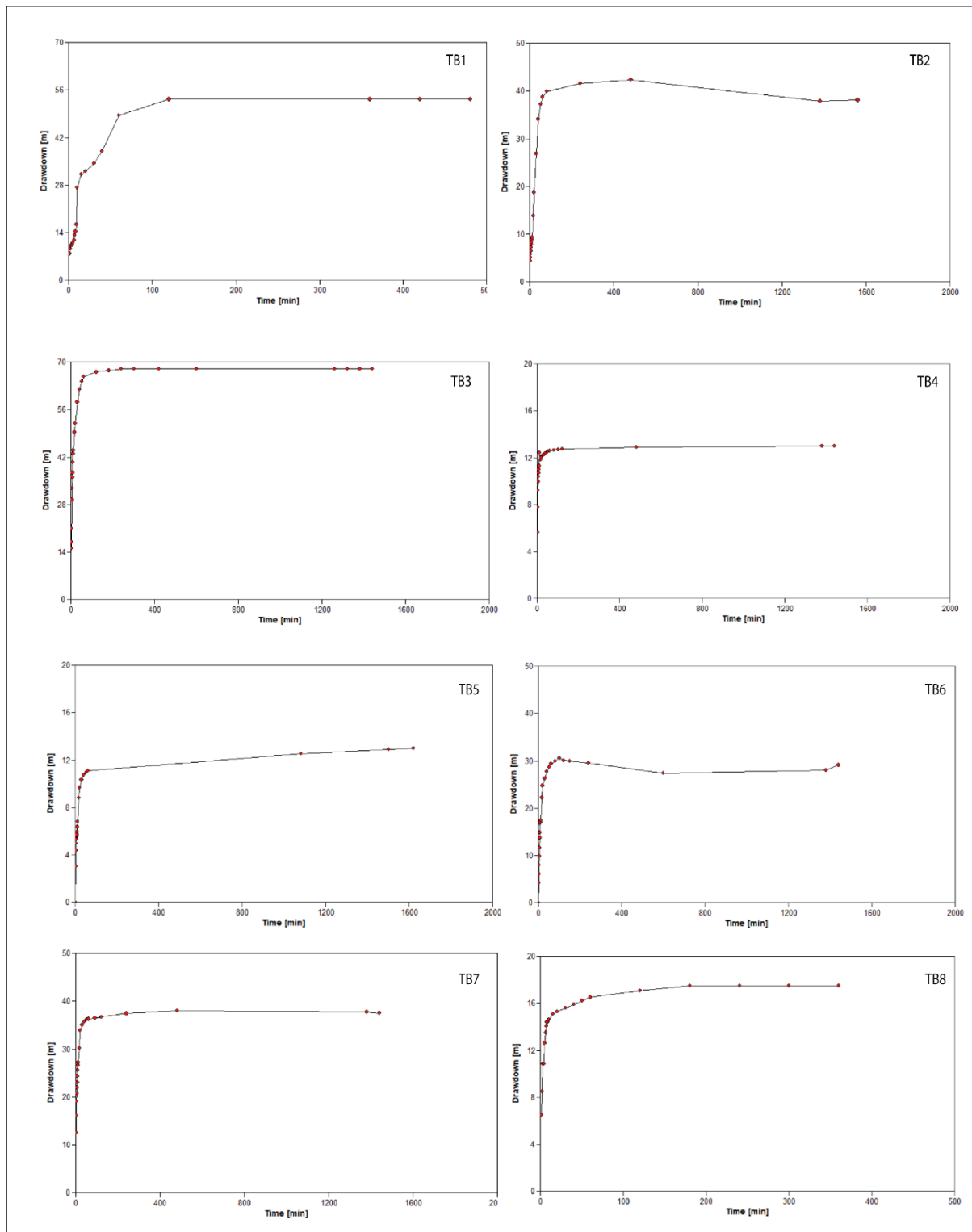
- IEMA/SEMATEC, 1998. 86 p. Relatório inédito.
- FOSSEN, Haakon. Geologia estrutural. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- FOSTER, S.; CHILTON, J. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 358, p. 1957–1972, 2003.
- FOURIER, Jean-Baptiste Joseph. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Firmin Didot, 1822.
- GONÇALVES, T.D. *Geoprocessamento como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região do Distrito Federal*. 2007. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 225p.
- GONÇALVES, T.D. *Sistema de informação geográfica para o gerenciamento integrado dos recursos hídricos no Distrito Federal*. 2012. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 112 p.
- HIRATA, R. *et al.* *As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil*. 2019. 13p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022: resultados preliminares. Brasília: IBGE, 2023.
- JACOB, C. E. The flow of water in an elastic artesian aquifer. *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 21, n. 2, p. 574-586, 1940.
- JOKO, C.T. Hidrogeologia da região de São Sebastião - DF: implicações para a gestão do sistema de abastecimento de água. 2002. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 158p.
- KHALILI, N.; VALLIAPPAN, S. A fully coupled constitutive model for thermo-hydro-mechanical analysis in elastic media with double porosity. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 24, 2003.
- KÖPPEN, W. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.
- KRUSEMAN, G.P.; DE RIDDER, N.A. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Wageningen: ILRI, 1994.
- LOMBARDI-NETO, F. *et al.* Nova abordagem para o cálculo de espaçamento entre terraços. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, 1989, Campinas. *Anais...* Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 99-124.
- LOUSADA, E.O. *Estudos geológicos e geofísicos aplicados à locação de poços tubulares profundos em aquíferos fraturados na região do Distrito Federal*. 1999. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 107 p.
- LOUSADA, E.O.; CAMPOS, J.E.G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 3, p. 407-414, 2005.
- LOUSADA, E.O. *Estudos hidrogeológicos e isotópicos no Distrito Federal: modelos conceituais de fluxo*. 2005. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 124 p.
- MAIO, C.R. Alterações ambientais no Distrito Federal, baseadas na geomorfologia dinâmica. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 48, n. 3, p. 259-284, 1986.
- MARTINS, E.S.; BAPTISTA, G.M.M. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: IEMA; SEMATEC; UnB. *Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB,

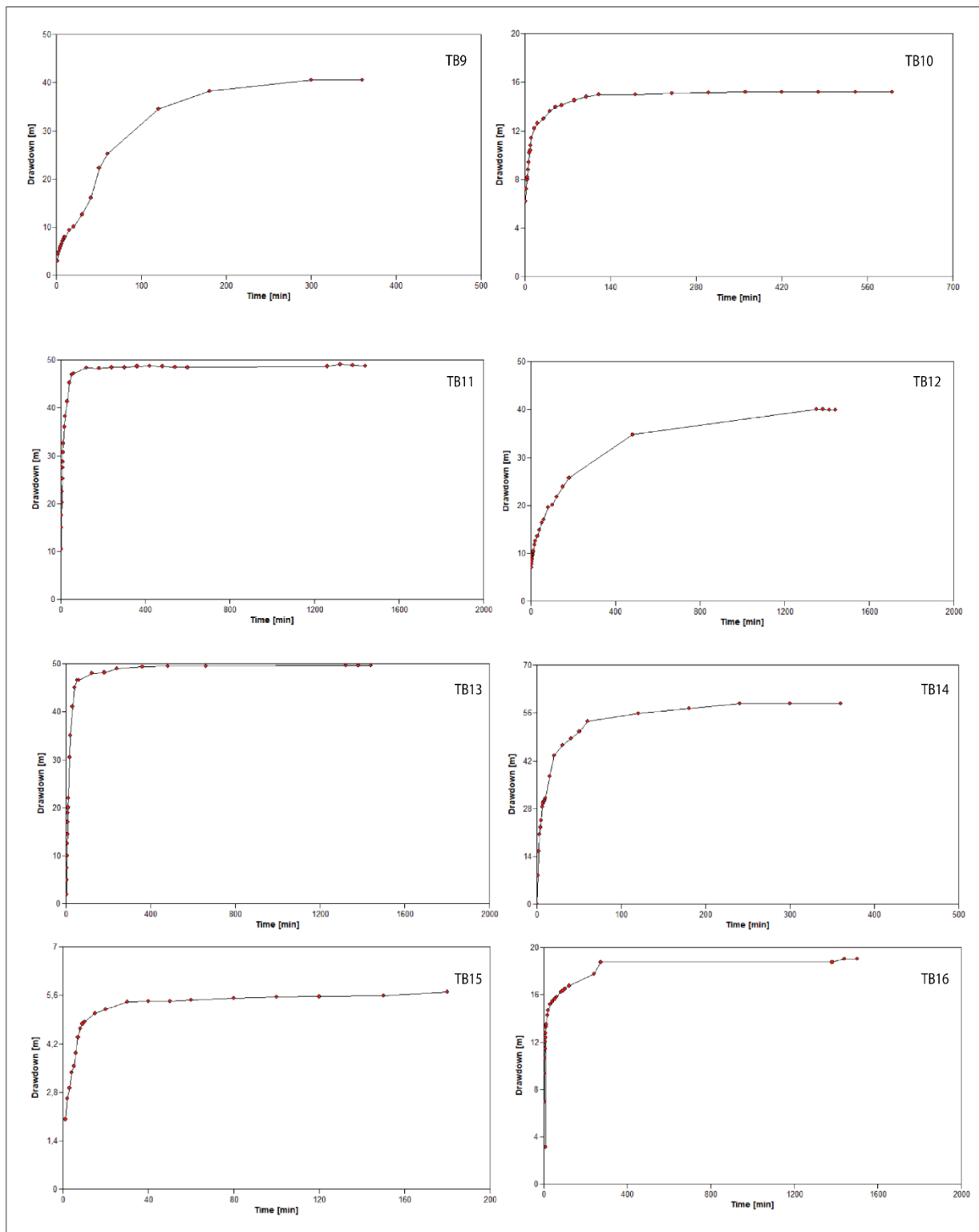
1998. v. 1, parte II. 53 p.
- MENDONÇA, A.F. Caracterização da erosão subterrânea nos aquíferos porosos do Distrito Federal. Anexo 3a: Reservas de água de superfície do Parque Nacional de Brasília. 1993. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília.
- MIGUEL, R. C. A. Caracterização dos aquíferos da região da Mina Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero e propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 2023.
- MOENCH, A.F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, v. 20, n. 7, 1984.
- MORAES, L.L. Estudo do rebaixamento de lagoas cársticas no Distrito Federal e entorno: a interação hidráulica entre águas subterrâneas e superficiais. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
- NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996.
- NEUMAN, S. P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, v. 8, n. 4, p. 1031-1045, 1972.
- NEUMAN, S.P. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal*, v. 13, p. 124-147, 2005.
- NOVAES PINTO, M.; CARNEIRO, P.J.R. Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 4., 1984, São Paulo. *Anais...* São Paulo: [s.n.], 1984. Livro II, v. 2, p. 190-213.
- NOVAES PINTO, M. Caracterização morfológica do curso superior do Rio São Bartolomeu - Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 48, n. 4, p. 377-397, 1986a.
- NOVAES PINTO, M. Unidades geomorfológicas do Distrito Federal. *Geografia*, v. 11, n. 21, p. 97-109, 1986b.
- NOVAES PINTO, M. Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 49, n. 2, p. 9-26, 1987.
- NOVAES PINTO, M. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (org.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2. ed. Brasília: Editora UnB, 1994a. p. 285-320.
- NOVAES PINTO, M. Paisagens do cerrado no Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (org.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2. ed. Brasília: Editora UnB, 1994b. p. 511-542.
- NUNES, M.D.X. Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- OLIVEIRA, T.X. Registros neotectônicos no Distrito Federal: implicações para o condicionamento dos recursos hídricos subterrâneos. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- PAULA, T.L.F.; CAMPOS, J.E.G. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 11-24, 2016.
- QUEIROZ, M.L. Nascentes, veredas e áreas úmidas: revisão conceitual e metodologia para caracterização e determinação: estudo de caso na Estação Ecológica de Águas Emendadas - Distrito Federal. 2015. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de

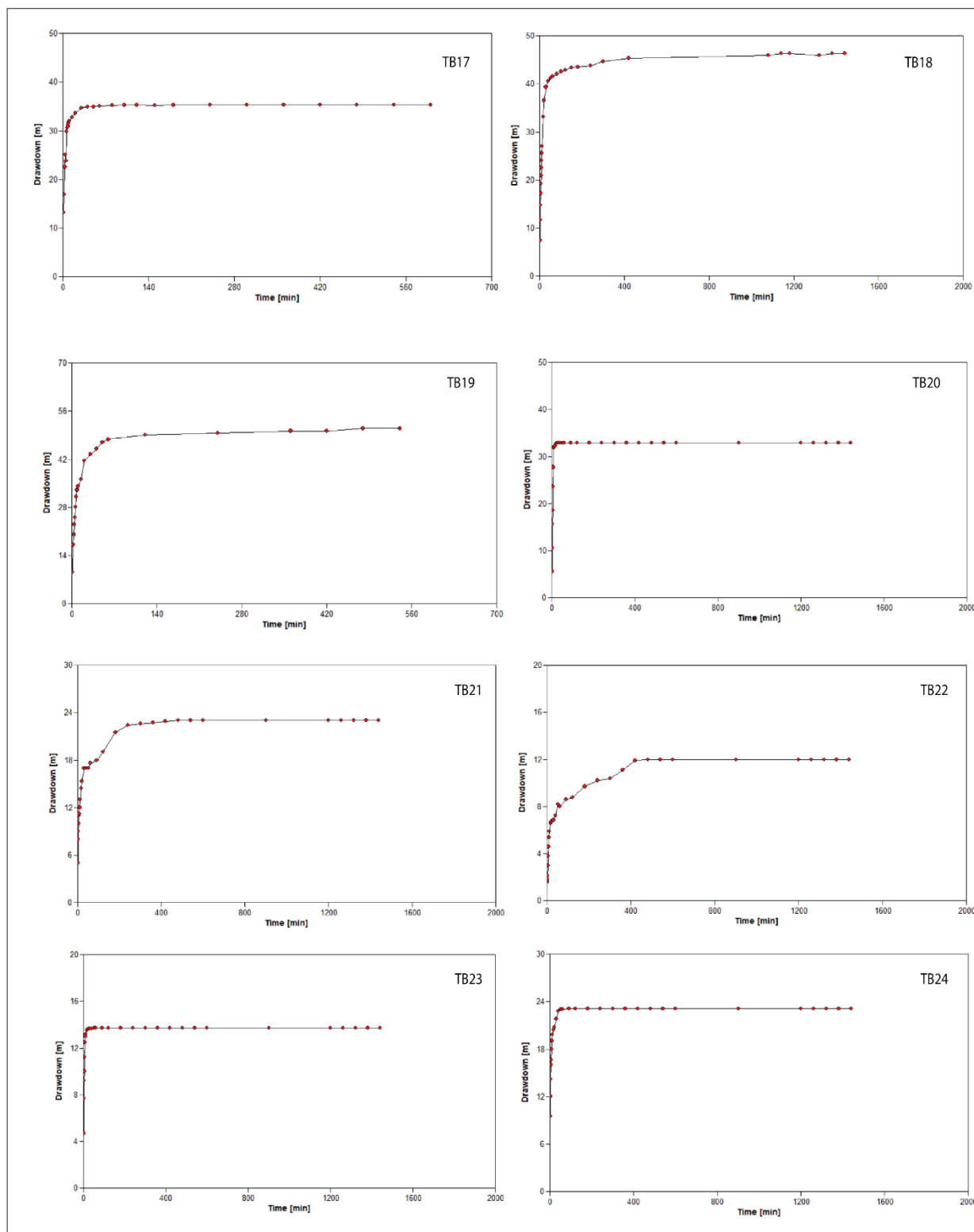
- Brasília, Brasília, 2015.
- RAMSAY, J.G. Interference patterns produced by the superposition of folds of similar types. *Journal of Geology*, v. 70, p. 466-481, 1962.
- RAMSAY, J.G.; HUBER, M.I. *The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain Analysis*. New York: Academic Press, 1983. 307 p.
- RAMSAY, J. G. *Folding and fracturing of rocks*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1967. 568p.
- RIBEIRO, C.B.M. et al. *Águas subterrâneas do Distrito Federal: avaliação, monitoramento e gestão integrada*. Brasília: UnB/ADASA, 2015.
- ROMANO, O.; ROSAS, J.G.C. Água subterrânea para fins de abastecimento de água e irrigação no Distrito Federal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24. 1970, Brasília. *Anais [...]* Brasília: SBG, 1970. p. 313-333.
- SEVERGNINI, B.R.; BORTOLIN, T.A.; REGINATO, P.A.R. Avaliação do Sistema Aquífero Serra Geral com um modelo de dupla porosidade baseado na análise de testes de bombeamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 27, e23, 2021.
- SINGHAL, B.B.S.; GUPTA, R.P. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2010.
- SOUZA, M.M. Determinação das áreas de recarga para a gestão do sistema aquífero fissurocárstico da região de São Sebastião/DF. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- SOUZA, M.T. Fundamentos para gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- TASSINARI, C.C.G.; SIGA JUNIOR, O.; TEIXEIRA, W. Panorama geocronológico do Centro-Oeste brasileiro: soluções, problemáticas e sugestões. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, [s.l.], 1981, Goiânia. *Atas...* Goiânia: SGB-GO, 1981. p. 93-116.
- THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 16, p. 519-524, 1935.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. Water Science School: water quality. Reston, VA: USGS, 2019.
- WARREN, J.E.; ROOT, P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, p. 245-255, 1963.
- WILSON, J.; AIFANTIS, E.C. On the theory of consolidation with double porosity. *International Journal of Engineering Science*, v. 20, n. 8, p. 1009-1035, 1982.
- WONG, H.; LEO, C. J.; PEREIRA, J. M.; DUBUJET, P. Sedimentation-consolidation of a double porosity material. *Computers and Geotechnics*, v. 34, n. 6, p. 532-538, nov. 2007
- ZEE-DF - Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. *Relatório técnico de caracterização hidrogeológica*. Brasília: SEMA-DF, 2020.
- ZOBY, J.L.G. Hidrogeologia de Brasília - DF: Bacia do Ribeirão Sobradinho. 1999. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Inédita.

APÊNDICES

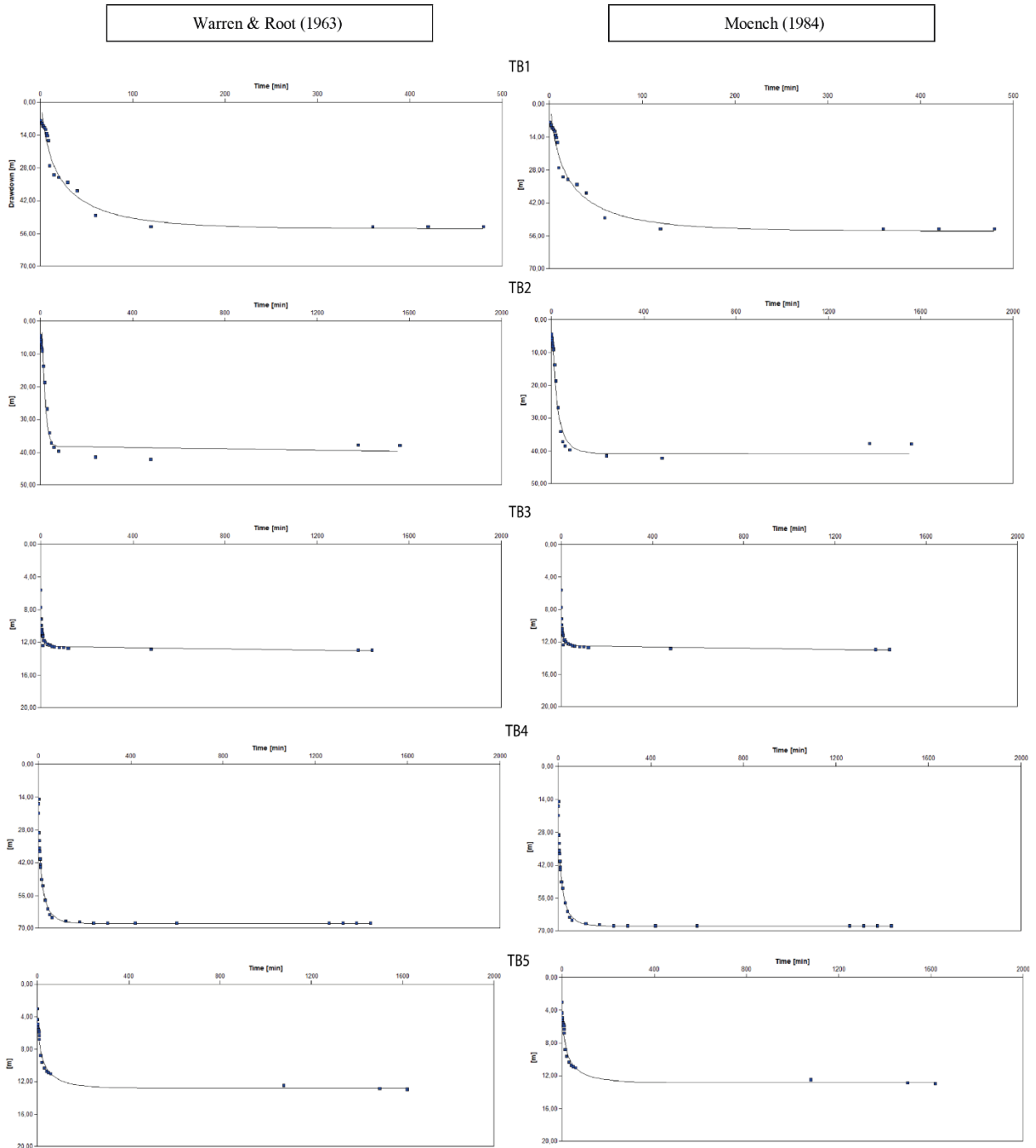
1. Curvas de rebaixamento do TB1 ao TB24.

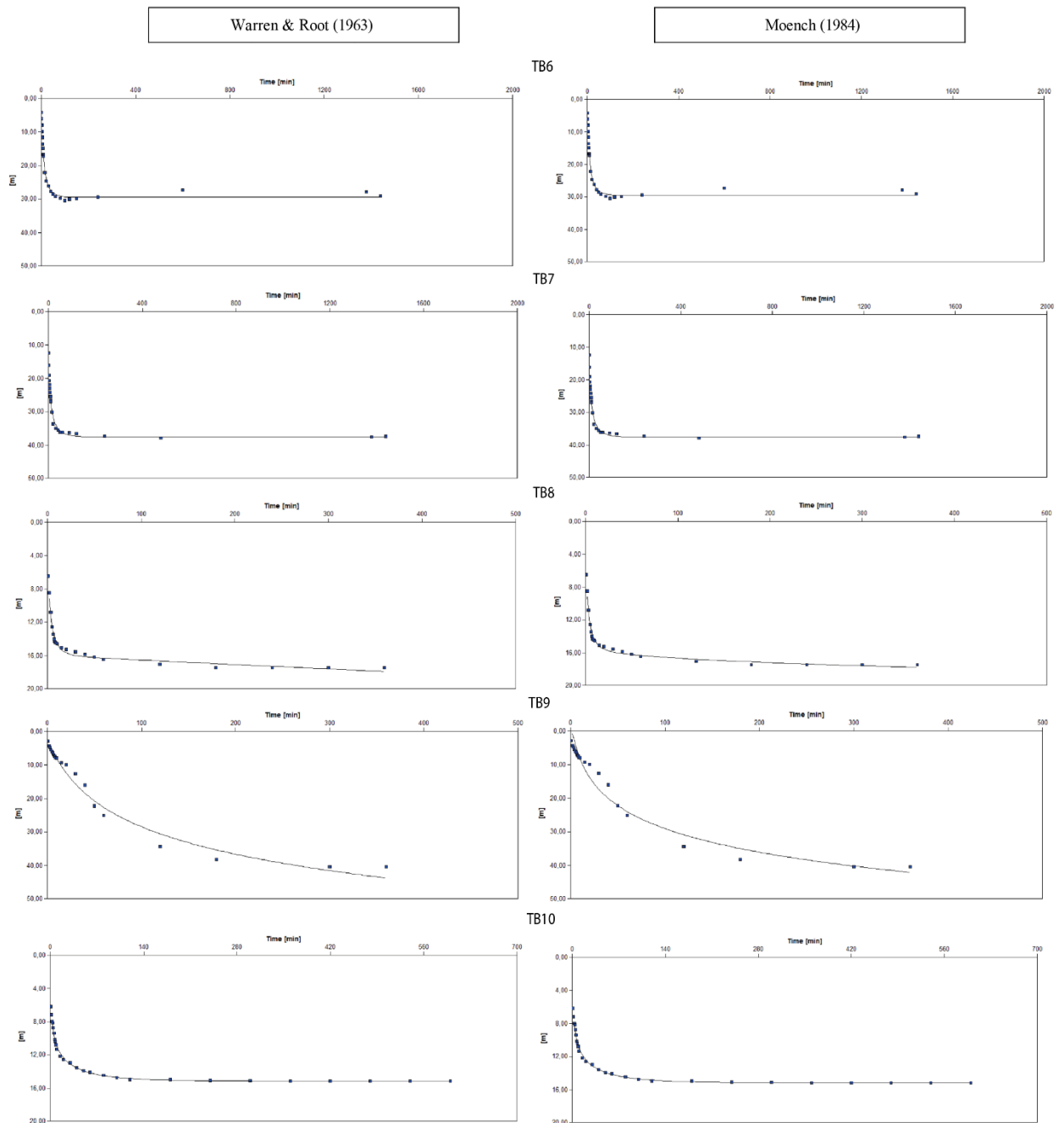


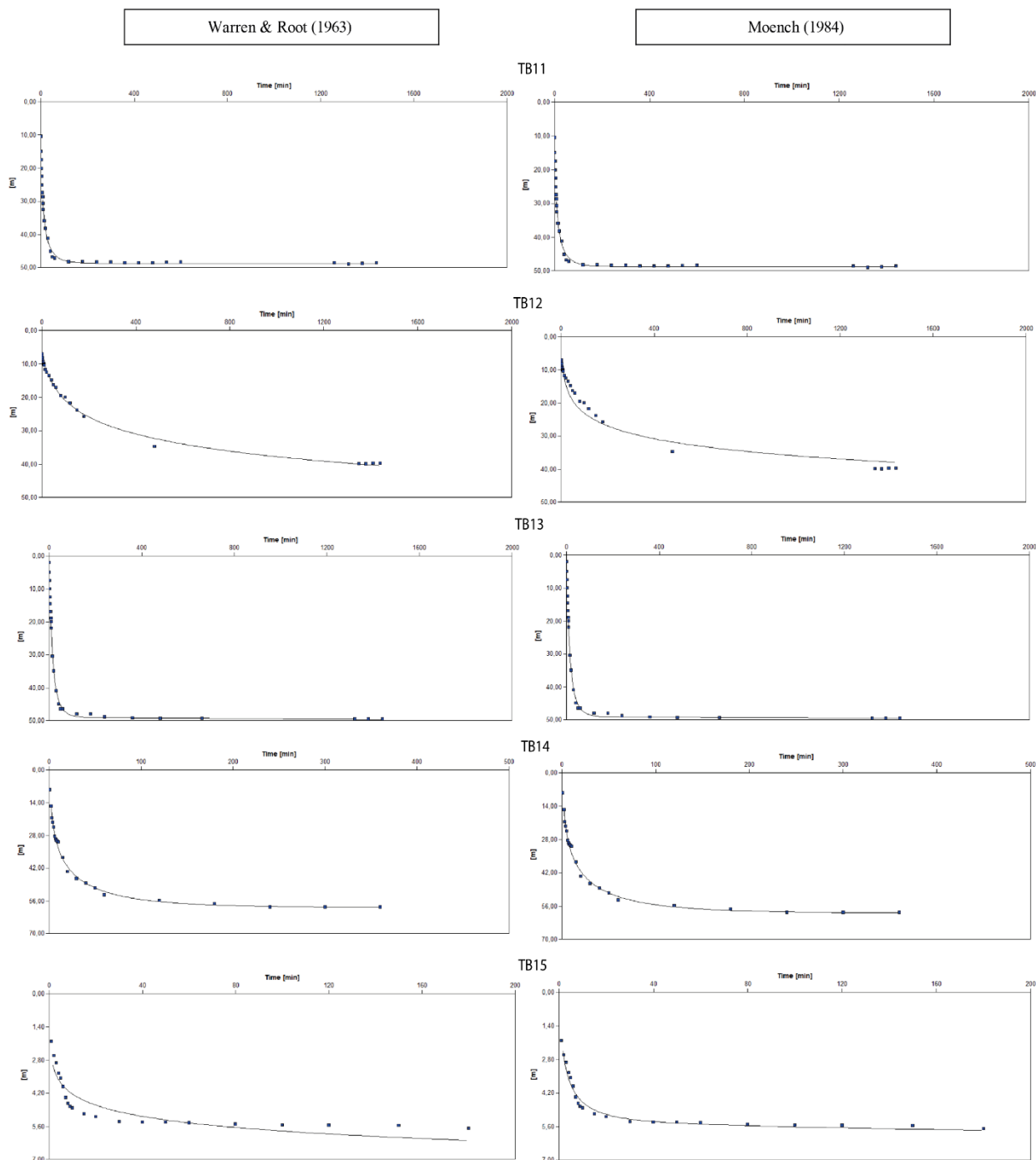




2. Curvas de rebaixamento do TB1 ao TB24, com seus respectivos ajustes para os métodos de Warren e Root (1963) e Moench (1984).

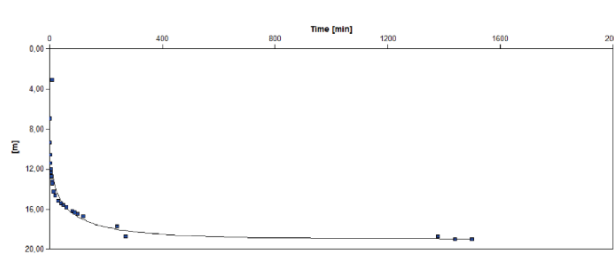




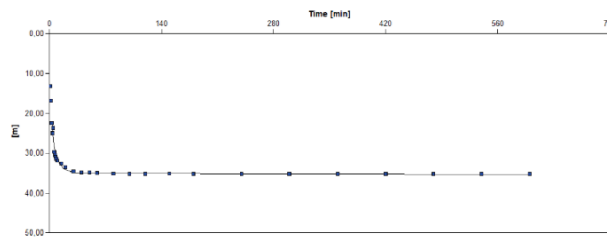
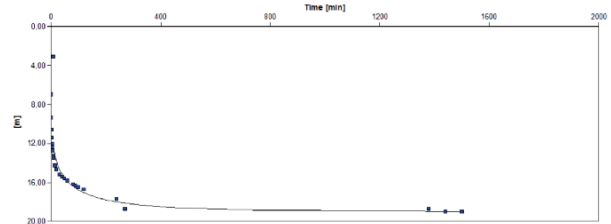


Warren & Root (1963)

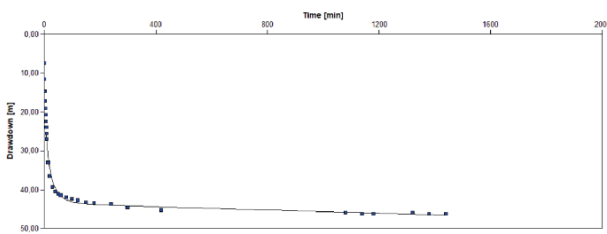
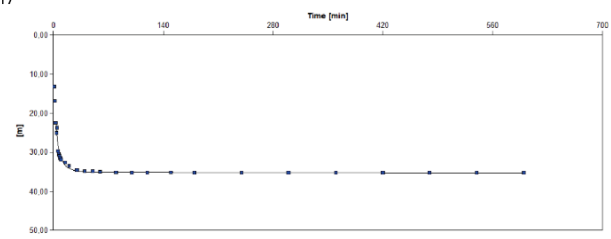
Moench (1984)



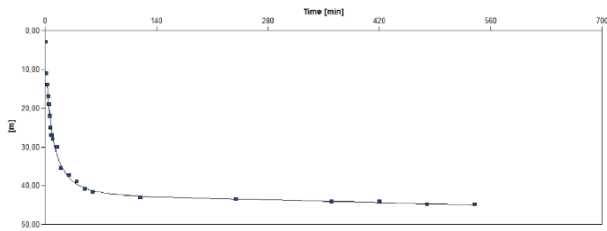
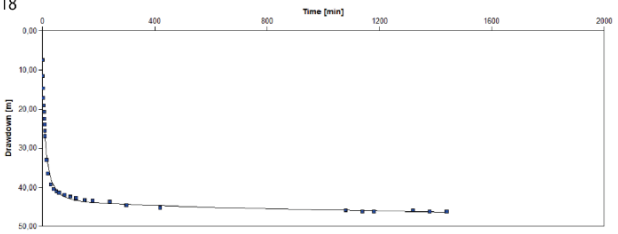
TB16



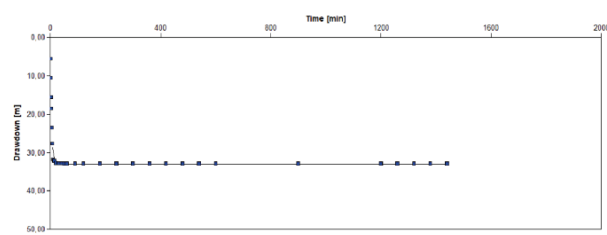
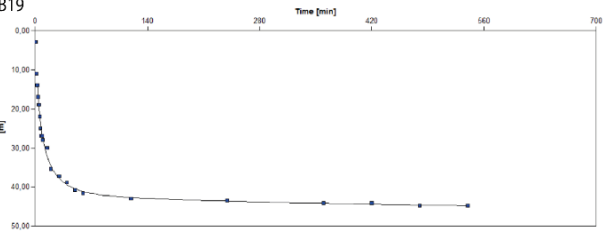
TB17



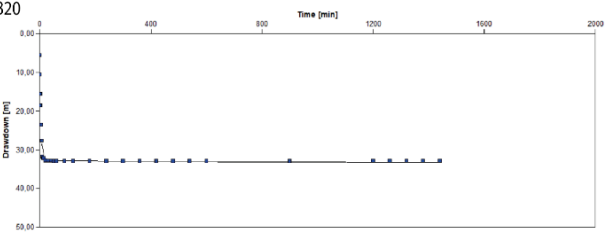
TB18

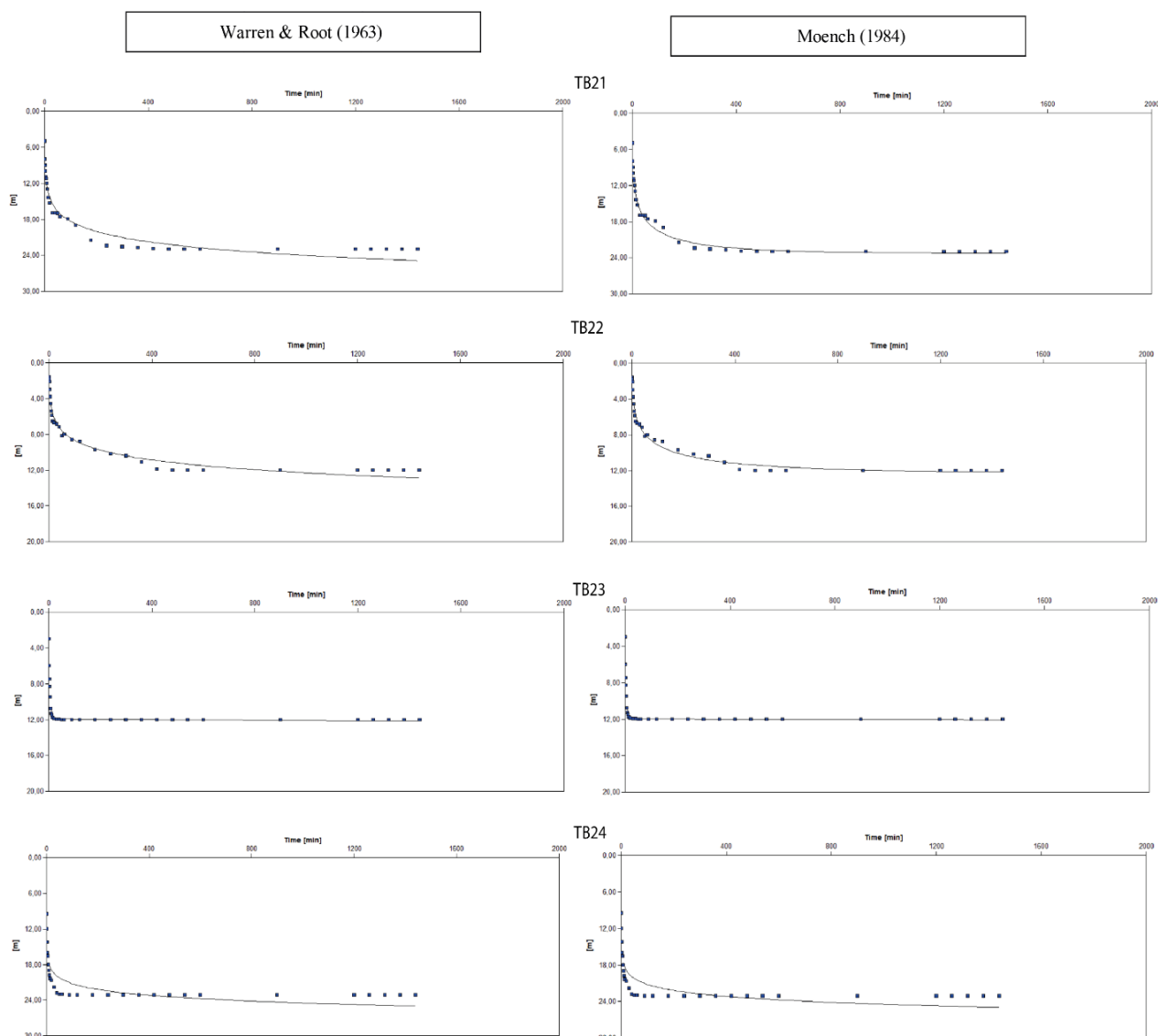


TB19



TB20





3. Perfis litológicos e construtivos dos poços e valores obtidos no AquiferTest para cada teste de bombeamento:

https://drive.google.com/drive/folders/1ggsSXgOfUfVps7yP8_2R4AZgh3JF9nnm?usp=sharing

4. Parâmetros hidrodinâmicos obtidos e calculados para os testes TB1 ao TB24 com os métodos de Warren e Root (1984) e Moench (1963).

	Moench (1984)			Warren e Root (1963)				
Testes	T (m ² /s)	S	K (m/s)	T (m ² /s)	S	K (m/s)	b (m)	Q (m ³ /h)
TB1	9,46 x 10 ⁻⁶	4,55 x 10 ⁻³	9,32 x 10 ⁻⁸	9,47 x 10 ⁻⁶	4,44 x 10 ⁻³	9,33 x 10 ⁻⁸	101,55	7,92
TB2	1,63 x 10 ⁻⁶	2,36 x 10 ⁻³	1,16 x 10 ⁻⁸	1,09 x 10 ⁻⁷	6,48 x 10 ⁻⁴	7,78 x 10 ⁻¹⁰	140,10	2,20
TB3	2,19 x 10 ⁻⁵	7,75 x 10 ⁻³	2,14 x 10 ⁻⁷	2,18 x 10 ⁻⁵	7,80 x 10 ⁻⁴	2,13 x 10 ⁻⁷	102,30	4,00
TB4	5,94 x 10 ⁻⁶	7,14 x 10 ⁻⁴	4,50 x 10 ⁻⁸	5,94 x 10 ⁻⁶	7,14 x 10 ⁻⁴	4,50 x 10 ⁻⁸	132,00	5,00
TB5	5,24 x 10 ⁻⁵	4,72 x 10 ⁻³	1,12 x 10 ⁻⁶	5,25 x 10 ⁻⁵	3,72 x 10 ⁻³	1,12 x 10 ⁻⁶	46,70	6,00
TB6	2,09 x 10 ⁻⁵	6,46 x 10 ⁻³	1,08 x 10 ⁻⁷	2,09 x 10 ⁻⁵	6,47 x 10 ⁻³	1,08 x 10 ⁻⁷	194,20	12,37
TB7	8,80 x 10 ⁻⁵	3,62 x 10 ⁻³	7,21 x 10 ⁻⁷	8,81 x 10 ⁻⁵	3,62 x 10 ⁻³	7,22 x 10 ⁻⁷	122,10	12,57
TB8	1,22 x 10 ⁻⁴	7,10 x 10 ⁻³	9,99 x 10 ⁻⁷	1,33 x 10 ⁻⁴	6,87 x 10 ⁻³	1,09 x 10 ⁻⁶	122,10	33,00
TB9	7,35 x 10 ⁻⁶	6,20 x 10 ⁻³	1,52 x 10 ⁻⁷	6,15 x 10 ⁻⁶	6,44 x 10 ⁻⁴	1,27 x 10 ⁻⁷	48,40	3,45
TB10	1,07 x 10 ⁻⁴	1,59 x 10 ⁻³	1,09 x 10 ⁻⁶	1,07 x 10 ⁻⁴	1,58 x 10 ⁻³	1,09 x 10 ⁻⁶	98,10	12,00
TB11	1,19 x 10 ⁻⁵	1,38 x 10 ⁻³	1,49 x 10 ⁻⁷	1,19 x 10 ⁻⁵	1,37 x 10 ⁻³	1,49 x 10 ⁻⁷	79,70	7,20
TB12	2,38 x 10 ⁻⁵	5,11 x 10 ⁻³	1,44 x 10 ⁻⁷	1,79 x 10 ⁻⁵	4,54 x 10 ⁻⁵	1,08 x 10 ⁻⁷	165,70	6,00
TB13	2,40 x 10 ⁻⁶	1,78 x 10 ⁻³	1,76 x 10 ⁻⁸	2,40 x 10 ⁻⁶	1,78 x 10 ⁻³	1,76 x 10 ⁻⁸	136,40	3,30
TB14	1,17 x 10 ⁻⁵	1,30 x 10 ⁻³	1,34 x 10 ⁻⁷	1,17 x 10 ⁻⁵	1,30 x 10 ⁻³	1,34 x 10 ⁻⁷	87,40	7,20
TB15	1,06 x 10 ⁻⁴	5,79 x 10 ⁻³	1,05 x 10 ⁻⁶	2,6 x 10 ⁻⁴	3,30 x 10 ⁻⁴	2,58 x 10 ⁻⁶	100,80	8,00
TB16	1,57 x 10 ⁻⁴	5,81 x 10 ⁻⁴	1,99 x 10 ⁻⁶	1,58 x 10 ⁻⁴	5,75 x 10 ⁻⁴	2,00 x 10 ⁻⁶	78,85	15,00
TB17	1,49 x 10 ⁻⁵	1,03 x 10 ⁻³	9,54 x 10 ⁻⁸	1,05 x 10 ⁻⁵	1,03 x 10 ⁻³	6,72 x 10 ⁻⁸	156,20	9,00
TB18	8,45 x 10 ⁻⁶	1,51 x 10 ⁻³	3,56 x 10 ⁻⁸	8,62 x 10 ⁻⁶	1,50 x 10 ⁻³	3,63 x 10 ⁻⁸	237,30	5,50
TB19	2,08 x 10 ⁻⁵	4,42 x 10 ⁻³	2,07 x 10 ⁻⁷	2,14 x 10 ⁻⁵	4,40 x 10 ⁻³	2,13 x 10 ⁻⁷	100,60	15,23
TB20	6,68 x 10 ⁻⁶	2,19 x 10 ⁻³	3,03 x 10 ⁻⁸	5,65 x 10 ⁻⁶	2,12 x 10 ⁻³	2,56 x 10 ⁻⁸	220,60	10,56
TB21	1,98 x 10 ⁻⁴	5,49 x 10 ⁻³	9,05 x 10 ⁻⁷	2,64 x 10 ⁻⁴	1,37 x 10 ⁻⁵	1,21 x 10 ⁻⁶	218,90	29,30
TB22	4,17 x 10 ⁻⁴	4,18 x 10 ⁻²	1,96 x 10 ⁻⁶	5,05 x 10 ⁻⁴	2,15 x 10 ⁻³	2,38 x 10 ⁻⁶	212,30	36,00
TB23	1,16 x 10 ⁻⁴	1,97 x 10 ⁻²	1,07 x 10 ⁻⁶	1,19 x 10 ⁻⁴	1,96 x 10 ⁻²	1,10 x 10 ⁻⁶	108,50	46,00
TB24	1,73 x 10 ⁻⁴	3,14 x 10 ⁻¹⁰	8,02 x 10 ⁻⁷	1,73 x 10 ⁻⁴	9,25 x 10 ⁻¹⁰	8,02 x 10 ⁻⁷	215,60	11,07

Borda das Chapadas Elevadas								
	Moench (1984)			Warren e Root (1963)				
Testes	T (m ² /s)	S	K (m/s)	T (m ² /s)	S	K (m/s)	b (m)	Q (m ³ /h)
TB3	2,19 x 10 ⁻⁵	7,75 x 10 ⁻³	2,14 x 10 ⁻⁷	2,18 x 10 ⁻⁵	7,80 x 10 ⁻⁴	2,13 x 10 ⁻⁷	102,30	4,00
TB4	5,94 x 10 ⁻⁶	7,14 x 10 ⁻⁴	4,50 x 10 ⁻⁸	5,94 x 10 ⁻⁶	7,14 x 10 ⁻⁴	4,50 x 10 ⁻⁸	132,00	5,00
TB5	5,24 x 10 ⁻⁵	4,72 x 10 ⁻³	1,12 x 10 ⁻⁶	5,25 x 10 ⁻⁵	3,72 x 10 ⁻³	1,12 x 10 ⁻⁶	46,70	6,00
TB6	2,09 x 10 ⁻⁵	6,46 x 10 ⁻³	1,08 x 10 ⁻⁷	2,09 x 10 ⁻⁵	6,47 x 10 ⁻³	1,08 x 10 ⁻⁷	194,20	12,37
TB7	8,80 x 10 ⁻⁵	3,62 x 10 ⁻³	7,21 x 10 ⁻⁷	8,81 x 10 ⁻⁵	3,62 x 10 ⁻³	7,22 x 10 ⁻⁷	122,10	12,57
TB13	2,40 x 10 ⁻⁶	1,78 x 10 ⁻³	1,76 x 10 ⁻⁸	2,40 x 10 ⁻⁶	1,78 x 10 ⁻³	1,76 x 10 ⁻⁸	136,40	3,30
TB14	1,17 x 10 ⁻⁵	1,30 x 10 ⁻³	1,34 x 10 ⁻⁷	1,17 x 10 ⁻⁵	1,30 x 10 ⁻³	1,34 x 10 ⁻⁷	87,40	7,20
TB19	2,08 x 10 ⁻⁵	4,42 x 10 ⁻³	2,07 x 10 ⁻⁷	2,14 x 10 ⁻⁵	4,40 x 10 ⁻³	2,13 x 10 ⁻⁷	100,60	15,23

Interior das Chapadas Elevadas								
	Moench (1984)			Warren e Root (1963)				
Testes	T (m ² /s)	S	K (m/s)	T (m ² /s)	S	K (m/s)	b (m)	Q (m ³ /h)
TB1	9,46 x 10 ⁻⁶	4,55 x 10 ⁻³	9,32 x 10 ⁻⁸	9,47 x 10 ⁻⁶	4,44 x 10 ⁻³	9,33 x 10 ⁻⁸	101,55	7,92
TB2	1,63 x 10 ⁻⁴	2,36 x 10 ⁻³	1,16 x 10 ⁻⁶	1,09 x 10 ⁻⁴	6,48 x 10 ⁻⁴	7,78 x 10 ⁻⁷	140,10	2,20
TB8	1,22 x 10 ⁻⁴	7,10 x 10 ⁻³	9,99 x 10 ⁻⁷	1,33 x 10 ⁻⁴	6,87 x 10 ⁻³	1,09 x 10 ⁻⁶	122,10	33,00
TB9	7,35 x 10 ⁻⁶	6,20 x 10 ⁻³	1,52 x 10 ⁻⁷	6,15 x 10 ⁻⁶	6,44 x 10 ⁻⁴	1,27 x 10 ⁻⁷	48,40	3,45
TB10	1,07 x 10 ⁻⁴	1,59 x 10 ⁻³	1,09 x 10 ⁻⁶	1,07 x 10 ⁻⁴	1,58 x 10 ⁻³	1,09 x 10 ⁻⁶	98,10	12,00
TB11	1,19 x 10 ⁻⁵	1,38 x 10 ⁻³	1,49 x 10 ⁻⁷	1,19 x 10 ⁻⁵	1,37 x 10 ⁻³	1,49 x 10 ⁻⁷	79,70	7,20
TB12	2,38 x 10 ⁻⁵	5,11 x 10 ⁻³	1,44 x 10 ⁻⁷	1,79 x 10 ⁻⁵	4,54 x 10 ⁻⁵	1,08 x 10 ⁻⁷	165,70	6,00
TB15	1,06 x 10 ⁻⁴	5,79 x 10 ⁻³	1,05 x 10 ⁻⁶	2,6 x 10 ⁻⁴	3,30 x 10 ⁻⁴	2,58 x 10 ⁻⁶	100,80	8,00
TB16	1,57 x 10 ⁻⁴	5,81 x 10 ⁻⁴	1,99 x 10 ⁻⁶	1,58 x 10 ⁻⁴	5,75 x 10 ⁻⁴	2,00 x 10 ⁻⁶	78,85	15,00
TB17	1,49 x 10 ⁻⁵	1,03 x 10 ⁻³	9,54 x 10 ⁻⁸	1,05 x 10 ⁻⁵	1,03 x 10 ⁻³	6,72 x 10 ⁻⁸	156,20	9,00
TB18	8,45 x 10 ⁻⁴	1,51 x 10 ⁻³	3,56 x 10 ⁻⁶	8,62 x 10 ⁻⁴	1,50 x 10 ⁻³	3,63 x 10 ⁻⁶	237,30	5,50
TB20	6,68 x 10 ⁻⁴	2,19 x 10 ⁻³	3,03 x 10 ⁻⁶	5,65 x 10 ⁻⁴	2,12 x 10 ⁻³	2,56 x 10 ⁻⁶	220,60	10,56
TB21	1,98 x 10 ⁻⁴	5,49 x 10 ⁻³	9,05 x 10 ⁻⁷	2,64 x 10 ⁻⁴	1,37 x 10 ⁻⁵	1,21 x 10 ⁻⁶	218,90	29,30
TB22	4,17 x 10 ⁻⁴	4,18 x 10 ⁻²	1,96 x 10 ⁻⁶	5,05 x 10 ⁻⁴	2,15 x 10 ⁻³	2,38 x 10 ⁻⁶	212,30	36,00
TB23	1,16 x 10 ⁻⁴	1,97 x 10 ⁻²	1,07 x 10 ⁻⁶	1,19 x 10 ⁻⁴	1,96 x 10 ⁻²	1,10 x 10 ⁻⁶	108,50	46,00
TB24	1,73 x 10 ⁻⁴	3,14 x 10 ⁻¹⁰	8,02 x 10 ⁻⁷	1,73 x 10 ⁻⁴	9,25 x 10 ⁻¹⁰	8,02 x 10 ⁻⁷	215,60	11,07