

## **AValiação dos Resultados de Tratamento de Dados de Testes de Bombeamento em Aquíferos Anisotrópicos**

### *EVALUATION OF PUMPING TEST DATA INTERPRETATION IN ANISOTROPIC AQUIFERS*

**Anna Carolina de Brito MIRANDA, José Eloi Guimarães CAMPOS**

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF-Brasil.

E-mails: annacarolinageo@gmail.com; eloi@unb.br

#### Introdução

#### Referencial teórico

Modelos analíticos em testes de bombeamento e sua aplicação no AquiferTest

Contexto do Distrito Federal e aplicação dos testes de bombeamento

Variáveis críticas e limitações técnicas na aplicação dos testes de bombeamento

Ausência de isolamento hidráulico: o problema da mistura de respostas

Espessura saturada: um parâmetro sensível

Distância entre poços: impacto na confiabilidade dos parâmetros

#### Materiais e métodos

#### Resultados e discussões

Estudo de caso - Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> no Distrito Federal

Curvas de rebaixamento: padrões contrastantes

Teste TB3: comportamento típico de aquífero fraturado

Teste TB16: comportamento intermediário (fraturado com influência matricial)

Teste TB12: comportamento típico de aquífero de dupla porosidade

Ajuste aos modelos analíticos

Análise dos parâmetros hidrodinâmicos e vazão

#### Considerações finais

#### Referências

**RESUMO** - Este estudo avaliou 24 testes de bombeamento no Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, no Distrito Federal, com o objetivo de identificar padrões hidrodinâmicos relacionados às diferenças estruturais entre áreas de borda e interior das chapadas. Foram aplicados os modelos analíticos de Moench e Warren & Root por meio do software AquiferTest, possibilitando a estimativa de transmissividade, condutividade hidráulica, armazenamento e vazão específica. Os poços situados nas bordas apresentaram comportamento típico de aquífero fraturado, com curvas de rebaixamento inclinadas e queda contínua. Já os poços localizados no interior das chapadas revelaram influência da matriz porosa, com respostas compostas, curvas suavizadas e múltiplos estágios. O modelo de Moench demonstrou melhor ajuste nesses casos. A análise também indicou limitações técnicas em parte dos testes, especialmente pela ausência de poços de observação. Os resultados reforçam a proposta de remodelação parcial do modelo conceitual do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>: embora tradicionalmente interpretado como aquífero fraturado, setores do interior das chapadas apresentam evidências claras de comportamento de dupla porosidade, o que impacta diretamente sua interpretação, monitoramento e gestão integrada.

**Palavras-chave:** Teste de bombeamento. Aquífero de dupla porosidade. Modelo conceitual.

**ABSTRACT** - This study evaluated 24 pumping tests in the R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> Aquifer Subsystem, located in Brazil's Federal District, aiming to identify hydrodynamic patterns related to structural contrasts between border zones and the interior of the plateau. The analytical models of Moench and Warren & Root were applied using AquiferTest software to estimate transmissivity, hydraulic conductivity, storativity, and specific discharge. Wells on the borders showed typical fractured-aquifer behavior, with steep and continuous drawdown curves. In contrast, wells in interior zones exhibited porous matrix influence, with composite responses, damped curves, and multi-stage behavior. In these cases, Moench's model provided a better fit. The analysis also revealed technical limitations in some tests, particularly due to the absence of packers and observation wells. Results support a partial remodeling of the conceptual model of the R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> aquifer: although traditionally classified as fractured, interior sectors of the plateau clearly exhibit double-porosity behavior, which directly influences its interpretation, monitoring strategies, and sustainable groundwater management.

**Keywords:** Pumping test. Double-porosity aquifer. Conceptual model.

## **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 difíceis de determinação por avaliações

qualitativas, mas essenciais para a compreensão do fluxo subterrâneo. Trata-se, portanto, de uma metodologia que combina indução empírica com modelagem matemática, revelando-se como uma das ferramentas mais fundamentais da prática hidrogeológica.

O primeiro grande marco foi a formulação da equação de Theis (1935), que estabeleceu as bases para a interpretação do rebaixamento piezométrico.

trico em função do tempo, em aquíferos confinados homogêneos e isotrópicos, sob a suposição de fluxo radial e poço totalmente penetrante. Theis (1935) adaptou a equação da difusão de calor de Fourier ao fluxo de água subterrânea, criando uma analogia que permitiu estimar transmissividade e armazenamento a partir do rebaixamento induzido pelo bombeamento. Sua aplicação se deu inicialmente em estudos para o Serviço Geológico dos Estados Unidos, mas sua difusão foi ampla e rápida.

A partir desse modelo, diversos outros foram propostos por pesquisadores que buscaram aproximar-se da realidade natural: Jacob (1940) simplificou a solução de Theis (1935) para facilitar a aplicação gráfica; Cooper & 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, sendo aplicados com sucesso em muitos contextos. No entanto, à medida que os hidrogeólogos passaram a trabalhar em ambientes mais complexos, percebeu-se que tais modelos, embora embasados, não eram suficientes para representar sistemas heterogêneos, anisotrópicos ou com múltiplos domínios de fluxo.

A segunda grande inflexão no conhecimento se deu com a percepção de que muitos aquíferos não podiam ser representados como 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 & Root (1963), que modelaram um sistema no qual a matriz porosa atua como um reservatório de armazenamento, cedendo água às fraturas onde o fluxo é efetivo.

O modelo supõe uma taxa de troca constante entre os dois domínios, sendo especialmente aplicável em sistemas cársticos, quartzíticos e cristalinos intemperizados. Moench (1984) aperfeiçoou esse modelo, incorporando 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 ( $\sigma$ ) 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, reconhecendo comportamentos típicos de dupla porosidade, retardo de resposta da matriz e efeitos de contorno.

O trabalho de Moench (1984) permitiu a aplicação prática desses conceitos por meio de *softwares* de ajuste automático, como o AquiferTest, AqtSolv e outros.

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, AqtSolv, Aquifem e ModFlow, permitiram a análise de modelos mais complexos, incluindo 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 (1935), Cooper & Jacob (1946), Neuman (1972), Moench (1984) e Warren & Root (1963) como os mais utilizados.

Destaca-se que a maioria dos estudos se concentra na estimativa de transmissividade e armazenamento, mas observa-se um crescente interesse em parâmetros como condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ).

A revisão ainda 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 teórica 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 & Cherry (1979) e o *National Research Council* (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 de bombeamento, dados da distância dos poços de bombeamento e observação, escolha do método adequado de interpretação dos dados, 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 utilizados.

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.

A evolução histórica da análise de testes de bombeamento, portanto, é também a evolução do olhar sobre o subsolo, da simplicidade dos modelos homogêneos à complexidade dos sistemas reais, da análise gráfica à regressão automatizada, e da hidrogeologia empírica à modelagem computacional multivariada.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### Modelos analíticos em testes de bombeamento e sua aplicação no AquiferTest

A interpretação de testes de bombeamento em sistemas hidrogeológicos complexos exige não apenas a coleta criteriosa de dados de campo, mas também 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 sua capacidade de ajustar curvas de rebaixamento e recuperação com base em uma variedade de modelos analíticos e semianalíticos clássicos.

Entre os métodos mais frequentemente utilizados no *software* se destacam:

- Theis (1935), clássico para aquíferos confinados homogêneos, 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 & Jacob (1946), simplificação do modelo de Theis (1935), 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, permitindo maior realismo em aquíferos livres, mas sua aplicação é ainda mais restrita para isotrópicos;

- Warren & 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 em arenitos paleozoicos e quartzitos de baixo grau metamórfico;

- Moench (1984, 1995), modelo híbrido avançado que combina os conceitos de dupla porosidade com o efeito de pele (resistência hidráulica na interface poço-formação), sendo um dos mais eficazes para aquíferos fraturados com resposta composta.

A escolha do método ideal de interpretação deve ser orientada pelo modelo conceitual do aquífero. Neste caso, o modelo conceitual deve ser acompanhado de um amplo conjunto de informações que qualifica e quantificam o aquífero, incluindo: condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento, espessura total e saturada, capacidade específica, vazões dos poços individuais, rebaixamento dos níveis e comportamento da recuperação dos níveis após o término do bombeamento, além de outras informações.

Em situações de aquíferos de porosidade mista, 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 de Warren & Root (1963) ou Moench (1984) se mostra mais adequada, pois permite capturar as inflexões típicas das curvas observadas, além de oferecer parâmetros específicos como o coeficiente de troca entre domínios ( $\sigma$ ).

A tabela 1 sintetiza as principais características desses modelos, destacando seu 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.

A tabela 1 ainda traz os pressupostos estruturais de cada modelo, a fase do ensaio mais bem ajustada por cada abordagem e os limites de aplicabilidade em sistemas com comportamento composto ou de dupla porosidade.

**Tabela 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<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> do Grupo Paranoá.

Modelo	Tipo de aquífero	Porosidade representada	Condições de contorno	Fase do ensaio melhor representada	Parâmetros estimados	Aplicabilidade a sistema de dupla porosidade
<b>Theis (1935)</b>	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
<b>Cooper Jr. &amp; Jacob (1946)</b>	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
<b>Neuman (1972)</b>	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
<b>Warren &amp; Root (1963)</b>	Confinado (ou pseudo-livre)	Dupla porosidade com interação uniforme	Idealizado, sem variação da superfície livre	Curva intermediária e estabilização	T, S, $\gamma$ e $\sigma$	Representa a dupla porosidade, mas não capta bem comportamento com geometria variável ou oscilação livre
<b>Moench (1984)</b>	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, $\gamma$ , $\sigma$ e SF	Modelo mais completo e realista para dupla porosidade: representa fluxo misto, pele, heterogeneidade e regime não confinado

T - Transmissividade; S - Armazenamento;  $\sigma$  - Fator de pele;  $\gamma$  - Fator de troca.

### Contexto 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 nº 350 da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA, 2006), que estabelece a obrigatoriedade da realização de testes para a solicitação de outorga de direito de uso de águas subterrâneas. A partir desse marco, consolidou-se uma crescente incorporação desses dados nos processos técnicos de licenciamento, ainda que com limitações signi-

ficativas na forma como são conduzidos, tratados e interpretados.

A 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.

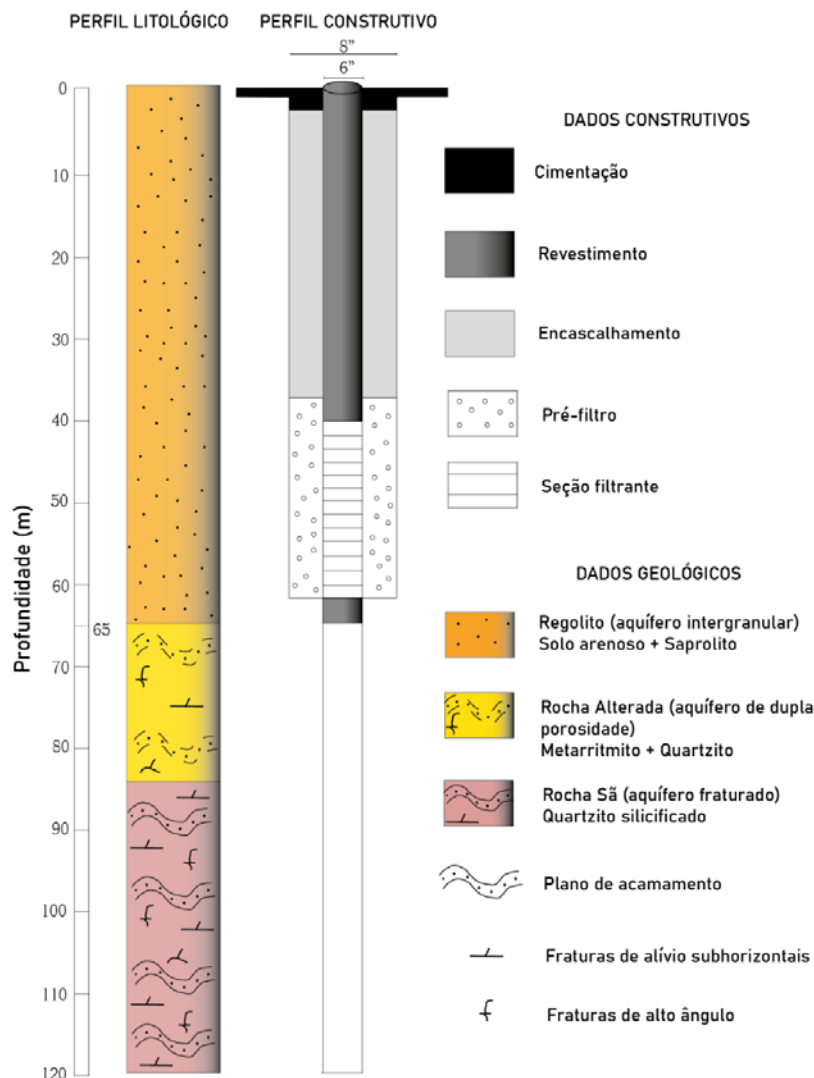
Dados imprecisos sobre a geometria do poço, ausência de poços de observação, tempo de teste insuficiente e falta de clareza na delimitação das zonas de contribuição são aspectos recorrentes que dificultam a aplicação de métodos interpretativos mais robustos. Em ambientes com hidrogeologia complexa, como os observados no

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 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.

A figura 1 traz uma ilustração esquemática de um perfil construtivo considerado adequado, perfurado no Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>.



**Figura 1** - Perfil de um poço tubular profundo típico, construído no Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> no Distrito Federal.

Neste exemplo, o solo e a rocha alterada ocorrem até 60 metros de profundidade, sendo que a partir de 64 metros até a profundidade final, o poço é mantido diretamente em rocha sem a necessidade de instalação de revestimento e filtro. Apesar de existirem poços construídos segundo as normas técnicas, a maior parte dos poços da região não adotam as boas práticas e não utilizam pré-filtro ou instalam sistema de proteção sanitária adequada.

O resultado da construção inadequada causa constante perda de poços por desmoronamento (na base da seção de revestimento), produção de

água com elevada turbidez (devido ao revestimento insuficiente) e o elevado risco de contaminação (pela ausência de isolamento adequado).

#### **Incertezas hidrogeológicas e limitações técnicas dos testes de bombeamento**

A aplicação prática dos testes de bombeamento, mesmo com suporte de *softwares* avançados a exemplo do 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 superficial é a geração de resultados “ambíguos”, isto é, parâmetros que expressam a mistura de comportamentos hidrodinâmicos distintos. Esse problema é particularmente frequente em aquíferos compostos por dois domínios superpostos, como um domínio de dupla porosidade na zona saprolítica e outro de fraturas abertas em profundidade.

O problema se origina, principalmente, da forma como os poços são construídos, e os testes são conduzidos. Em muitos casos, a seção de revestimento e filtro do poço contempla apenas a zona superior (geralmente inconsolidada), deixando a zona inferior sem isolamento hidráulico.

Como resultado, durante o bombeamento, há contribuição simultânea de dois sistemas com tempos de resposta distintos: i) a zona fraturada responde de forma rápida, com rebaixamento acentuado nos primeiros minutos e ii) a zona porosa ou saprolítica libera água com menor velocidade, por fluxo de drenança da matriz para as fraturas (fluxo retardo), atuando com atraso na curva de rebaixamento.

Regiões com pedologia e geologia heterogênea são marcadas por intensa compartimentação estrutural, com a alternância de rochas maciças e rochas com matriz porosa, além da ocorrência de espessas mantos de intemperismo que, em muitos setores, ultrapassam os 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.

Em um exemplo típico, um poço construído até 100 metros de profundidade, intercepta a zona fraturada inferior. No entanto, apenas os primeiros 50 metros são equipados com seção de revestimento e filtros, deixando os últimos 50 m (correspondentes à rocha sã) sem revestimento ou isolamento hidráulico. Durante o bombeamento, ambas as zonas contribuem para o rebaixamento, porém com dinâmicas distintas: a zona fraturada responde rapidamente e drena em curto prazo, enquanto a zona porosa libera água lentamente por fluxo retardo.

Do ponto de vista hidrodinâmico, trata-se de uma resposta composta por fluxos concorrentes, o que impossibilita o ajuste adequado por métodos aplicáveis a porosidade única, como Theis (1935)

ou Cooper & Jacob (1946). A estimativa de parâmetros como transmissividade e coeficiente de armazenamento nesse tipo de sistema tende a apresentar valores médios distorcidos: a transmissividade pode ser superestimada se a fratura tiver 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 mal interpretada, pode gerar estimativas irreais de transmissividade e armazenamento. Isso poderia ser solucionado com o desenvolvimento de testes em poços obturados ou poços de observação, que permitiriam isolar e interpretar separadamente os domínios hidráulicos.

## **Espessura saturada: um parâmetro sensível**

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 “ $b$ ” principalmente em meio fraturados e de dupla porosidade é frequentemente negligenciada ou arbitrária, o que compromete significativamente a confiabilidade dos resultados. A definição da espessura saturada sem conhecimento detalhado do perfil construtivo e geológico do poço pode resultar em erros significativos.

Por exemplo, se um poço capta majoritariamente água de fraturas localizadas entre 30 e 70 metros de profundidade, mas o cálculo da condutividade considera a profundidade total perfurada de 120 metros, haverá uma subestimação do parâmetro, 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 perfilagens geofísicas, vídeo-inspeções ou pela identificação das zonas efetivamente produtivas durante a 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.

Por exemplo, no contexto hidrogeológico do Distrito Federal, observa-se grande variação espacial na espessura dos aquíferos. Nas porções elevadas das chapadas, o perfil de alteração pode ultrapassar os 30 metros de profundidade, e a zona saturada frequentemente se estende até 50 metros, especialmente em setores de maior infiltração e recarga difusa. Em contrapartida, nas bordas das chapadas, a espessura produtiva tende a ser reduzida, com fraturas rasas predominando e menor participação da matriz porosa. Essa heterogeneidade reforça a importância de se adotar modelos conceituais hidrogeológicos locais, evitando 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 sensível no tratamento dos dados de testes de bombeamento. A estimativa de parâmetros como o coeficiente de armazenamento depende dessa distância, de forma logarítmica, nos modelos de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946) e Moench (1984). Isso significa que uma diferença de poucos metros

pode representar um erro de até uma ordem de grandeza nos resultados (Kruseman & 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, dependendo de sua posição em relação à estrutura geológica.

Na prática, muitos estudos utilizam o mesmo poço para bombeamento e observação, em que a distância “ $r$ ” é assumida como 1 metro para efeitos de estimativa de parâmetros hidráulicos. Essa escolha é tecnicamente inadequada para fins interpretativos mais robustos, pois impede a distinção entre armazenamento no poço e resposta do aquífero. Além disso, a ausência de poços de observação secundários impede a construção de uma superfície potenciométrica e inviabiliza modelos de fluxo bidimensionais mais precisos.

O ideal, como recomendado por Fetter (2001), é utilizar pelo menos dois poços de observação com distância conhecida e georreferenciada, além da caracterização estrutural do meio entre os poços. Esse arranjo permite não apenas a melhor definição dos parâmetros hidráulicos, mas também a identificação de comportamentos transientes e heterogeneidades locais.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A análise dos dados de campo foi conduzida com base em 24 testes de bombeamento realizados em poços tubulares distribuídos em diferentes setores do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> o qual foi utilizado como estudo de caso. Os testes adotados abrangem poços situados nas bordas e no interior das chapadas (Figura 2). Essa distribuição espacial foi fundamental para o estabelecimento de uma comparação entre comportamentos hidrogeológicos contrastantes, uma vez que as bordas apresentam maior influência do fraturamento estrutural, enquanto os setores internos, mais alterados e com regolitos espessos, evidenciam contribuição significativa da matriz porosa, característica de sistemas de dupla porosidade.

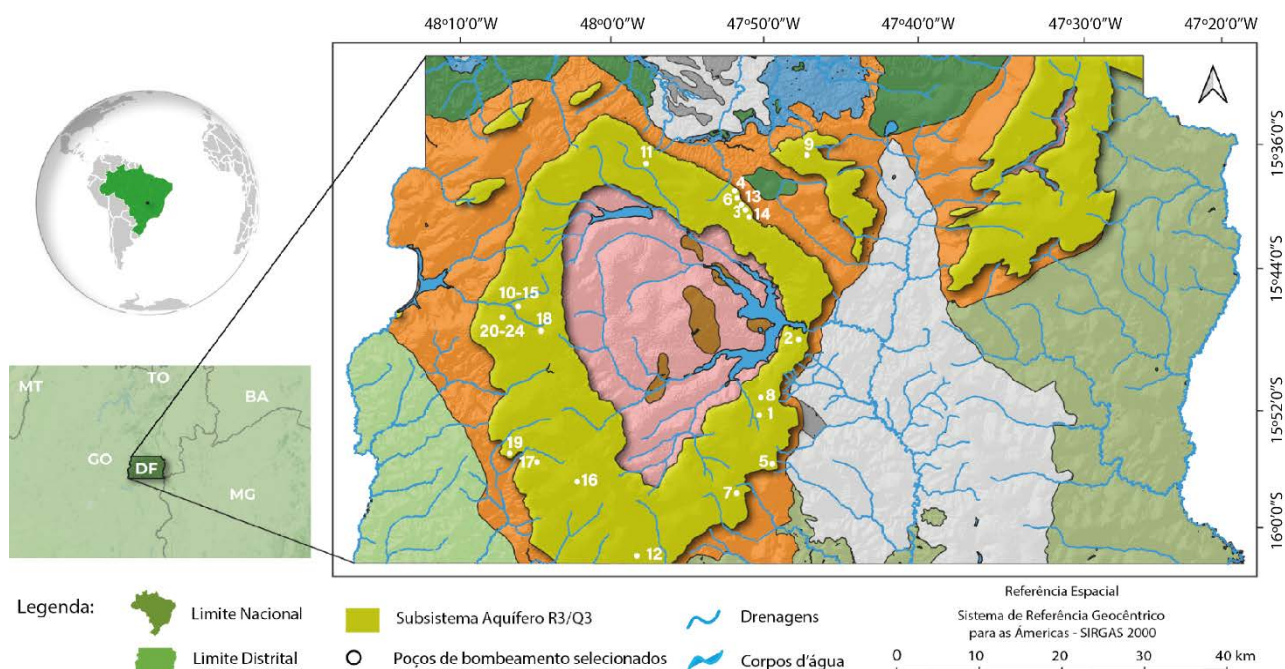
A seleção dos modelos analíticos utilizados na interpretação dos testes de bombeamento foi guiada por dois critérios principais: i) compatibilidade entre o método de tratamento dos dados adotado e o modelo conceitual do aquífero estu-

dado; e ii) capacidade dos modelos de representar adequadamente os comportamentos hidrodinâmicos observados nas curvas de rebaixamento.

Considerando a reconhecida complexidade estrutural e hidrogeológica do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, caracterizado por heterogeneidade vertical, fraturas conectadas e presença de matriz porosa retentiva, optou-se pela aplicação dos modelos analíticos de Warren & Root (1963) e Moench (1984), ambos disponíveis no *software* AquiferTest. 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.

O modelo de Warren & Root (1963) 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





**Figura 2** - Localização dos poços de bombeamento no Subsistema Aquífero R3/Q3.

assume uma troca de massa constante entre os dois domínios e considera o meio como homogeneamente duplamente poroso. Sua aplicação permite estimar parâmetros como transmissividade ( $T$ ), armazenamento da fratura ( $S_f$ ), armazenamento da matriz ( $S_m$ ) e o fator de troca entre os domínios ( $\sigma$ ), 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 (1984) apresenta uma abordagem mais abrangente e realista para aquíferos compostos. Além de incorporar a lógica de dupla porosidade com taxa de troca variável ( $\sigma$ ), 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.

A aplicação combinada desses dois modelos proporcionou maior robustez à interpretação dos testes de bombeamento, permitindo não apenas a obtenção de parâmetros hidráulicos representativos, mas também uma análise mais fiel da

dinâmica de fluxo em ambientes de fraturamento complexo e porosidade composta, como o observado no Subsistema R3/Q3.

Para cada teste, os dados foram organizados considerando a posição geográfica do poço, a profundidade total, a duração do ensaio, o nível estático, nível dinâmico, espessura da zona saturada e as condições de instalação. Foram priorizados os ensaios que apresentavam duração mínima de 24 horas, estabilização de vazão e registro contínuo dos níveis dinâmico e estático.

Devido à ausência de dados sobre a espessura da zona saturada, foi considerado a valor da profundidade do poço perfurada na zona de saturação mais 10% (segundo diretriz de Miguel, 2023). 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, três testes foram selecionados para representar comportamentos contrastantes entre si: um típico de aquífero fraturado, um de dupla porosidade e um intermediário com contribuição de ambos os tipos de meios.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Estudo de caso - Subsistema 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, não apenas pela sua ampla distribuição

espacial e relevância no abastecimento de diversas comunidades, mas também pela complexidade estrutural que o caracteriza.

Diversos autores contribuíram com o conhecimento sobre este reservatório com destaque para o trabalho de Campos & Freitas-Silva (1998)



que definiu o subsistema, Souza (2001) que propôs as bases para a gestão dos aquíferos; Carmelo (2002) que estudou as anisotropias a partir de estudos geofísicos, Campos (2004) que apresentou síntese sobre os aquíferos do DF com destaque para o Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, Cadamuro & Campos (2005) que testaram métodos de recarga artificial para o sistema fraturado R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, ADASA (2018) que resultou na locação de dezenas de poços tubulares a partir da integração de geologia, análise de lineamentos e eletrorresistividade e Miranda (2025) que detalhou o conhecimento do aquífero culminando com a proposição do modelo de dupla porosidade aplicado a este subsistema.

Tradicionalmente interpretado como um aquífero fraturado, este subsistema apresenta evidências geológicas e hidrogeológicas que apontam para um funcionamento 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, mas baixa condutividade (Miranda, 2025).

Para interpretar adequadamente os testes de bombeamento realizados nesse aquífero, torna-se necessário o uso de modelos analíticos capazes de representar esse tipo de meio heterogêneo e anisotrópico. A complexidade do Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> também se manifesta geograficamente, quando se compara as condições de bordas de chapadas com o seu interior. 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 regolitos maiores que 30 metros de espessura (localmente alcançando até mais de 50 metros), 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.

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

- Aplicar e comparar os modelos analíticos propostos, verificando qual deles apresenta melhor ajuste às diferentes configurações hidroestruturais do aquífero;
- Discutir falhas recorrentes que comprometem a confiabilidade dos testes, com ênfase ao não uso de poços de observação, falta de descrição adequada dos perfis dos poços, determinação da espessura saturada etc.;
- Interpretar os parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento e vazão), avaliando suas variações conforme a posição geográfica, os tipos de rochas predominantes e o modelo aplicado.

#### **Curvas de rebaixamento: padrões contrastantes**

A análise das curvas de rebaixamento dos testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> permitiu identificar diferentes regimes de resposta hidrodinâmica, reflexo direto da heterogeneidade estrutural, do grau de intemperismo das rochas e do tipo de porosidade predominante.

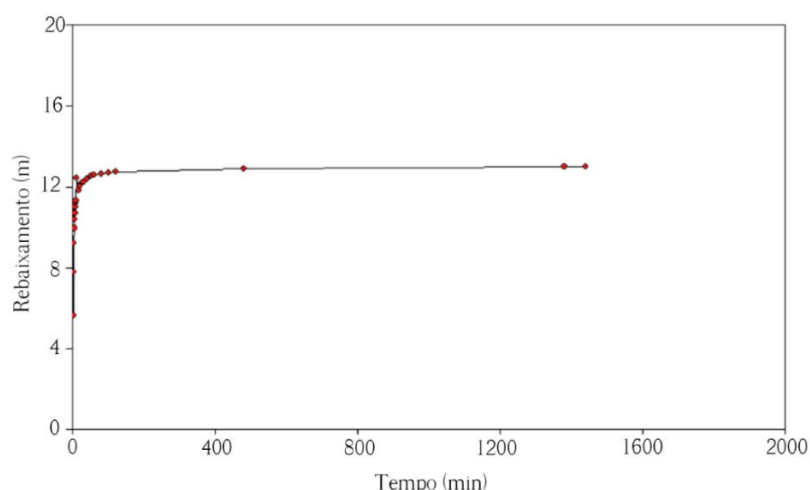
Três testes foram selecionados para representar comportamentos contrastantes: o TB3, com comportamento típico de aquífero fraturado; o TB16, representando uma resposta intermediária; e o TB12, cuja curva é compatível com sistemas de dupla porosidade.

#### **Teste TB3: comportamento típico de aquífero fraturado**

A curva de rebaixamento do teste TB3 revela um rebaixamento acentuado nas primeiras dezenas de minutos, com uma rápida estabilização posterior. Esse comportamento é típico de aquíferos fraturados, onde o fluxo ocorre majoritariamente por fraturas conectadas, com baixa capacidade de armazenamento (Figura 3).

O declive inicial elevado 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 onde a matriz rochosa é praticamente impermeável, e o fluxo depende quase exclusivamente da conectividade das fraturas. Poços com esse tipo de curva são frequentemente encontrados nas bordas das chapadas, em rochas pouco intemperizadas e com restrita dissolução de cimento silicoso e alteração de filossilicatos e feldspatos.



**Figura 3** - Curva de rebaixamento do teste TB3, mostrando comportamento típico de aquífero fraturado.

A curva de rebaixamento do teste TB3 indica comportamento típico de aquífero fraturado, com rebaixamento rápido e constante ao longo do tempo, sem inflexões, indicando predomínio de fluxo em fraturas conectadas e baixa contribuição da matriz porosa.

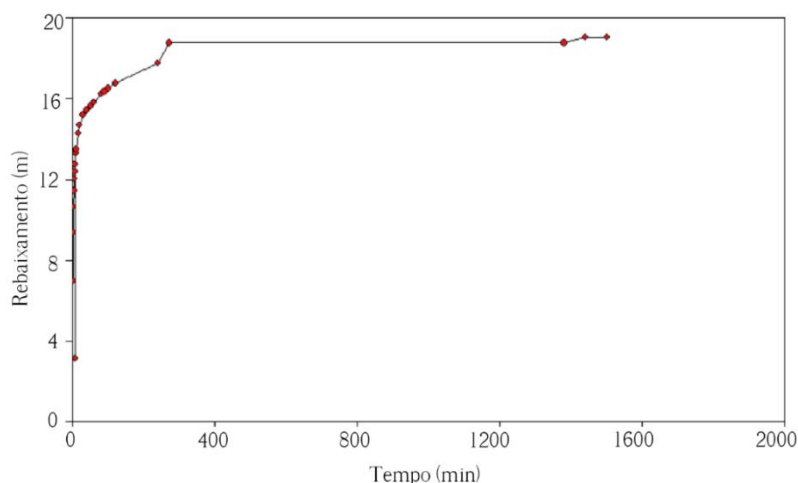
#### **Teste TB16: comportamento intermediário (fraturado com influência matricial)**

O gráfico do teste TB16 apresenta uma curva com rebaixamento inicial rápido, seguido por uma transição sutil para uma fase de declividade menor. Esse comportamento intermediário indica atuação combinada de dois domínios de porosidade: fraturas mais condutivas no início do bombeamento e uma contribuição secundária e retardada da matriz porosa com maior capaci-

dade de armazenamento (Figura 4).

A leve inflexão observada após cerca de 200 minutos sugere o início de drenagem da água retida na matriz em direção às fraturas, típico de sistemas com heterogeneidade vertical e transição gradual entre domínios.

Como destacado por Moench (1984) e reforçado por Severgnini et al. (2021), esse tipo de curva reflete ambientes de dupla porosidade não homogêneos, onde a taxa de troca entre os domínios varia ao longo do tempo. Poços como o representado pelo TB16 tendem a estar localizados em áreas de transição geológica e geomorfológica, onde há tanto zonas fraturadas quanto regolito alterado com porosidade intergranular residual.



**Figura 4** - Curva de rebaixamento do teste TB16, indicando meio fraturado com influência de porosidade matricial.

A curva de rebaixamento do TB16 indica comportamento intermediário, com rebaixamento inicial acentuado seguido de leve inflexão, sugerindo fluxo inicial em fraturas e contribuição secundária da matriz porosa. Representa área de transição entre borda e chapada.

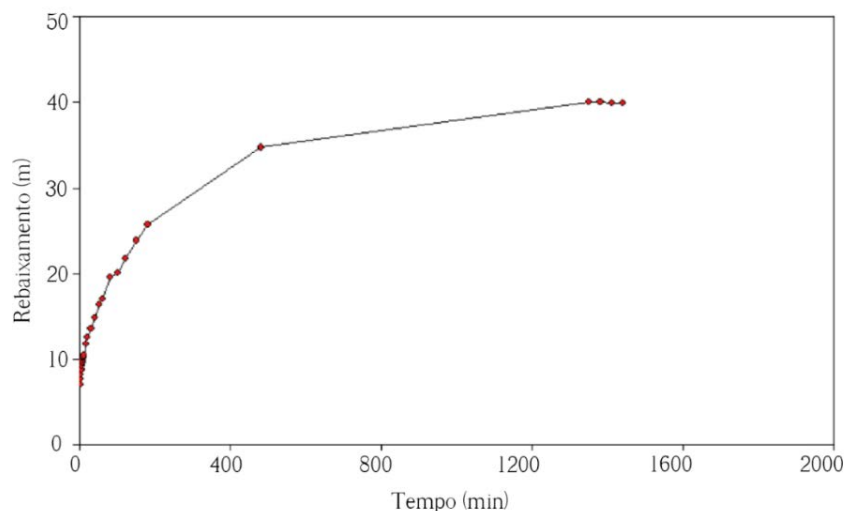
#### **Teste TB12: comportamento típico de aquífero de dupla porosidade**

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 precoce. 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 drenagem progressiva da matriz porosa (Figura 5).

O comportamento apresentado se assemelha aos resultados discutidos por Severgnini et al. (2021), em que os métodos de Moench (1984) e Warren & Root (1963) apresentaram melhor ajuste em curvas com múltiplos regimes. A estabilização

precoce 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 foi observado em poços instalados no interior das chapadas, onde há maior espessura de saprolito e intemperismo avançado das rochas, favorecendo a presença de porosidade intergranular.



**Figura 5** - Curva de rebaixamento no teste TB12, com feição característica de um meio de dupla porosidade.

A curva de rebaixamento do TB16 indica comportamento típico de aquífero de dupla porosidade, com rebaixamento amortecido, múltiplas fases e estabilização precoce, com participação expressiva da matriz porosa na sustentação do fluxo ao longo do tempo.

Esses três testes ilustram, de forma clara, a variabilidade de comportamentos hidrodinâmicos no Subsistema  $R_3/Q_3$  e reforçam a importância de se adotar modelos analíticos capazes de capturar essa complexidade. Em especial, o modelo de Moench (1984) se mostra eficaz para representar as curvas dos testes TB12 e TB16, 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 & Root (1963), dada a sua maior simplicidade e ausência de múltiplas fases.

#### Ajuste aos modelos analíticos

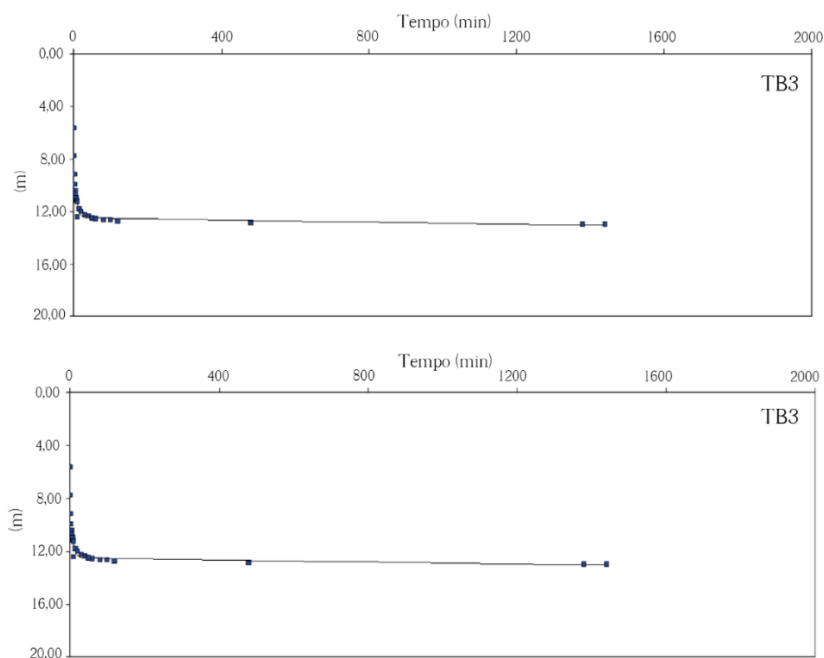
A comparação entre os modelos analíticos de Warren & Root (1963) e Moench (1984) aplicada aos testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero  $R_3/Q_3$  demonstrou que, de modo geral, os dois métodos apresentaram comportamentos gráficos bastante semelhantes. Em diversos testes, como no caso do TB-3, localizado em zona de borda, ambos os modelos

forneceram ajustes praticamente coincidentes (Figura 6), indicando 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.

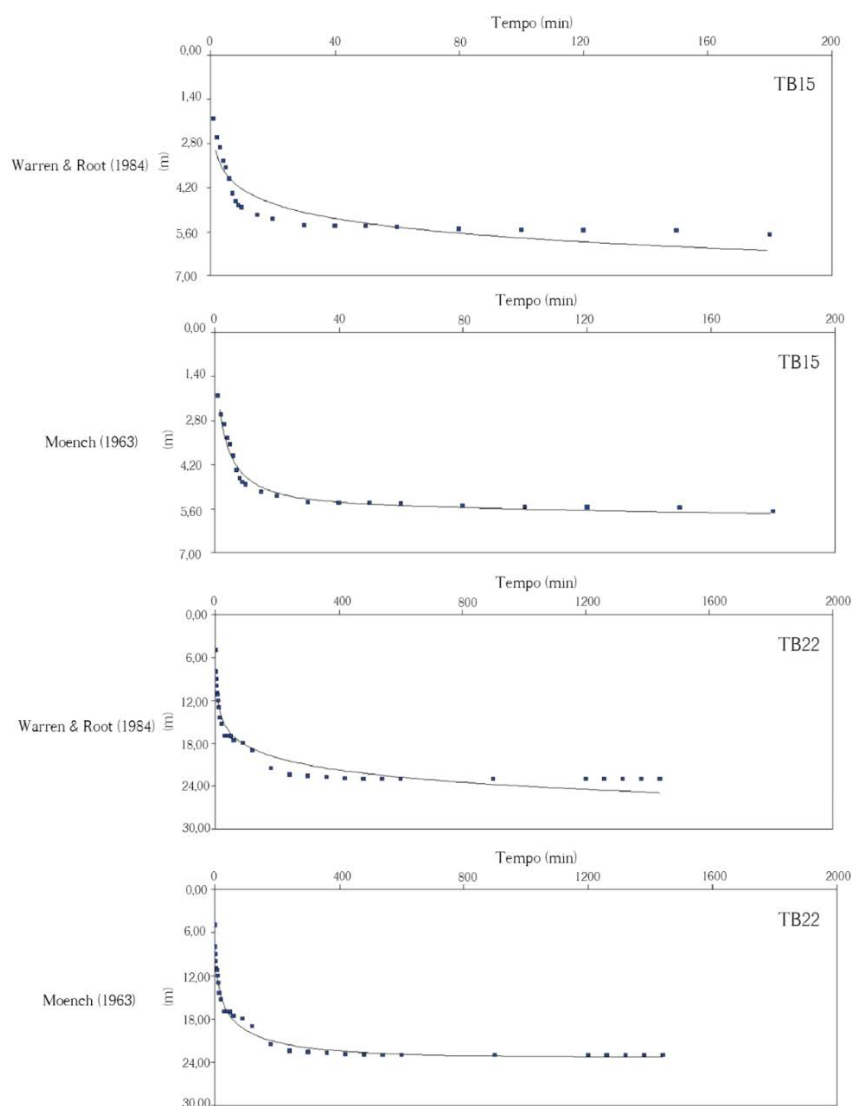
Os resultados indicam comportamento gráfico similar entre os dois modelos, sugerindo que, nesta região, o escoamento é dominado por fraturas com baixa contribuição da matriz porosa. A resposta hidráulica do sistema pode ser adequadamente representada pelos dois métodos.

Por outro lado, em alguns testes (como o TB-15 e o TB-22, ambos localizados no interior das chapadas) foi possível observar diferenças mais evidentes no ajuste entre os dois modelos (Figura 7). Nesses casos, o modelo de Moench (1984) apresentou melhor aderência 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 (1984) de incorporar explicitamente o parâmetro  $\gamma$  (fator de troca), que representa a taxa de troca entre o domínio fraturado e a matriz porosa, proporcionando uma representação mais robusta do comportamento transiente típico de sistemas com dupla porosidade.



**Figura 6** - Ajuste dos modelos analíticos Warren & Root (1963) e Moench (1984), respectivamente, aplicados ao teste TB-3, em poço localizado na condição de borda da chapada.



**Figura 7** - Comparação entre os ajustes dos modelos analíticos aplicados aos testes TB-15 e TB-22, ambos localizados na condição geomorfológica de interior das chapadas.

Observa-se que o modelo de Moench (1984) apresentou melhor aderência às curvas de rebaiamento, principalmente na fase de transição, evidenciando a influência do mecanismo de dupla porosidade nesses setores. A modelagem com o modelo de Moench (1984) captura de forma mais realista o fluxo retardado proveniente da matriz porosa, justificando seu melhor ajuste.

É importante destacar que essa melhor performance do modelo de Moench (1984) não foi limitada a uma única posição geográfica, sendo 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 (1984) em outros pontos

indica que a dupla porosidade é um elemento presente e relevante, ainda que de forma heterogênea ao longo da área estudada.

Dessa forma, os resultados sugerem que, embora nenhum modelo isoladamente se sobressaia em todos os casos, o modelo de Moench (1984) apresenta maior flexibilidade para representar variações locais na dinâmica de fluxo, sendo especialmente vantajoso em áreas onde há indícios de armazenamento significativo na matriz porosa e fluxo retardado entre domínios.

#### **Análise dos parâmetros hidrodinâmicos e vazão**

A análise dos 24 testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> (Tabela 2) permitiu estimar os principais parâmetros hidrodinâmicos, incluindo a transmissividade (T), condutividade hidráulica (K), coeficiente de armazenamento (S) e vazão de estabilização (Q), obtidos a partir do ajuste dos testes aos modelos analíticos de Warren & Root (1963) e Moench (1984).

**Tabela 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<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, com valores mínimos, máximos e médios estimados a partir dos modelos de Moench (1984) e Warren & Root (1963).

	Moench (1984)			Warren & Root (1963)		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
<b>T (m<sup>2</sup>/s)</b>	8,45 x 10 <sup>-4</sup>	2,40 x 10 <sup>-6</sup>	1,40 x 10 <sup>-4</sup>	2,60 x 10 <sup>-2</sup>	1,09 x 10 <sup>-7</sup>	1,16 x 10 <sup>-3</sup>
<b>K (m/s)</b>	3,56 x 10 <sup>-6</sup>	1,76 x 10 <sup>-8</sup>	8,67 x 10 <sup>-7</sup>	3,63 x 10 <sup>-6</sup>	1,76 x 10 <sup>-8</sup>	9,31 x 10 <sup>-7</sup>
<b>S</b>	4,18 x 10 <sup>-2</sup>	3,14 x 10 <sup>-10</sup>	5,71 x 10 <sup>-3</sup>	1,96 x 10 <sup>-2</sup>	9,25 x 10 <sup>-10</sup>	2,74 x 10 <sup>-3</sup>
	<b>Máximo</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Média</b>		
<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	46		2,2	12,83		
<b>b (m)</b>	237,3		46,7	134,21		

Embora haja variações individuais nos valores obtidos, os resultados se mantêm dentro da faixa esperada para aquíferos compostos, com transmissividade (T) entre 10<sup>-3</sup> e 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s, condutividade hidráulica (K) entre 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s e coeficiente de armazenamento (S) entre 10<sup>-1</sup> e 10<sup>-3</sup>.

Esses resultados são coerentes com o potencial hidrodinâmico do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> em áreas já reconhecidas por sua produtividade, indicando 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. Considerando 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 muitos 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.

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 mais da faixa esperada para aquíferos com características de dupla porosidade, e as condutividades hidráulicas refletiram um meio mais poroso e conectado (Tabela 3).

As vazões médias também foram superiores,

**Tabela 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 & Root (1963)		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
<b>T (m<sup>2</sup>/s)</b>	8,45 x 10 <sup>-4</sup>	7,35 x 10 <sup>-6</sup>	1,96 x 10 <sup>-4</sup>	8,62 x 10 <sup>-4</sup>	6,15 x 10 <sup>-6</sup>	2,07 x 10 <sup>-4</sup>
<b>K (m/s)</b>	3,56 x 10 <sup>-6</sup>	9,32 x 10 <sup>-8</sup>	1,14 x 10 <sup>-6</sup>	3,6 x 10 <sup>-6</sup>	6,72 x 10 <sup>-8</sup>	1,24 x 10 <sup>-6</sup>
<b>S</b>	4,18 x 10 <sup>-2</sup>	3,14 x 10 <sup>-10</sup>	6,65 x 10 <sup>-3</sup>	1,96 x 10 <sup>-2</sup>	9,25 x 10 <sup>-10</sup>	2,68 x 10 <sup>-3</sup>
	Máximo		Mínimo	Média		
<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	46,00		2,20	15,14		
<b>b (m)</b>	237,3		48,4	147,18		

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, em geral, mais baixos, assim como as vazões obtidas (Tabela 4).

Nessa região, o escoamento é predominantemente controlado por fraturas, com espessura satu-

rada mais reduzida e conectividade hidráulica limitada, o que restringe tanto o armazenamento quanto a transmissividade. A ausência de perfis lateríticos ou de regolito espesso (menor que 10 metros de espessura) nessas áreas também reduz significativamente a contribuição da matriz porosa, resultando em um comportamento hidrogeológico mais próximo de um sistema fraturado clássico, com menor capacidade de resposta a longo prazo.

**Tabela 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 & Root (1963)		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
<b>T (m<sup>2</sup>/s)</b>	8,80 x 10 <sup>-5</sup>	2,40 x 10 <sup>-6</sup>	2,80 x 10 <sup>-5</sup>	8,81 x 10 <sup>-5</sup>	2,40 x 10 <sup>-6</sup>	2,81 x 10 <sup>-5</sup>
<b>K (m/s)</b>	1,12 x 10 <sup>-6</sup>	1,76 x 10 <sup>-8</sup>	3,21 x 10 <sup>-7</sup>	1,12 x 10 <sup>-6</sup>	1,76 x 10 <sup>-8</sup>	3,22 x 10 <sup>-7</sup>
<b>S</b>	7,75 x 10 <sup>-3</sup>	7,14 x 10 <sup>-4</sup>	3,85 x 10 <sup>-3</sup>	6,47 x 10 <sup>-3</sup>	7,14 x 10 <sup>-4</sup>	2,85 x 10 <sup>-3</sup>
	Máximo		Mínimo	Média		
<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	15,23		3,3	8,21		
<b>b (m)</b>	194,2		46,7	115,21		

Esse comportamento reforça a hipótese de que, no interior das chapadas, o Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> apresenta funcionamento hidrogeológico com características mais evidentes de sistema composto, onde há maior contribuição da matriz porosa.

A presença de perfis de alteração espessos e a continuidade entre os domínios fraturado e poroso favorecem o armazenamento e o fluxo retardado, resultando em respostas hidráulicas mais estáveis e produtivas.

Esse padrão é coerente com o modelo conceitual do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, que prevê maior participação da matriz porosa nas zonas planas, associada a um grau mais avançado de intemperismo, espessura saturada mais expressiva e presença de saprolito.

A associação entre maiores vazões, transmis-

sividades mais 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 das chapadas.

Nas bordas, os valores médios foram sistematicamente mais baixos, o que é compatível com comportamento hidrogeológico dominado apenas por fraturas com menor conexão e menor espessura saturada. Nessas áreas, a ausência de regolito espesso (com menos de 10 metros) 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 apresentaram valores consistentemente mais altos de transmissividade, condutividade e vazões médias. Esse padrão indica que, nessas regiões, o Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> opera, pelo menos em parte, com características claras de dupla porosidade, associadas à presença de zonas intemperizadas mais espessas (com até 50 metros), maior continuidade entre matriz e fraturas e maior 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, pedológicas e geomorfológicas do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>.

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.

Em relação aos modelos aplicados, verificou-se que tanto o modelo de Warren & Root (1963) quanto o de Moench (1984) foram capazes de ajustar as curvas de rebaixamento, porém com

diferentes graus de aderência em função do comportamento local do aquífero. O modelo de Moench (1984) 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  $\gamma$ , o que é característico de sistemas de dupla porosidade.

Já o modelo de Warren & Root (1963) 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.

Esses resultados têm implicações importantes para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. O reconhecimento de que o Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> funciona de maneira diferenciada entre bordas e interior das chapadas, e que parte significativa do sistema atua sob regime de dupla porosidade, aponta para a necessidade de se considerar essa variabilidade em planos de exploração, estudos sobre a recarga e monitoramento.

A adoção de modelos de interpretação condizentes com a realidade geológica e a realização de testes mais bem estruturados são etapas fundamentais para garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade da utilização desse importante sistema aquífero.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada dos 24 testes de bombeamento realizados no Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> permitiu identificar padrões hidrodinâmicos distintos entre os poços localizados nas bordas e no interior das chapadas. Observou-se que diversos poços apresentaram parâmetros compatíveis com o comportamento de dupla porosidade, especialmente aqueles situados nas porções centrais das chapadas.

Nesses setores, também foram registradas as maiores vazões, o que reforça a correlação entre maior espessura de alteração, contribuição significativa da matriz porosa e maior produtividade. As médias gerais dos parâmetros transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e armazenamento (S) se mantiveram dentro da faixa esperada para aquíferos compostos, refletindo adequadamente o potencial hidrodinâmico do sistema.

Dessa forma, os resultados reafirmam a importância de adotar modelos de dupla porosidade na interpretação hidrodinâmica do Subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, 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, sugerindo 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.

O reconhecimento da natureza heterogênea do aquífero (com a existência de sistema de dupla porosidade), associado à identificação de zonas com maior potencial hídrico, é essencial para orientar ações de uso racional da água subterrânea, proteger os reservatórios subterrâneos, propor ações adequadas para sua gestão e garantir a segurança hídrica regional para o Distrito Federal, considerando a contribuição sustentável da exploração dos aquíferos para a complementação do abastecimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas de construção de poços que cederam os dados dos testes de bombeamento. Adicionalmente, agradecem os revisores e o editor, cujas sugestões otimizaram a versão original do manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no Distrito Federal**. Brasília, DF: ADASA, 2015. Disp. em: [https://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area\\_de\\_atuacao/recursos\\_hidricos/regulacao/resolucoes\\_estudos/recarga\\_artificial\\_aquiferos\\_df.pdf](https://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area_de_atuacao/recursos_hidricos/regulacao/resolucoes_estudos/recarga_artificial_aquiferos_df.pdf). Acesso em: 16 jun. 2025.
- ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Resolução nº 350, de 23 de junho de 2006**. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga prévia e de outorga do direito de uso dos recursos hídricos, em corpos de água de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e estados. Brasília, DF: ADASA, [2023]. Disp.em: [https://www.adasa.df.gov.br/images/storage/legislacao/Res\\_ADASA/2006/Resolucao%20n%20350\\_alterada%20Res.%2016.2023%20\(1\).pdf](https://www.adasa.df.gov.br/images/storage/legislacao/Res_ADASA/2006/Resolucao%20n%20350_alterada%20Res.%2016.2023%20(1).pdf). Acesso em: 16 jun. 2025.
- ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. 2018. **Avaliação de aquíferos favoráveis para complementação do abastecimento de água no Distrito Federal e locação de poços em regiões atendidas e não atendidas pelo sistema integrado de abastecimento**. Brasília, DF, 105 p.
- BARENBLATT, G.I.; ZHELTOV, I.P.; KOCHINA, I.N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics**, v. 24, n. 5, p. 1286-1303, 1960.
- 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, n. 4, p. 564-579, 1954.
- 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**, 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 - UnB. Relatório Técnico. v. I, Cap. IV, p.1-84. 1998.
- CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, **Revista Brasileira de Geociências**, v. 1, p. 41-48, 2004.
- CARMELO, A.C. **Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas**. Brasília. 179 p. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- COOPER Jr., 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.
- DASHTI, Z.; NAKHAEL, M.; VADIATI, M.; KARAMI, G.H.; KISI, O. A literature review on pumping test analysis (2000-2022). **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 30, n. 4, p. 9184-9206, 2023.
- FETTER, C.W. **Applied hydrogeology**. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.
- JACOB, C.E. On flow of water in an elastic artesian aquifer. **Transactions American Geophysical Union**, v. 21, n. 2, p. 574-586, 1940.
- KRUSEMAN, G.P. & DE RIDDER, N.A. **Analysis and evaluation of pumping test data**. 2nd. ed. Wageningen: ILRI, 1994.
- 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.
- MIGUEL, R.C.A. **Caracterização dos aquíferos da região da Mina Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero e propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. Brasília, DF, 2023. 97 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- MIRANDA, A.C.B. **Detalhamento da caracterização do subsistema Aquífero R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> no Distrito Federal: Bases para a gestão sustentável**. Brasília, 2025. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília,
- MOENCH, A.F. Convergent radial dispersion in a double-porosity aquifer with fracture skin: analytical solution and application to a field experiment in fractured chalk. **Water Resources Research**, v. 31, n. 8, p. 1823-1835, 1995.
- MOENCH, A.F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. **Water Resources Research**, v. 20, n. 7, p. 831-846, 1984.
- 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.
- NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications**. Washington, DC: National Academy Press, 1996.
- 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**, v. 35, n. 1, p. 103-119, 2021.
- SOUZA, M.T. **Fundamentos para gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal**. 94 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of well-using groundwater storage. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 16, n. 2, p. 519-524, 1935.
- WARREN, J.E. & ROOT, P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs. **Society of Petroleum Engineers Journal**, v. 3, n. 3, p. 245-255, 1963.

*Submetido em 26 de junho de 2025*

*Aceito para publicação em 20 de outubro de 2025*