

XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

ABORDAGEM EMPÍRICA DA TRANSMISSIVIDADE NA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM AQUÍFEROS NÃO GRANULARES

Thiago dos Santos Gonçalves¹; Luiz Rogério Bastos Leal²; Lucas de Queiroz Salles³; Hailton Melo da Silva⁴; Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira⁵

Resumo - Os aquíferos não granulares são derivados de rochas cristalinas ou cársticas que apresentam porosidade secundária. Estes conjuntos hidrolitotípicos apresentam-se em maior número de ocorrências na superfície do planeta, quando comparado aos aquíferos granulares. Sendo assim, é fundamental o conhecimento do seu comportamento hidráulico como uma ferramenta para sua melhor gestão. Este trabalho tem por objetivo diagnosticar e estimar o potencial produtivo de dez diferentes aquíferos não granulares, através do estudo da transmissividade. Dentro do universo de trabalhos estudados, os aquíferos cársticos representam o melhor potencial hídrico, seguido pelos aquíferos não granulares de natureza cristalina básica, e, com os piores potenciais, os aquíferos cristalinos ácidos.

Palavras chave: Modelos empíricos, transmissividade

Abstract - The Fissure aquifers are derived from crystalline or karstic rocks that have secondary porosity. These hidrolitotípicos sets have to be more comprehensive in the planet's surface when compared to the granular aquifers. This makes fundamental knowledge of its hydraulic behavior tool for better management. This study aims to diagnose and estimate the productive potential of ten different Fissure aquifers through the study of transmissivity. Within the universe of work-studied karst, aquifers represent the best water potential, followed by Fissure aquifers basic crystalline nature, and with the potential worst crystalline acid aquifers.

¹ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/nº Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637.. t.gon@outlook.com.

² Professor no Departamento de Geofísica. – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/nº Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637. lrogerio@ufba.br.

³ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/nº Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637. lucassales2008@gmail.com

⁴ Professor no Departamento de Geofísica. – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/nº Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637. hailton@ufba.br

⁵ Professor no Departamento de Oceanografia. – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/nº Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637 & TERRAQUATRO Geologia e Meio Ambiente Ltda. ricardo@terraquatro.com.br.

1.0 - Introdução

Com a crescente demanda e escassez dos recursos hídricos, torna-se importante o conhecimento do potencial hidrogeológico dos aquíferos não granulares, que engloba os aquíferos cársticos, fissurais e cristalinos básicas/ácidas. Contudo, para tais tipos de aquíferos os modelos analíticos para parâmetros hidráulicos apresentam elevadas distorções, justificando o uso de modelos alternativos para estimativa desses parâmetros. Logo, através de relações empíricas é possível estimar a transmissividade - T por meio da capacidade específica S_c .

A transmissividade é calculada através da relação direta entre a variação do rebaixamento em função do tempo, sob uma vazão constante. Quanto à capacidade específica, a mesma é estimada através da relação direta entre vazão e rebaixamento. Tais parâmetros são fundamentais para estimativas das potencialidades hídricas subterrâneas dos aquíferos de qualquer natureza.

Os modelos analíticos, que determinam a transmissividade, foram estabelecidos para sistemas aquíferos de natureza granular. Ou seja, em aquíferos fissurais os valores da transmissividade apresentam distribuições altamente heterogêneas. Sendo tal característica comum, nesses tipos de aquífero. Logo, para extrair parâmetros hidrodinâmicos nesses aquíferos é necessário recorrer às metodologias alternativas.

A necessidade em correlacionar esses dois parâmetros surgiu por Thomassom *et al.* (1960), onde foram desenvolvidas equações que estabelecem uma relação direta entre a capacidade específica (S_c) e a transmissividade (T). Além de Thomassom *et al.* (1960), outros pesquisadores trabalharam nesta questão, dentre eles, podemos destacar: Binsariti (1980), Clifton & Neuman (1982), Ahmed & Marsily (1987) utilizaram análises de regressão linear na correlação.

Existem duas formas distintas de estimar a transmissividade, seja através de relações analíticas ou empíricas. O modelo utilizado no presente trabalho será desenvolvido em função de relações empíricas. No entanto, os valores da transmissividade precisam ser estimados, onde se faz necessário o emprego de métodos analíticos. Assim construindo uma relação de dependência dos modelos empíricos com as relações analíticas.

Algebricamente, a transmissividade é diretamente proporcional à capacidade específica, essa relação pode ser obtida através da equação de Dupuit - Thiem trabalhadas por: Thomassom *et al.* (1960); Theis (1963); Brown (1963); Bradbury e Rothschild (1985); Razack e Huntley (1991); e, Huntley *et al.* (1992). Ainda se tratando de métodos analíticos, enfatizando os sistemas heterogêneos e anisotrópicos, destacam-se os trabalhos dos seguintes autores: Barenblett *et al.* (1960), Barker (1988), Douguerty *et al.* (1984), Gringarten e Ramey (1974), Gringarten (1974), Gringarten e Witherspoon (1972), Moench (1984), Moench (1988) e Warren (1963).

A evolução do conhecimento acerca do método proposto, mostra-se muito abrangente em escala global, sendo amplamente aplicado em regiões onde há uma baixa oferta e alta demanda dos recursos hídricos. Muitas das regiões citadas apresentam condições climáticas e hidrogeológicas. Contudo, vale ressaltar a necessidade em estabelecer modelos analíticos, sendo estes descritos com detalhe no subcapítulo 1.1, e, partindo do modelo analítico, a construção do modelo empírico descrito no subcapítulo 1.2.

1.1 Modelo Analítico

Para se estabelecer uma correlação entre T e Sc é necessário conhecer os valores de T pelos métodos analíticos. Logo, os modelos para determinar T serão descritos a seguir:

Considerando um aquífero confinado a equação de Dupuit – Thiem pode ser descrita como a razão entre a vazão – Q e o rebaixamento – s , representado pela equação abaixo:

$$s = Q/[2\pi T \cdot \ln(R/r)] \quad (1)$$

Onde, Q é a vazão;

s , o rebaixamento do nível piezométrico no poço;

R , o raio de influência; e,

r , o raio da boca do poço com eficiência máxima.

A equação acima desenvolvida por Thomasson et. al. (1960), pode ser revista introduzindo o termo capacidade específica (Q/s) para o cálculo da transmissividade da seguinte forma:

$$T = [1/2\pi \cdot \ln(R/r) \cdot (Q/s)] \quad (2)$$

Ou

$$T = C \cdot (Q/s) \quad (3)$$

Onde, C é uma constante relacionado as propriedades hidráulicas do aquífero.

As equações acima não consideram o efeito turbulento em poços. Portanto, havia a necessidade em considerar os fluxos de natureza turbulenta e laminar num mesmo poço. Sendo esta, descrita pela equação de Jacob (1947) como:

$$s = BQ + CQ^2 \quad (4)$$

Onde, B é o coeficiente de fluxo laminar e C o coeficiente de fluxo turbulento. Assim, as equações 1 e 2 são reescritas da seguinte maneira:

$$s = Q/[2\pi T \cdot \ln(R/r)] + CQ^2 \quad (5)$$

$$T = 1/[2\pi[(s/Q) - CQ] \cdot \ln(R/r)] \quad (6)$$

No caso de aquífero livre a equação de Dupuit - Forchheimer pode ser utilizada para expressar a relação entre capacidade específica e transmissividade:

$$H^2 - h^2 = Q/[\pi K \cdot \ln(R/r)] \quad (7)$$

Onde, H e h são níveis de água em função do raio de influência (R) e do raio do poço (r), respectivamente, e K a condutividade hidráulica do aquífero. Os valores de rebaixamento foram sugeridos por Jacob (1947), como:

$$S_c = s - s^2/H \quad (8)$$

Enquanto a equação 8 pode ser reescrita como equação de Thiem, um caso similar para aquífero confinados pode ser descrita como:

$$S_c = Q/[2\pi T \cdot \ln(R/r)] \quad (9)$$

Aplicando o mesmo procedimento, a relação entre transmissividade e capacidade específica pode ser obtida da seguinte maneira:

$$T = \{1/[2\pi \cdot \ln(R/r)]\} \cdot (Q/s) \quad (10)$$

A relação teórica entre a capacidade específica e a transmissividade para aquíferos livres e confinados em condições de alto trânsito derivam da aplicação da aproximação do método de Cooper – Jacob e as equações de não equilíbrio de Theis (Razack e Huntley, 1991), como na demonstração seguinte:

$$s = (2,3Q/4\pi T). \log[2,25Tt/r^2S] \quad (11)$$

Onde, t é o tempo decorrido desde o início do bombeamento, S é o coeficiente de armazenamento. A equação 11 pode ser reescrita em termos de capacidade específica como:

$$Q/s = 1/[(2,3/4\pi T). \log[2,25Tt/r^2S]] \quad (12)$$

Em aquíferos semiconfinados a transmissividade pode ser expressa usando o método do ponto de inflexão (Hantush, 1956), segue demonstração:

$$T = [Q.K_0(r/B)]/[2\pi.(h_0 - h)_{\max}] \quad (13)$$

Onde, K_0 é uma função de Bessel, conhecido como de ordem zero modificada da função de Bessel do segundo tipo; $(h_0 - h)_{\max}$ é o rebaixamento como ponto de inflexão, definido como a metade do rebaixamento máximo. Portanto, a relação entre capacidade específica e transmissividade pode ser escrita como:

$$T = [(1/2\pi.K_0(r/B).(Q/s)) \quad (14)$$

1.2 Modelo empírico

Métodos empíricos são construídos através de modelos de regressão linear entre dados pareados de transmissividade e capacidade específica. Tais métodos mostram-se vantajosos por estimar incertezas apresentadas em condições não ideais, dentre elas podemos citar condições de fluxo turbulento e anisotropias. A relação geralmente é definida transformando os valores da capacidade específica e transmissividade para o seu logaritmo, permitindo uma distribuição log normal (El – Naqa, 1994).

Para realizar a aproximação empírica é necessário:

 Compilar todas as informações de testes de aquífero;

 Determinar a capacidade específica e a transmissividade através dos testes;

 Usando a regressão linear, ajustar a curva nos pares plotados do log da transmissividade e log da capacidade específica; e,

 Calcular a incerteza através da regressão linear.

Uma vez compilados os dados pareados é possível determinar a transmissividade através de técnicas analíticas, conseqüentemente a capacidade específica pode ser determinada através do teste de aquífero. A partir da compilação dos dados é possível ajustar a curva através de uma reta de regressão, esta é representada pela seguinte equação:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_i \quad (15)$$

no caso presente,

$$\hat{Y} = \log(T1) \quad (16.a)$$

$$X_i = \log((Sc)_i) \quad (16.b)$$

$$b_1 = (SS_{xy}) / (SS_x) \quad (16.c)$$

$$SS_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i^2 \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i) \quad (16.d)$$

$$SS_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i)^2 \quad (16.e)$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (16.f)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (16.g)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (16.h)$$

Resolvendo b_0 e b_1 usando as equações 16f e 16c, conseqüentemente o log da transmissividade pode ser estimado diretamente pela equação 1. Logo, a equação 15 pode ser expressa da seguinte maneira:

$$T = (10^{b_0}) S_c^{b_1} \quad (17)$$

Depois de determinar a melhor curva, em função dos dados pareados, é possível determinar R^2 através de um modelo de regressão linear. O coeficiente é determinado através da equação abaixo:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\epsilon}}{SS_Y} \quad (18)$$

1.3 Aquíferos não granulares

Diferente dos aquíferos granulares, que apresentam porosidade associada aos vazios entre os grãos, os aquíferos fissurais apresentam padrão de armazenamento d'água em fraturas ou fendas. Comumente, essas fraturas se desenvolvem em rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas) por conta da baixa competência à deformação que essas rochas apresentam. Embora as rochas cristalinas representem a maioria dos aquíferos fissurais, rochas sedimentares silissiclásticas e carbonáticas ao serem submetidas num campo de tensão, podem apresentar-se fissuradas.

As rochas cristalinas podem ser divididas quanto sua composição química e mineralógica como ácidas e básicas. As rochas de caráter ácidas, apresentam predominantemente minerais de com maiores teores de sílica e K e Al. Já as rochas básicas são caracterizadas pela predominância em minerais compostos por Fe, Mg, Al e sílica. Essas diferenças químicas e mineralógicas conferem comportamentos reológicos distintos para esses dois grupos de rochas. Consequentemente, tais diferenças no padrão de deformação irão refletir no grau de porosidade secundária e produtividade desses dois aquíferos. De maneira geral, rochas básicas apresentam maior produtividade quando comparadas às ácidas. O croqui da figura 1, ilustra duas rochas cristalinas, tendo à esquerda uma rocha básica dobrada e fraturada e à direita uma rocha ácida apenas fraturada. As rochas de caráter básico são mais susceptíveis a deformação rúptil, e, assim, tendem a formar melhores aquíferos (SINGHAL e GUPTA, 2010).

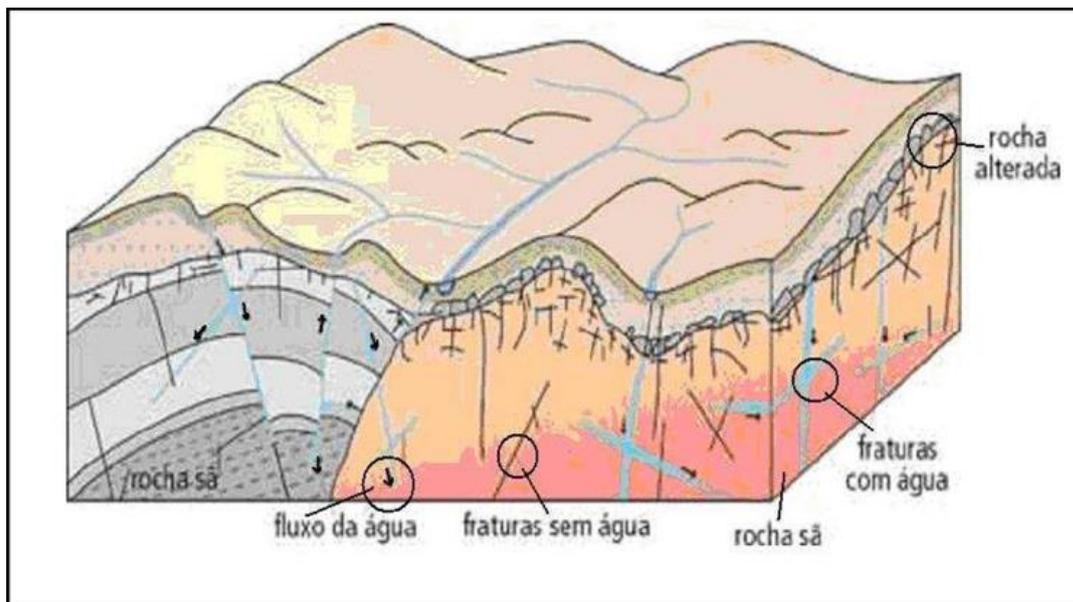


Figura 1. Modelo diagramático de aquíferos fissurais cristalinos básico e ácido.

Outro importante grupo de rochas que apresentam porosidade associada às fraturas são as rochas carbonáticas. Estas, além de serem susceptíveis aos fenômenos de faturamento, são vulneráveis ao processo de carstificação. Onde a rocha carbonática, ao ser exposta a ação de águas acidificadas (carbônicas, sulfúricas, dentre outros), tem sua porosidade aumentada, conferindo uma maior capacidade de reserva a este aquífero. O fenômeno de carstificação é comumente evidenciado em superfície por estruturas peculiares como dolinas, uvalas, torres calcárias e etc. Parte destas estruturas são representadas na figura 2.

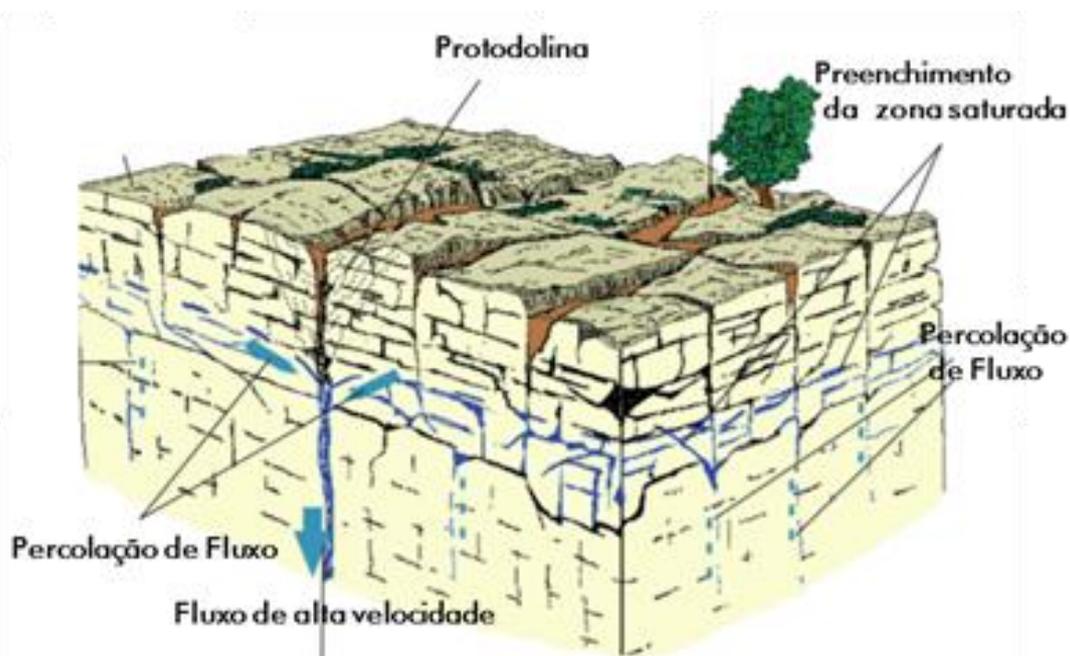


Figura 2. Esquema diagramático de aquífero fissural cárstico. Extraído de TREATISE ON GEOMORPHOLOGY

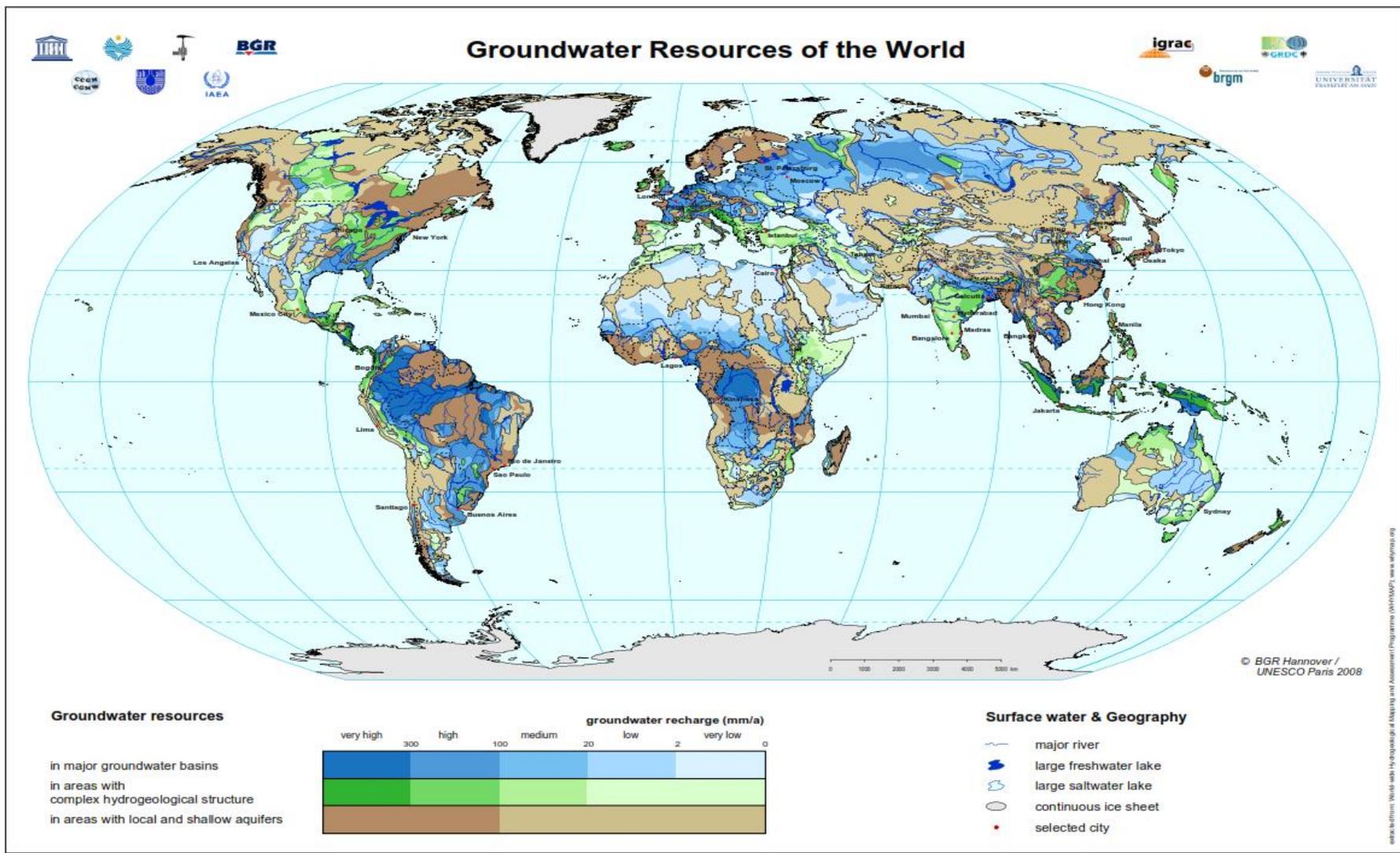


Figura 3.. Distribuição global dos principais domínios aquíferos.(UNESCO, 2008).

O mapa da figura 3, além de expor o predomínio em área dos aquíferos não granulares, possibilita associar a presença de grandes centros demográficos com a presença destes aquíferos. Um exemplo é notado na China, onde habitam cerca de 1,3 bilhões de habitantes e é sua superfície é predominantemente composta por rochas cristalinas.

Logo, é necessário a construção de modelos alternativos aos analíticos na busca de uma melhor correlação dos dados.

2. Objetivos

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca dos modelos empíricos utilizados para estimativa da transmissividade; e,
- Estimar os padrões de produtividade em função dos resultados apresentados, subdividindo-os em função da característica litológica do dado aquífero fissural.

3. Resultados

Para efeito comparativo, foram levantados dados de dez trabalhos científicos disponíveis em periódicos de grande circulação internacional. Os trabalhos aqui expostos foram elaborados com o propósito de definir a produtividade de aquíferos fissurais em termos da transmissividade dos respectivos aquíferos.

A tabela 1, sumariza esses estudos, destacando as informações relacionadas à equação do modelo empírico, na qual o coeficiente linear é representado como parâmetro de comparação entre as equações.

Diante da baixa população amostral não foi possível fazer um tratamento estatístico sobre os resultados dos artigos. Porém, a partir do subcapítulo 3.1, estes são representados individualmente. Permitindo assim, fazer análises individuais e em conjunto sobre o comportamento de cada domínio.

Tabela 1. Estimativa empírica da transmissividade para os aquíferos estudados diante de seus respectivos modelos analíticos.

Aquífer	Location	Specific capacity	Transmissiv	Empirical relation
Fractured batholith	San Diego, California	Constant-rate test	Cooper-Jacob	$T = 0.29(Sc)^{1.18}$
Sediment, fractured, basalt	Djibuti, Horn of Africa	Step-drawdown test	Cooper-Jacob, Boulton	$T = 3.64(Sc)^{0.938}$
Fractured rock	Man Danane, Ivory Coast	Step-drawdown test	Theis Recovery	$T = 0.33(Sc)^{1.30}$
Karst	NW-Ohio	Constant-rate test	Theis Recovery	$T = 3.24(Sc)^{0.81}$
Karst	Edwards, Texas	All steps from step test	Cooper-Jacob	$T = 0.76(Sc)^{1.05}$
Karst	Floridan aquifer, Florida	All steps from step test	Cooper-Jacob	$T = 1.23(Sc)^{1.05}$
Karst	Slovenia	Constant-rate test	Dupuit-Thiem	$T = 2.39(Sc)^{1.07}$
Volcanic island	Jeju, Korea	Constant-rate test	Theis, Cooper-Jacob	$T = 0.45(Sc)^{1.05}$
Volcanic island	Jeju, Korea	Constant-rate test	Theis Recovery	$T = 0.99(Sc)^{0.89}$
Karst	Ammam - Wadi Sir aquifer, Jordan	Constant-rate test	Hantush	$T = 1.81(Sc)^{0.917}$

Para efeito de comparação, o gráfico da figura 4 representa o potencial produtivo em função do coeficiente de correlação linear de cada equação. Sendo este gráfico separado por três grupos distintos de rochas fissurais. Nesses termos, as rochas fissurocarsticas apresentaram as melhores produtividades seguidas pelas rochas cristalinas básicas, e, com valores muito inferiores, as cristalinas ácidas.

Um fato interessante ocorrido nesta amostragem é o alto valor do coeficiente de correlação para a equação de um dos aquíferos cristalino básico. Onde é verificado uma elevada assimetria com relação aos demais.

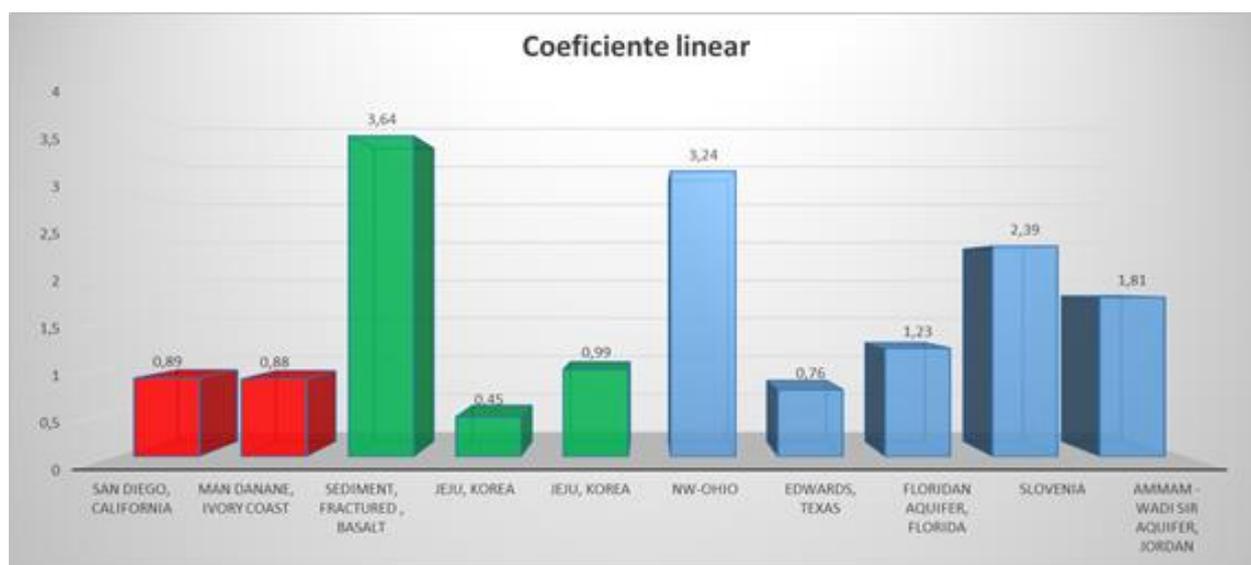


Figura 4. Representação histogramática dos valores de coeficiente linear como estimadores de produtividade.

A figura 5, representa a distribuição espacial dos estudos revisados neste trabalho, onde fica evidenciada uma maior aplicação do método para aquíferos cristalinos no hemisfério norte.

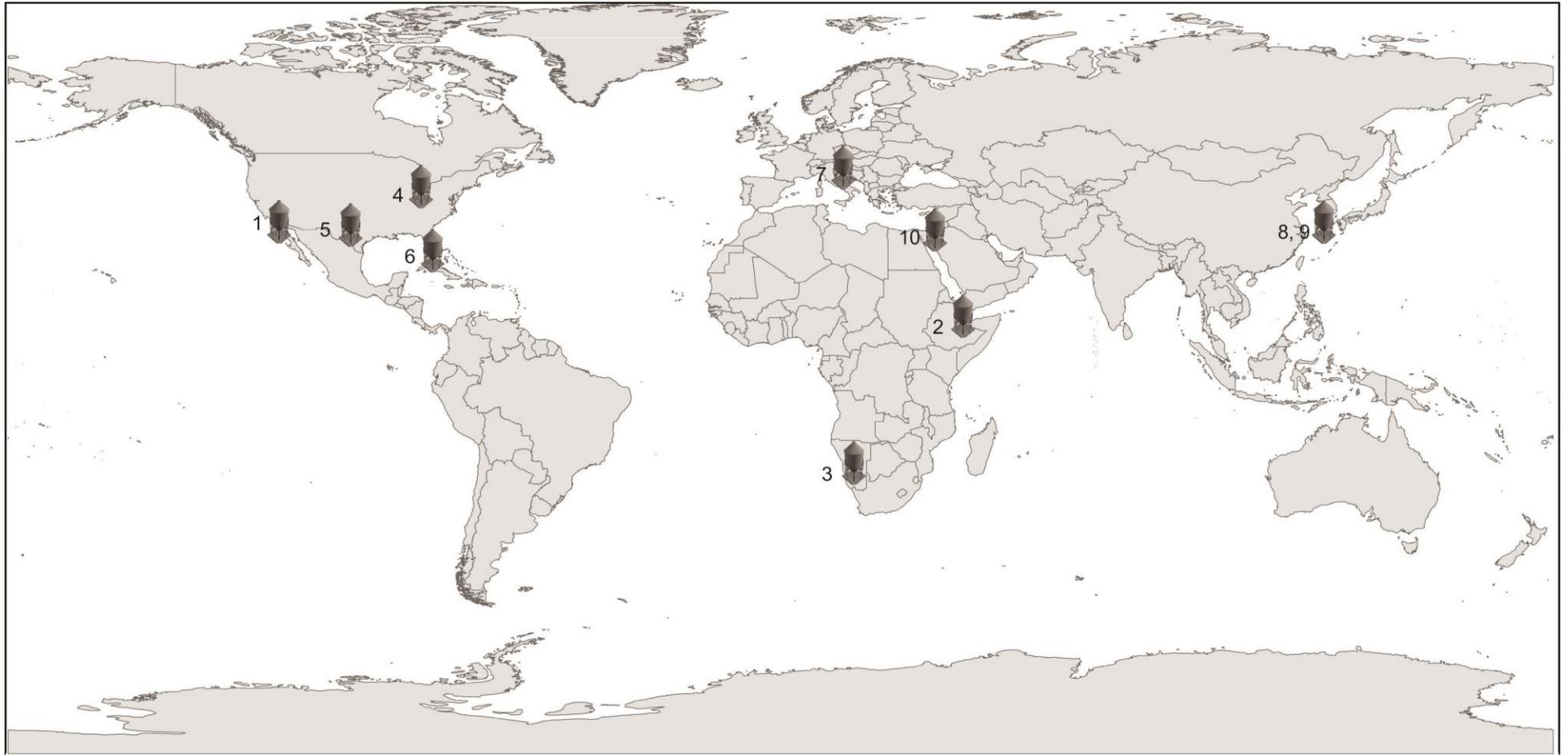


Figura 5. Distribuição global dos aquíferos não granulares modelados segundo a abordagem empírica da transmissividade em relação à capacidade específica.

3.1 *Aquíferos cristalinos ácidos*

Os aquíferos cristalinos ácidos, representados em vermelho na figura 6, apresentaram valores de produtividade baixos com relação aos demais aquíferos estudados. Esta característica é comum para os aquíferos cristalinos ácidos fraturados. No estudo de Razack e Lasm (2000), através do mapeamento das fraturas preenchidas por água, observou-se que tais fraturas não atingiam profundidades maiores que 100 metros. Ou seja, além do reservatório encontrar-se limitado apenas às fraturas preenchidas por água, sua profundidade, em geral, não ultrapassava os 100 metros.

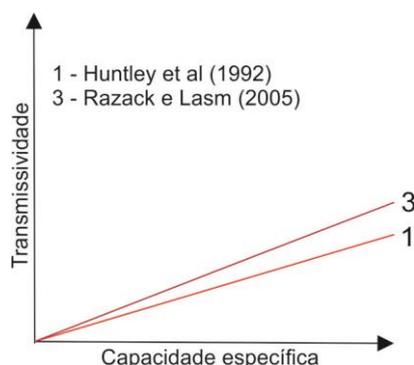


Figura 6. Modelo empírico para aquíferos cristalinos ácidos.

Mesmo apresentando diferenças pouco significativas, expresso pelo valor do coeficiente linear da figura 4, ao plotar os modelos gráficos (figura 6) das relações empíricas de cada estudo, o sistema aquífero cristalino ácido da Costa do Marfim, apresentam potencial produtivo superior ao sistema aquífero cristalino batólito São Diego, EUA.

3.2 *Aquíferos cristalinos básicos vulcânicos*

Diferentemente dos aquíferos cristalinos ácidos, os cristalinos básicos vulcânicos podem apresentar além da porosidade secundária, associada à sua trama deformacional rúptil, porosidade primária relacionada aos vazios comuns em rochas vulcânicas. Assim, no presente estudo é possível observar estas diferenças na porosidade com efeito na produtividade. As rochas do sistema aquífero Jeju - Coreia do Sul, são formadas pela associação de rochas vulcanoclásticas, datadas do Holoceno, onde não foi submetido a uma quantidade de *stress* suficiente para caracterizar uma trama deformacional rúptil. Assim, essas rochas apresentam uma elevada porosidade primária, no entanto, a porosidade não se encontra conectada por fraturas, resultando numa baixa transmissividade.

A formação das unidades de rochas vulcânicas do sistema aquífero cristalino do Djibuti, estão relacionadas aos movimentos do bloco Arabo-Nubiano, datados em 25 – 30 M.a. No entanto, os eventos deformacionais que deram origem a este complexo de rochas básicas ainda estão presentes. Com isso, uma densa rede de falhas e fraturas vem sendo formada ao longo dos milhões

de anos. Onde a porosidade primária, associada às vesículas das rochas básicas são conectadas através de fraturas, aumentando assim o potencial produtivo do aquífero e colocando o mesmo como o mais importante, em termos de produtividade, dentre o conjunto de casos aqui analisados. Logo, vale ressaltar que somente a alta porosidade nas rochas não as tornam um bom aquífero, é preciso considerar a importância das fraturas no potencial produtivo desses reservatórios. O gráfico da figura 7 apresenta os três sistemas aquíferos básicos tratados no presente estudo, em termos de relação empírica da transmissividade com a capacidade específica, onde se observa um forte potencial do sistema aquífero do Djibuti em relação aos demais.

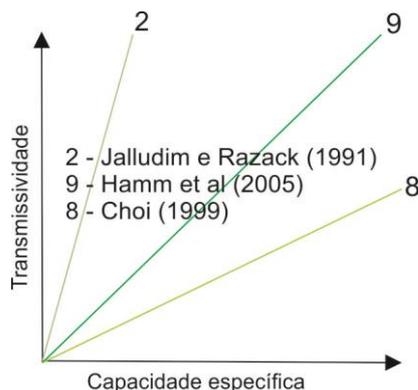


Figura 7. Modelo empírico para aquíferos cristalinos básicos.

3.3 Aquíferos cársticos

O sistema aquífero cárstico do NW de Ohio – EUA, com idades que variam entre o Siluriano e o Devoniano, apresentou os melhores resultados para estes tipos aquíferos. Quanto aos regimes deformacionais, estas rochas encontram-se altamente fraturadas, intensificando assim, os processos de dissolução das rochas.

Seguindo na ordem decrescente de produtividade, está o sistema aquífero cárstico da Slovênia. Este aquífero, constitui-se por rochas depositadas em ciclos de sedimentação que variam do triássico ao cretáceo, formando um espesso pacote de rochas carbonáticas com 7km de profundidade (OGORELEC *et al.* 2000). Embora as rochas carbonáticas deste aquíferos apresentem idades superiores de formação, os efeitos da tectônica rúptil não foram suficientemente intensos para a geração de um sistema de estruturas rúpteis, que permitam a percolação d'água. Logo, a carstificação neste sistema é controlada pelas diferenças nas fácies correspondentes ao acamadamento.

Com padrões de produtividade intermediários, está o aquífero Ammam Wadi – Jordânia. As unidades litológicas correspondentes a este aquífero, apresentam idades variando do neocretáceo ao quaternário. Sendo a atuação da tectônica rúptil concomitante com a formação dessas rochas até o presente momento. Isso faz deste aquífero um importante reservatório para toda esta região.

Segundo El Naqa (1993), as zonas mais fraturadas neste aquífero são as que apresentam as maiores produtividades, sendo este resultado expresso em termos de transmissividade e capacidade específica.

Apresentando os resultados menos expressivos para os sistemas aquíferos cársticos, estão os Aquíferos Edward e Floridan. Estes apresentam contextos geológicos semelhante, com idade de deposição de suas rochas iniciadas no cretáceo e finalizadas no eoceno (BREWSTER-WINGARD *et. al* 1997). Apresentam uma trama estrutural rúptil complexa e densa, onde também é notada a alta intensidade da carsticação pela presença de grandes cavidades. Embora haja presença de vazios constituindo potenciais aquíferos. O atual nível de base do sistema aquífero, para os dois casos, encontra-se em níveis profundidade ainda não alcançados pelos processos de carsticação observados em superfície. Porém esses aquífero constituem importantes reservatórios em escala local e regional.

As relações empíricas plotadas a partir da reta, representada na figura 8, mostraram semelhança em relação a análise histogramática da figura 6.

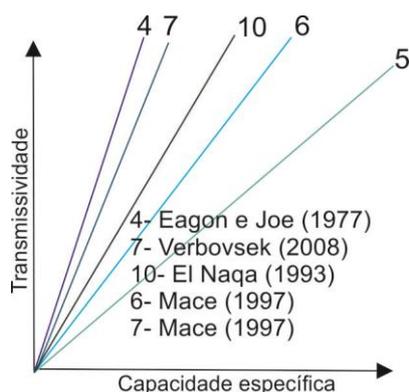


Figura 8. Modelo empírico para aquíferos cársticos.

3. Conclusões

Com base na análise de dez artigos publicados em periódicos de circulação internacional, buscou-se realizar uma análise comparativa dos métodos empíricos para estimativa da transmissividade em aquíferos não granulares. Onde, foram determinados três domínios, fazendo referências aos aquíferos: cristalinos ácidos, cristalinos básicos vulcânicos e cársticos.

Os aquíferos cristalinos ácidos apresentaram os menores valores de coeficiente de linear. Ao observar o desenvolvimento das retas, em função da equação estabelecida pela relação empírica da Transmissividade com a Capacidade Específica, pode-se confirmar o baixo potencial com relação aos demais sistemas aquíferos.

Quanto aos aquíferos cristalinos básicos vulcânicos, estes apresentaram tanto porosidade primária quanto porosidade secundária. Entretanto, observou-se para estes aquíferos, quando há predominância na porosidade primária com relação à secundária, ocorre uma diminuição no potencial hídrico. Definindo assim a relação direta entre a conectividade dos sistemas de porosidade, com a transmissividade do aquífero.

Dentre os 10 trabalhos analisados, cinco estão relacionados com os aquíferos cárstuicos, que apresentaram o melhor potencial hídrico, dentre os três aquíferos não granulares. Os fatores que controlam a produtividade nesses sistemas, estão diretamente associados à idade de exposição dessas rochas, densidade de fraturamentos, intensidade da carstificação, e, como notado por Mace (1997), a flutuação do nível de base do sistema.

Contudo, vale ressaltar que este trabalho realiza uma abordagem comparativa. Para construção de modelos mais consistentes e definições de padrões empíricos seria necessário trabalhar em um número maior de modelos desta natureza.

Referências

- AHMED, S.; D. MARSILY, G. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research* Vol. 23, n°9, p. 1717-1737, 1987.
- BARKER, J.A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, *Water Resources Research*, vol. 24, no. 10, pp. 1796-1804, 1988.
- BARENBLATT, G.I., ZHELTOV, I.P. e I.N. KOCINA. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks (strata), *J. Appl. Math. Mech. Engl. Transl.*, vol. 24, pp. 1286-1303, 1960.
- BINSARITI, A. A. Statistical analysis and stochastic modeling of the Cortaro aquifer in Southern Arizona, 243p. *Dissertação- Universidade do Arizona*, 1980.
- CHOI, B.S., 1999. Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island. *J. Korean Soc. Groundwater Environ.* 6 (4), 180–187.
- CLIFON, P. M.; NEUMAN, S. P. *Water Recourse Research*, vol. 18, n° 4, p. 1215-1234, 1982.
- DOUGHERTY, D.E and D.K. Babu. Flow to a partially penetrating well in a double- porosity reservoir, *Water Resources Research*, vol. 20, no. 8, pp. 1116-1122, 1984.
- EL-NAQA, A. Estimation of transmissivity from capacity data in fractured rock aquifer. *Environmental Geology*, vol. 23, n°1, p.73-80, 1994.
- G.LYNN BREWSTER-WINGARD; THOMAS M. SCOTT; LUCY E. EDWARDS; SUZANNE D. WEEDMAN; KATHLEEN R. SIMMONS. Reinterpretation of the peninsular Florida Oligocene: an integrated stratigraphic approach. *Sedimentary Geology*, Volume 108, Issues 1–4, Pages 207-228, February 1997.
- GRINGARTEN, A.C. AND H.J. RAMEY. Unsteady state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry, *SPE Journal*, pp. 413-426, 1974.
- GRINGARTEN, A.C., RAMEY, H.J., JR. AND R. RAGHAVAN. Unsteady-state pressure distributions created by a well with single infinite-conductivity vertical fracture, *SPE Journal*, pp. 347-360, 1974.
- HAMM, S. Y.; CHEONG, J. Y.; JANG, S.; JUNG, C. Y.; KIM, B. S. Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, 310, pg 111 - 121, 2005.
- HUNTLEY, D., NOMMENSEN, R., STEFFEY, D., 1992. The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured rock aquifers. *Ground Water* 30 (3), 396–402.
- HUNTSAN, M.S. Analysis of data from pupping test in leaky aquifers. *American Geophysical Union Transaction*, vol. 37, 1956, p. 702-714.
- JACOB, C. E. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Trans Am Soc Civil Eng*, 112:1047-1047, 1947.
- JALLUDIN, M., RAZACK, M., 2004. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeol. J.* 12, 159–170.

- MACE, R. E. Estimating transmissivity using specific data. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, v. 01, p. 01-44, 2001.
- MACE R. E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. *Ground Water* 35(5):738–742 (1997).
- MOENCH, A.F.. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, vol. 20, no. 7, pp. 831-846, 1984.
- MOENCH, A.F. The response of partially penetrating wells to pumpage from double-porosity aquifers, *Proceedings of the International Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks*, Atlanta, GA, May 16-18, 1988.
- RAZACK, M.; HUNTLEY, D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. *Ground Water*, vol. 29, n° 6, p. 856-861, 1991.
- RAZACK M.; LASM T. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 325 (2006), p 164 - 178.
- SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R.P. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. DOI 10.1007/987-90-481-8799-7_8, Springer Science + Business Media B.V. 2010.
- SRIVASTAV, S. K.; Lubczynski, M. W.; Biyani, A. K. On aquifer properties, ground water abstraction and recharge in Doon Valley, Uttaranchal. *Bhujal News: Special Issue-Uttaranchal 21* (in press), 2006.
- THEIS, C. B. V. Estimating the transmissivity of a water-table aquifer from the specific capacity of a well. *US Geol Surv Water Suppl, Surv Water Suppl*, 1963.
- THOMASSON, H. J.; OMISTEAD, F. H., LE ROUX, E. R. Geology water resources, and usable groundwater storage capacity of part of Solano Country, CA. *US Surv Water Suppl, Paper 1464-693*, 1960.
- WARREN, J.E. AND P.J. ROOT, 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs, *SPE Journal*, vol. 3, pp. 245-255.
- UNESCO. *Generalised global groundwater map*, ed. 2008
- VERBOVSEK, T. Estimation of transmissivity and hydraulic conductivity from specific capacity and specific capacity index in dolomite aquifers. *Journal of Hydrology*, 13:817-823, 2008.