

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE UM AQUÍFERO ALUVIONAL NO SEMI-ÁRIDO

Marco Aurelio Holanda de Castro¹; Walter Martins Ferreira Filho¹; Gilberto Mobus² & Luciano Alvaro Maia Gomes²

Resumo - A exploração racional e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos requer que sejam realizadas, antes do uso real desses aquíferos, simulações que possam nos indicar o comportamento dos aquíferos quando submetidos aos vários tipos de bombeamento e recarga reais. Tais simulações atualmente são feitas através de Modelos Computacionais Numéricos, os quais exigem um conhecimento preciso de características hidrogeológicas dos aquíferos, tais como Condutividade Hidráulica (principal característica), Coeficiente de Armazenamento e Retenção específica. Dentro do Projeto RECOPE (Redes de Cooperação em Pesquisa), Sub-Rede 3, apoiado pela FINEP, está inserido o Projeto “MANEJO INTEGRADO DOS RECURSOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS ALUVIONAIS”, o qual se consiste em um projeto ambicioso de estudo detalhado do uso conjunto dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais visando otimizar o manejo desses recursos, sob a coordenação de professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. A área de estudo desse projeto está situada no Município de Ibicuitinga, estado do Ceará-Brasil, sendo composta de um Reservatório Superficial denominado “Chile” e do aquífero aluvional situado imediatamente a jusante do reservatório (ao longo do rio Palhano). Uma das tarefas desse projeto é a simulação computacional de diversas magnitudes de bombeamento e recarga do aquífero, visando otimizar a extração do aquífero e o uso da água do reservatório superficial. Para tanto, como vimos, nós necessitamos determinar com precisão as características hidrogeológicas do aquífero. Visando este objetivo, dentro do projeto citado, foi firmado um convênio com a FUNCEME (Fundação Cearense de

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Centro de Tecnologia – Campus do Pici, Bloco 713 - Caixa Postal nº 6018, CEP 60451-970 – Fortaleza - CE, Brasil Fone: (85) 288-9623 e-mail: marco@ufc.br

Meteorologia e Recursos Hídricos) do governo do estado do Ceará par a, entre outras tarefas realizadas em parceria com a Universidade Federal do Ceará, realizar testes de bombeamento e testes de recuperação visando determinar as características já citadas. Este trabalho apresenta os resultados desta pesquisa, comparando os resultados de permeabilidade obtidos através dos testes de bombeamento e dos testes de recuperação.

Palavras-chave - Permeabilidade, Aquífero Aluvional, Parâmetros Hidrogeológicos.

INTRODUÇÃO

A exploração racional e sustentável dos recursos hídricos se torna cada vez mais importante atualmente, tendo em vista o aumento da população mundial. Tal exploração assume vital importância especialmente em regiões apresentam um desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água devido a pluviosidade irregular e/ou altas taxas de evaporação como é o caso do nordeste brasileiro. Quando se fala em recursos hídricos, normalmente é pressuposto tratar-se apenas dos recursos hídricos superficiais (Rios, Lagos, etc.). Tal percepção pode levar a importantes erros na avaliação da quantidade e qualidade dos recursos hídricos de uma determinada região visto que nesse caso a água subterrânea é desprezada. Normalmente os recursos hídricos são ligados apenas aos superficiais devido ao fato de serem visíveis e prontamente exploráveis. Entretanto, especialmente em regiões com altas taxas de evaporação, como é o caso do nordeste brasileiro é fundamental uma investigação sobre os modos de se armazenar água e suas eficiências.

Uma das medidas tomadas historicamente pelo governo federal e governos estaduais no nordeste tem sido a construção de reservatórios superficiais (açudes) sem nunca ter havido um questionamento importante sobre a eficiência deste tipo de armazenamento de água tendo em vista as perdas por evaporação. Tais perdas afetam não só a quantidade de água disponível como também a qualidade desta água, podendo fazer com que os parâmetros de qualidade desta água (especialmente a salinidade) atinja valores intoleráveis para o consumo humano. Várias medidas foram propostas visando a diminuição da evaporação de açudes sem que se tenha chegado a resultados que validem tais medidas como eficazes. É necessária, então, uma proposta, para regiões

² FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) – Av. Rui Barbosa, 1246, Aldeota,

semelhantes ao Nordeste do Brasil, de mecanismos alternativos de armazenamento de água. A água subterrânea pode ser uma dessas alternativas. A principal vantagem é que a evaporação nos aquíferos é praticamente nula. Tal vantagem se reflete não só na conservação de uma quantidade garantida de água para os períodos de estiagem, mas também na manutenção da qualidade desta reserva, visto que não havendo evaporação considerável, os parâmetros de qualidade de água subterrânea tendem a se manter constantes, ou, pelo menos não tendem a não variarem rapidamente. No caso de reservatórios superficiais como os açudes, a quantificação da água disponível depende apenas do conhecimento de características geométricas (topografia, batimetria e nível d'água) do açude. Entretanto, quando se trata de água subterrânea, além da determinação da topografia da área onde está inserida o aquífero e do conhecimento do nível d'água, a determinação da quantidade de água disponível depende do conhecimento da geologia da área (através de um levantamento geofísico) e também do conhecimento de parâmetros hidrogeológicos de cada camada do solo já identificada pelo levantamento geofísico. Entre esses parâmetros hidrogeológicos, os principais são: Condutividade Hidráulica (principal característica), Coeficiente de Armazenamento e Retenção específica.

Nós podemos concluir então que as duas razões pelas quais os aquíferos são bem menos usados como reserva de recursos hídricos é que, neste caso, o escoamento é mais complexo do ponto de vista hidrodinâmico e para se quantificar a água subterrânea disponível, muito mais parâmetros devem ser conhecidos quando comparado aos reservatórios superficiais. Entretanto, principalmente em regiões como o Nordeste do Brasil, devido ao problema da alta evaporação, os aquíferos não podem ser desprezados, pois, em alguns casos, quando a estiagem atinge seus valores mais críticos, os aquíferos são a única fonte hídrica disponível. Desta forma, nós iremos abordar as principais características dos aquíferos as quais são necessárias para a quantificação e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Este trabalho apresenta as características hidrogeológicas de um aquífero aluvial situado ao longo do rio Palhano, Município de Ibicuitinga – CE, obtidas através de testes de bombeamento, usando os Métodos de Dupuit-Thiem (regime permanente) e Neuman (regime transitório), além de resultados de permeabilidade obtidos através de testes de Recuperação (“Slug tests”).

LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DO PROJETO

O aquífero a ser estudado situa-se no município de Morada Nova. O aquífero situa-se ao longo do Rio Palhano, afluente da margem esquerda do rio Jaguaribe, limitando à montante pelo açude Chile e à jusante por barragem subterânea experimental do Palhano. A área experimental pode ser localizada e identificada através das figuras 1 e 2:

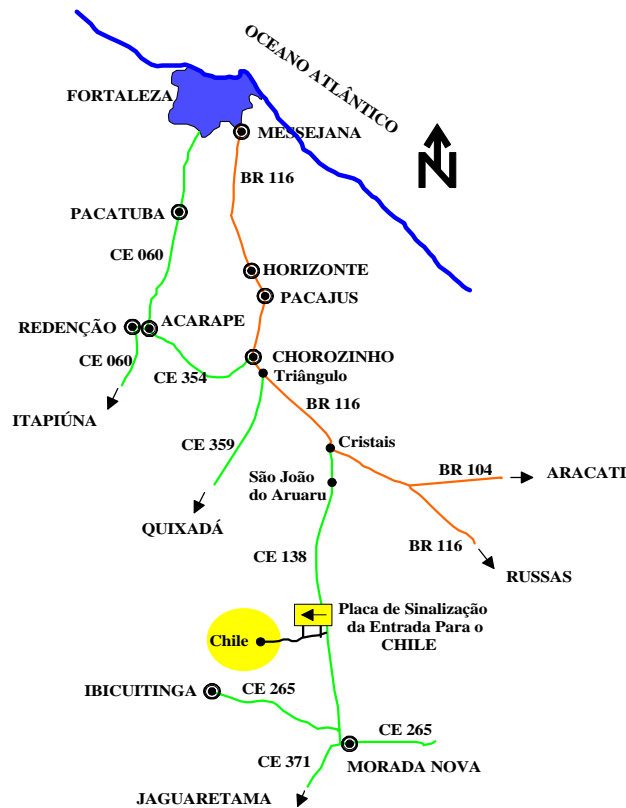


Figura 1: Localização da área do Projeto. (ver Leite et al, 1999).

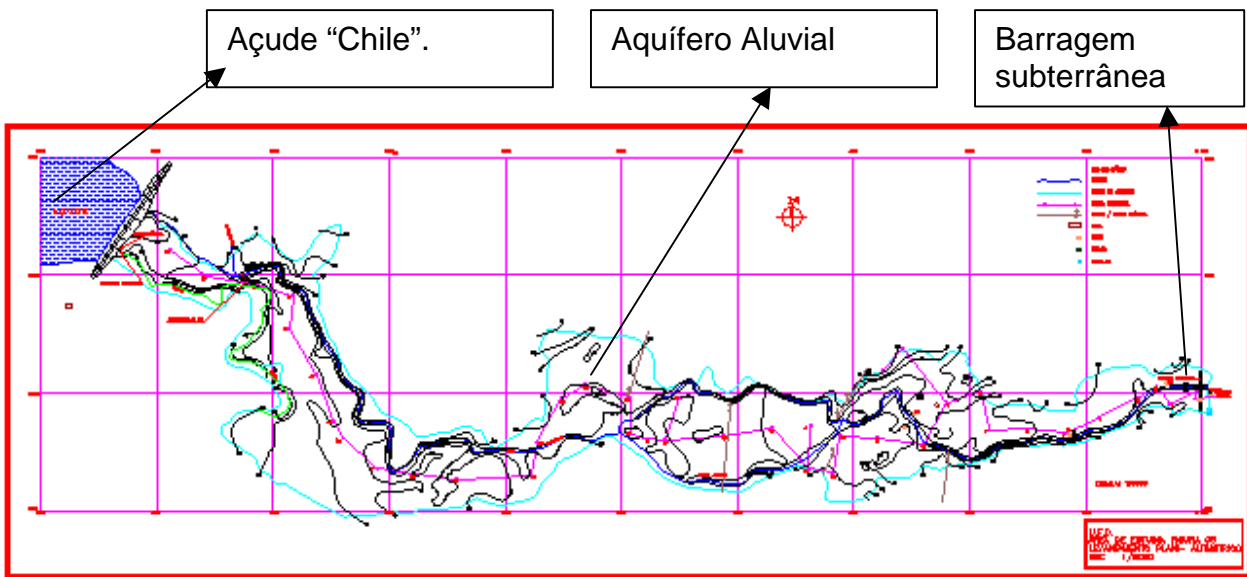


Figura 2 - Mapa do Aquífero.

BATERIAS USADAS NO TESTE DE BOMBEAMENTO

Foram usadas duas baterias para o teste de bombeamento. Cada uma composta de 01 (um) poço de bombeamento e 04 (quatro) piezômetros. Elas foram denominadas “Cajueiros” e “Barro”, têm a seguinte formação de poço e piezômetros:

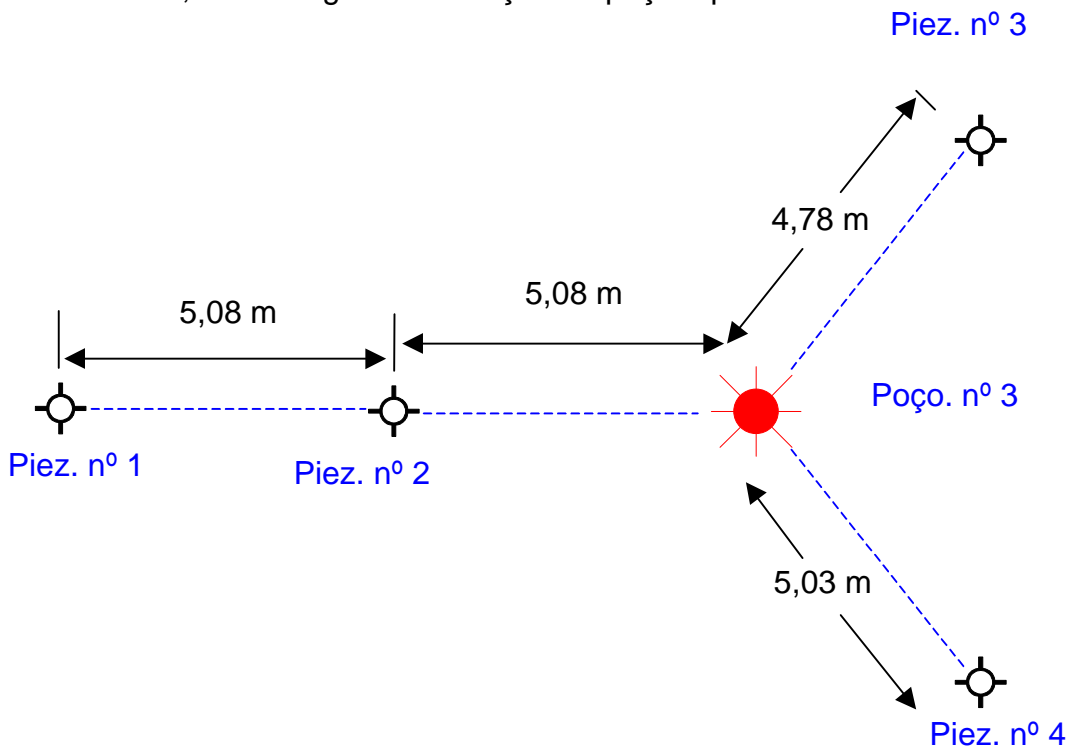


Figura 3: Bateria de Bombeamento “Cajueiros”.

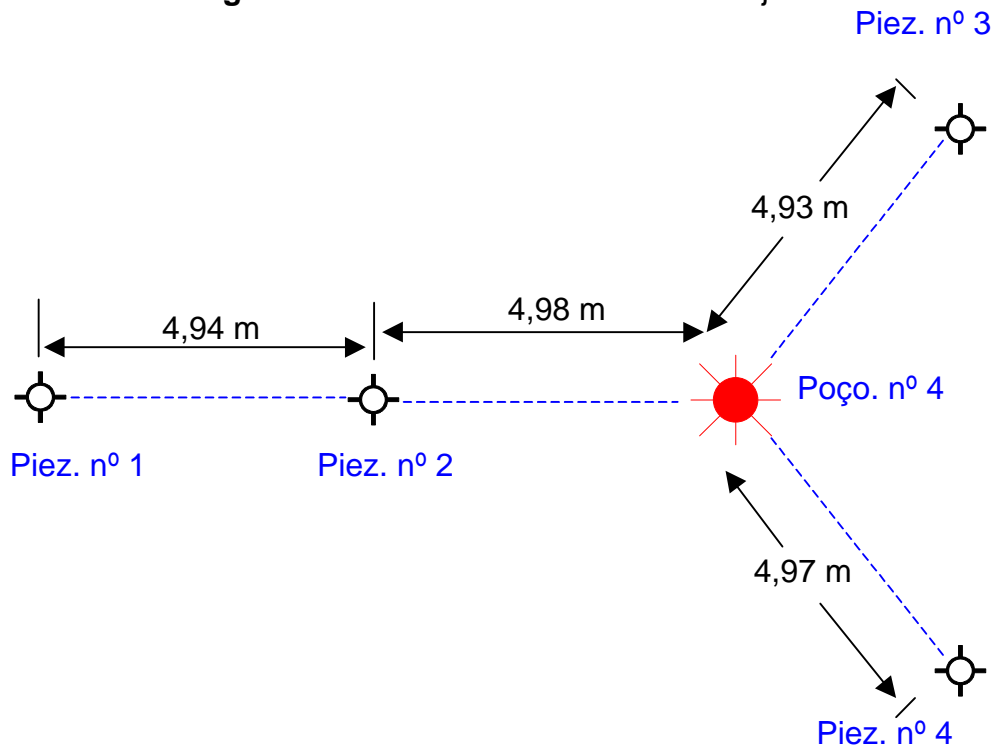


Figura 4: Bateria de Bombeamento “Barro”.

DISPOSITIVO USADO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Foi usado um Escodador de Orifício Circular. Para maiores esclarecimentos sobre o funcionamento do Escodador de Orifício Circular, consultar Feitosa (1996).

Os resultados de Medição de vazão foram:

Período de realização dos testes de Bombeamento: 18/10/99 a 22/10/99

Tabela 1: Resultados de Medição de Vazões:

POÇO 3 (CAJUEIROS)	POÇO 4 (BARRO)
VAZÃO: 2,52 m ³ /h	VAZÃO: 1,9 m ³ /h
Tempo de Bombeamento: 8h e 45min	Tempo de Bombeamento: 5h e 40min

OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS ATRAVÉS DOS TESTES DE BOMBEAMENTO – REGIME PERMANENTE, MÉTODO DE THIEM.

Neste caso nós devemos assumir as seguintes condições:

O rebaixamento estabilizou e permanece constante (regime Pseudo-Permanente). Além disso, assumimos simetria radial no problema. Neste caso, a equação diferencial que rege o problema é:

$$\frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} = 0 \quad (1)$$

onde h é o potencial ou carga hidráulica e r é a distância em relação ao poço de bombeamento. Assim a deve-se usar a seguinte equação para se obter o valor da permeabilidade (para maiores detalhes, consultar Fetter, 1994):

$$K = \frac{0.366 Q}{h_0 \left(s_1 - \frac{s_1^2}{2h_0} \right) - \left(s_2 - \frac{s_2^2}{2h_0} \right)} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

onde :

K = Coeficiente de Permeabilidade.

Q = Vazão de bombeamento.

s₁ = Rebaixamento estabilizado no piezômetro 1.

s₂ = Rebaixamento estabilizado no piezômetro 2.

r₁ = Distância do poço 1 ao poço de bombeamento.

r₂ = Distância do poço 2 ao poço de bombeamento.

Os resultados, para a bateria de poços “Barro” foram :

Tabela 2: Valores do Coeficiente de Permeabilidade segundo o Método de Thiem, para a bateria de Poços “Barro”:

Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)	Piezômetro 1	Piezômetro 1	Piezômetro 3	Piezômetro 4
		2,38 x 10 ⁻²	2,38 x 10 ⁻²	2,38 x 10 ⁻²

e a para a bateria de poços “Cajueiros” , os resultados foram:

Tabela 3: Valores do Coeficiente de Permeabilidade segundo o Método de Thiem, para a bateria de Poços “Cajueiros”:

Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)	Piezômetro 1	Piezômetro 1	Piezômetro 3	Piezômetro 4
		8,00 x 10 ⁻²	8,00 x 10 ⁻²	8,00 x 10 ⁻²

OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS ATRAVÉS DOS TESTES DE BOMBEAMENTO – REGIME TRANSIENTE – MÉTODO DE NEUMAN.

Considerando que o aquífero aluvial em estudo deve ser considerado, para efeito de modelamento e obtenção dos parâmetros hidrogeológicos, como um aquífero livre, nós devemos usar uma Metodologia como a de Neuman apropriada para a fase transiente (dependente do tempo) em aquíferos livres.

Esta metodologia pode ser aplicada a aquíferos livres, onde ocorre bombeamento do tipo:

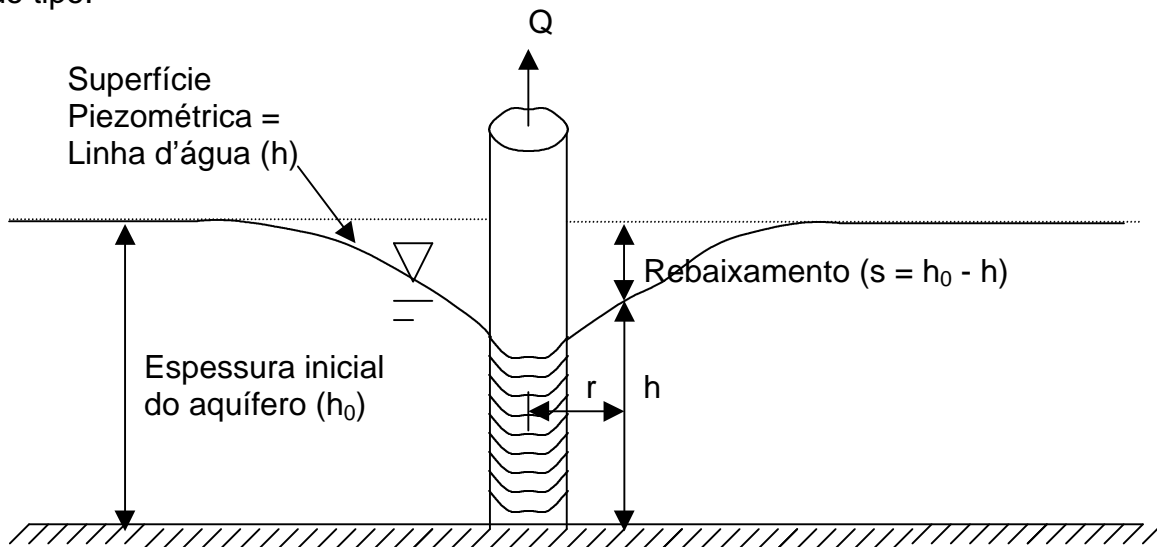


Figura 5: Esquematização de um poço de bombeamento.

A equação que rege o problema descrito pela figura 5 é:

$$K_r \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{K_r}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + K_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

onde:

h = Espessura saturada do aquífero.

r = Distância do ponto ao poço de bombeamento.

z = Coordenada Carteziana vertical.

S_s = Coeficiente de Armazenamento específico.

K_r = Condutividade hidráulica radial (ou horizontal).

K_v = Condutividade hidráulica vertical.

t = Tempo.

A solução para a equação (3) (Método de Neuman) é dada por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B) \quad (4)$$

onde T = transmissividade = $h_0 K_r$.

e $W(u_A, u_B)$ é a função de poço para aquíferos livres (Ver Fetter, 1994), onde

$u_A = \frac{r^2 S}{4 T t}$, é obtido através do ajuste dos dados de rebaixamento vs. tempo à curva de

Theis usando dados do início do bombeamento, quando o aquífero livre libera água através de mecanismos iguais aos de aquíferos confinados e o fluxo é predominantemente horizontal. Para visualização do ajuste para u_A , ver figura 6. Através de u_A podemos determinar o valor de S (Coeficiente de armazenamento = $S_s h_0$) e T .

$u_B = \frac{r^2 S_y}{4 T t}$, é obtido através do ajuste dos dados de rebaixamento vs. tempo à curva de

Theis usando dados da fase final do bombeamento, quando o aquífero livre libera a maior parte da água através de drenagem dos poros e o fluxo é predominantemente vertical. Para visualização do ajuste para u_B , ver figura 6. Através de u_B podemos determinar usado para determinar o valor de S_y (retenção específica) e T .

$\beta = \frac{r^2 K_v}{h_0^2 K_r}$ é um coeficiente que é obtido através do ajuste descrito acima. Através do

conhecimento de β e de K_r (obtido através de u_A), nós podemos determinar K_v .

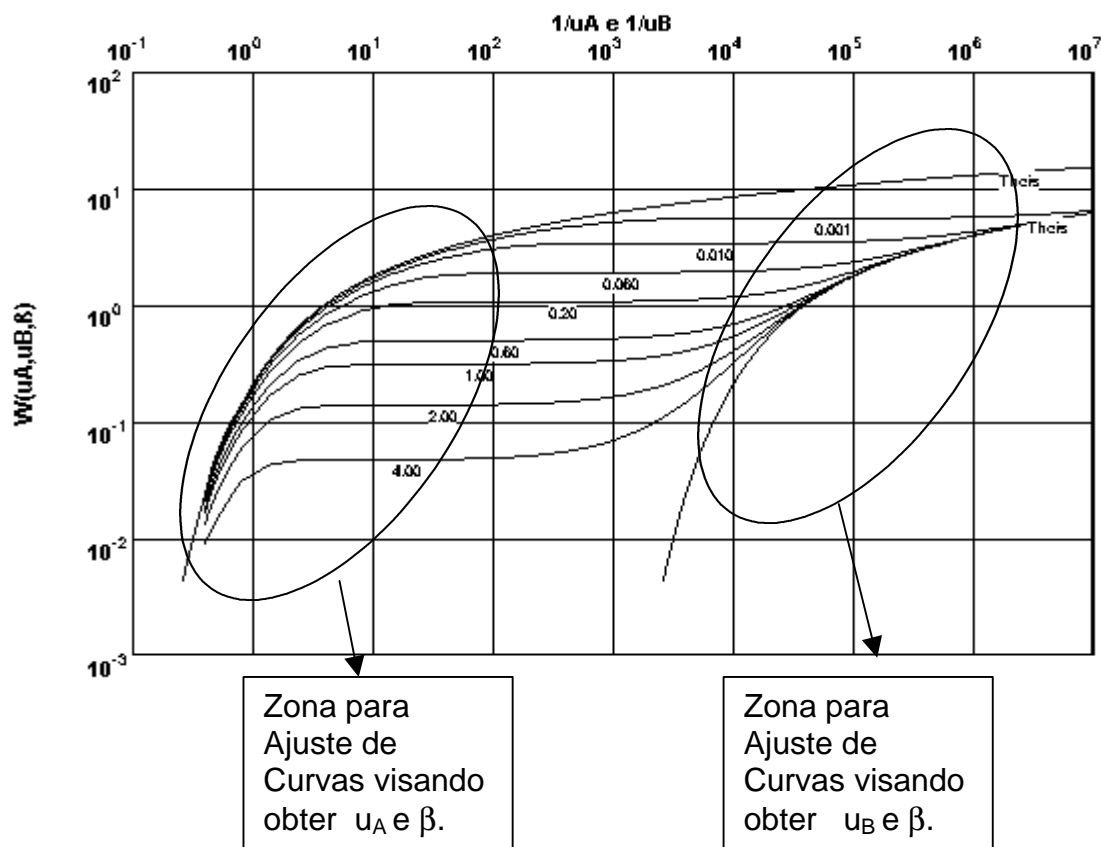


Figura 6: Ajuste dos dados de s vs. t para obter: u_A , u_B e β .

Para exemplificar o procedimento apresentado anteriormente, mostramos, nas figuras 7 e 8 os dados de s vs. t ajustados para as curvas de Theis para se obter u_A , u_B e β para o piezômetro 3 da bateria de poços “Cajueiros” (observe que β é comum para ambos os gráficos). Aplicando a metodologia de Neuman e usando o Software AquiferTest (ver Rohrich, 1997), obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 4: Valores de K , S e S_y para a Bateria de Poços “Cajueiros”:

	Piezômetro 1	Piezômetro 2	Piezômetro 3	Piezômetro 4
K (cm/s)	$7,90 \times 10^{-2}$	$7,90 \times 10^{-2}$	$7,04 \times 10^{-2}$	$7,04 \times 10^{-2}$
S	$1,45 \times 10^{-2}$	$3,66 \times 10^{-2}$	$1,85 \times 10^{-2}$	$4,70 \times 10^{-2}$
S_y	$1,02 \times 10^{-1}$	$1,15 \times 10^{-1}$	$1,16 \times 10^{-1}$	$4,19 \times 10^{-1}$

Tabela 5: Valores de K e S para a Bateria de Poços “Barro”:

	Piezômetro 1	Piezômetro 2	Piezômetro 3	Piezômetro 4
K (cm/s)	$4,69 \times 10^{-2}$	$2,58 \times 10^{-2}$	$2,39 \times 10^{-2}$	$1,87 \times 10^{-2}$
S	$3,72 \times 10^{-2}$	$4,04 \times 10^{-2}$	$5,88 \times 10^{-2}$	$1,46 \times 10^{-2}$
S_y				

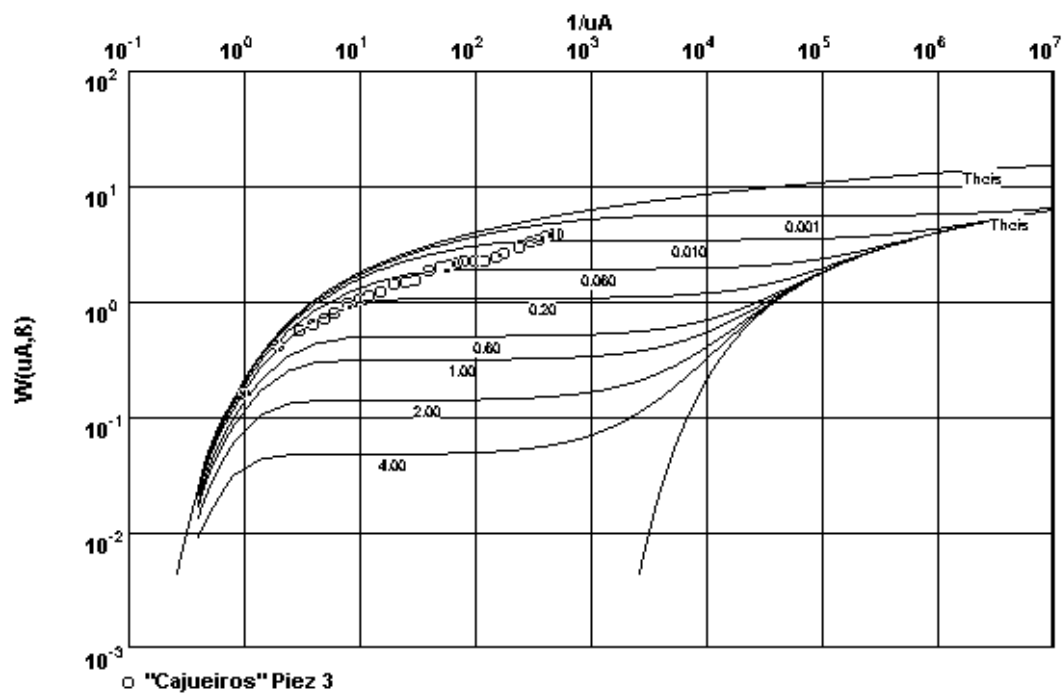


Figura 7: Ajuste de s vs. t para obtenção de u_A e β para o piezômetro 3 da Bateria de poços "Cajueiros".

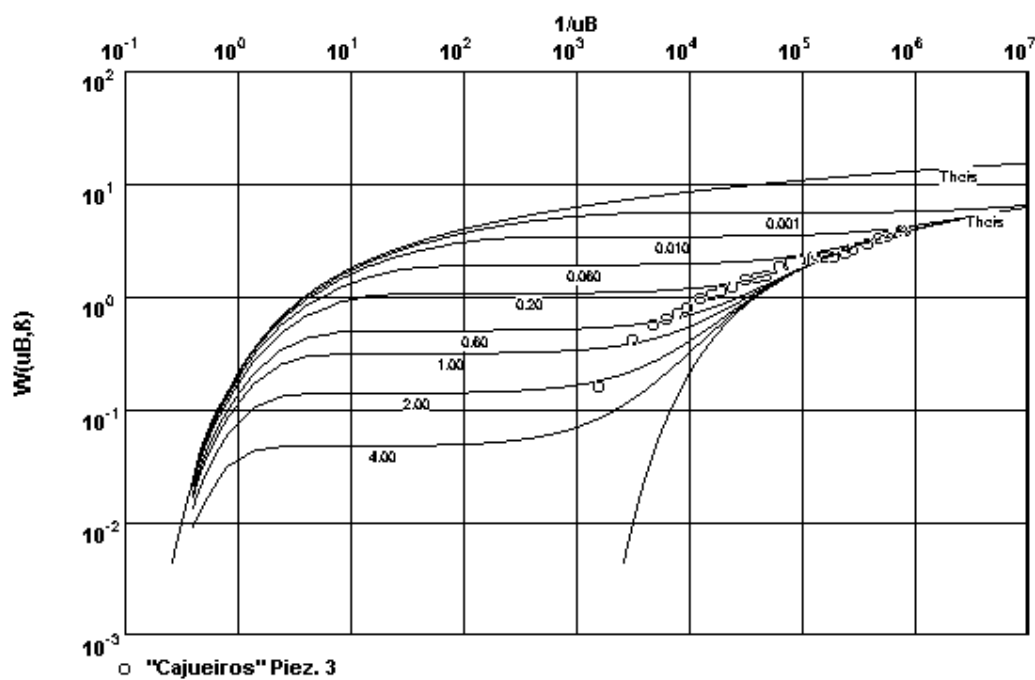


Figura 8: Ajuste de s vs. t para obtenção de u_B e β para o piezômetro 3 da Bateria de poços "Cajueiros".

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE ATRAVÉS DOS TESTES DE RECUPERAÇÃO (“SLUG TESTS”) – MÉTODO DE HVORSLEV E MÉTODO DE BOUWER E RICE.

Os testes de Bombeamento, como os descritos neste trabalho, são caro. Uma alternativa aos testes de bombeamento são os chamados testes de recuperação, também conhecidos como “Slug Tests”. Entretanto, tais testes fornecem apenas o Coeficiente de Permeabilidade, não sendo possível obter através deles o Coeficiente de Armazenamento e a Retenção Específica. Tais variáveis são obtidas, no campo, apenas através dos testes de bombeamento. Apesar disso, como o Coeficiente de Permeabilidade é, sem dúvida, a característica hidrogeológica mais importante de um aquífero e, como tanto S como S_y podem ser estimados, com razoável precisão, indiretamente através de outras características do aquífero tais como textura, granulometria e do próprio coeficiente de Permeabilidade, tal deficiência pode ser compensada pelo baixo custo, simplicidade e rapidez dos “Slug Tests”.

Os testes de recuperação podem ser diretos ou inversos. Ambos os tipos consistem em uma mudança instantânea do nível d’água no piezômetro onde está sendo realizado o teste através de uma retirada (teste direto) ou introdução (teste inverso) de um determinado volume de água do poço. Durante o processo de retorno ao nível d’água inicial, os valores desse nível são registrados como função do tempo.

A interpretação dos registros mencionados no parágrafo anterior vai depender do Método a ser adotado: Método de Hvorslev ou Método de Bouwer e Rice. Ambos assumem que o aquífero é isotrópico e infinito e que o poço onde está sendo realizado o teste tem a seguinte configuração:

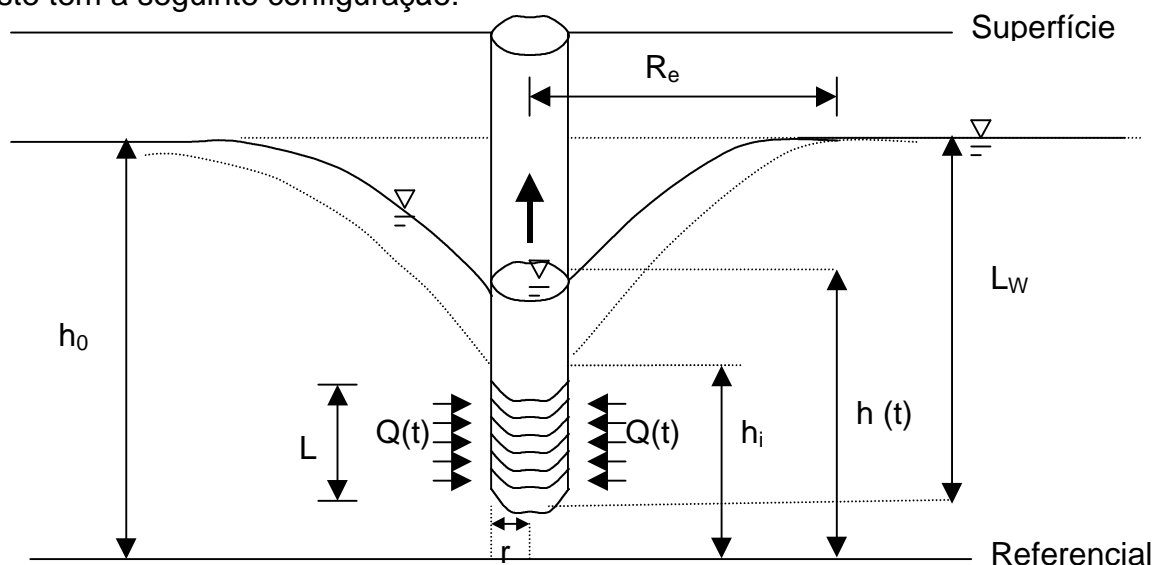


Figura 9: “Slug Test” Direto.

Ambos os Métodos (Hvorslev e Bouwer & Rice) partem do princípio da continuidade de vazão e da lei de Darcy, através da seguinte equação:

$$Q(t) = \pi r^2 \frac{dh}{dt} = 2\pi r L K \frac{(h_0 - h)}{(R_e - r)} \quad (5)$$

Segundo Hvorslev (ver Fetter, 1994):

$$K = \frac{r^2 \ln(L/r)}{2 L T_L} \quad (6)$$

onde T_L é o valor do tempo que corresponde a 37% de recuperação.

Bouwer e Rice propuseram o seguinte valor para K:

$$K = \frac{r^2 \ln(R_e/r)}{2 L} \times \frac{1}{t} \times \ln\left(\frac{h_0 - h_i}{h_0 - h}\right) \quad (7)$$

O valor de R_e não é possível de ser medido para um determinado poço, entretanto, Bouwer e Rice propuseram um método de estimar o valor de $\ln\left(\frac{R_e}{r}\right)$, se $L_w < h_0$, então:

$$\ln R_e/r = \left[\frac{1,1}{\ln(L_w/r)} + \frac{A + B \ln[(h_0 - L)/r]}{L/r} \right]^{-1} \quad (8)$$

se $L_w = h_0$, então:

$$\ln R_e/r = \left[\frac{1,1}{\ln L_w/r} + \frac{C}{L/r} \right]^{-1} \quad (9)$$

onde A, B e C são números adimensionais, os quais são função da razão L/r e podem ser obtidos através de gráficos (ver Fetter, 1994).

A seguir, os valores de h_0-h devem ser plotados em um papel mono-log com h_0-h no eixo dos logaritmos. Os dados devem formar uma linha reta para os valores iniciais e médios de tempo. A medida que o tempo aumenta, os pontos podem se distanciar da reta.

Em seguida, escolhem-se dois pontos da reta : $(h_0-h)_1$, t_1 e $(h_0-h)_2$, t_2 e determina-se

$$\frac{1}{t} \times \ln\left(\frac{h_0 - h_i}{h_0 - h}\right) = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left[\frac{(h_0 - h)_1}{(h_0 - h)_2}\right] \quad (10)$$

Com o resultado das equações (9) e (10), obtém-se K através da equação (7).

Em termos das equações e dos parâmetros envolvidos, o método de Bouwer e Rice é mais sofisticado. Ele leva em conta a geometria do filtro (se é total ou parcialmente penetrante), a espessura saturada inicial (h_0) e o raio efetivo (R_e).

Entretanto, resultados práticos mostram que os dois métodos fornecem respostas semelhantes, como mostram os resultados apresentados a seguir:

Tabela 6: Valores de K obtidos pelo “Slug Test”.

POÇOS TESTADOS	Cajueiros	Sem Nome	Barro
Raio (cm)	5,08	5,08	5,08
Profundidade do poço (cm)	385	505	490
Profundidade da camada impermeável (cm)	385	505	490
Coluna de água no poço (cm)	125	164	256
Coeficiente de permeabilidade por Hvorslev (cm/s)	$2,13 \times 10^{-2}$	$6,87 \times 10^{-4}$	$4,39 \times 10^{-3}$
Coeficiente de permeabilidade por Bouwer e Rice (cm/s)	$1,54 \times 10^{-2}$	$4,34 \times 10^{-4}$	$3,53 \times 10^{-3}$

ANÁLISE DE DADOS E CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através da análise dos dados dos testes de bombeamento revelaram que houve uma variação mínima comparando um piezômetro com outro numa mesma bateria de poços, o que revela uma razoável precisão na condução e interpretação dos resultados. Os resultados do coeficiente de permeabilidade obtidos através da aplicação do Método de Thiem (regime pseudo-permanente) foram muito parecidos com os valores obtidos através da aplicação do Método de Neuman (Regime Transiente). Comparando estes resultados com os valores do Coeficiente de Permeabilidade obtidos através dos “Slug Tests” nota-se uma maior discrepância, apesar de êles, de maneira geral, se manterem com a mesma ordem de grandeza. Isto já era esperado, visto que os testes de bombeamento são mais precisos que os “Slug Tests” uma vez que os testes de bombeamento abrangem uma área e uma profundidade muito maiores do que abrangidos pelos “Slug Tests”. Apesar disso, o fato de que os resultados dos “Slug Tests” terem ficado na mesma ordem de grandeza dos resultados do teste de bombeamento e, muitas vezes, em casos práticos, o que interessa é a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, revela que tais testes (“Slug Tests”) podem

ser usados, em alguns casos, em substituição aos testes de bombeamento, vistos que eles (os “Slug Tests”) são bem mais baratos, simples e rápidos.

Usando a seguinte tabela de intervalos do Coeficiente de Permeabilidade para diversos tipos de aquíferos:

Tabela 7: Intervalos de K para diversos tipos de Aquífero (Fetter, 1994).

Material	Intervalo de Coeficiente de permeabilidade (cm/s)
Argila	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia grossa; Areia fina	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-2} - 10^0$

e comparando com os resultados obtidos, resumidos na seguinte tabela:

Tabela 8: Quadros resumido dos valores de Permeabilidade obtidos.

Poço	Ordem de grandeza de K	Material Provável
Cajueiro	10^{-2}	Areia bem distribuída
Sem Nome	10^{-4}	Areia grossa a fina
Barro	10^{-2}	Areia bem distribuída

Nós podemos ter uma idéia do tipo de material que compõe o aquífero (Tabela 8), resultado confirmado pelo levantamento geofísico do aquífero (Ver Leite, 1999).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Leite, C. E. S., Andrade, F., Mobus, G., Souza, N. P. R. e Teixeira, L. F. T. (1999). *Modelagem Geométrica de um Trecho aluvionar do rio Palhano na Comunidade do Chile, no limite dos Municípios de Morada Nova e Ibicuitinga / Ceará*. FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza-CE).
- Feitosa, A. C. F. (1996). *Testes de Bombeamento em Poços Tubulares*. Apostila de Curso Técnico realizado pela ABAS (Associação Brasileira de Águas Subterrâneas) e pelo DNPM. Recife-PE.

Fetter, C. W. (1994). Applied Hydrogeology, 3rd edition. Mcmillan College Publishing Company, New York, NY.

Rohrich, T. (1997). *User's Manual for AquiferTest*. Waterloo Hydrogeologic, Inc.