



## CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DAS ALUVIÕES DO RIO BEBERIBE NA ÁREA DA BATERIA DE POÇOS NO BAIRRO DE CAIXA D'ÁGUA, OLINDA-PE

### *HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ALLUVIUM AT BEBERIBE RIVER IN A WELL FIELD AREA AT CAIXA D'ÁGUA NEIGHBORHOOD, OLINDA-PE*

José Geilson Alves Demétrio<sup>1</sup>, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva<sup>2</sup>, Dayana Andrade de Freitas<sup>3</sup>, Ana Gabriella dos Santos Batista<sup>4</sup>, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral<sup>5</sup>

Artigo recebido em: 31/08/2013 e aceito para publicação em: 16/12/2013.

**Abstract:** Alluvium at Beberibe river at “Caixa d’Água” neighborhood between Olinda and Recife municipality has been researched for analyzing Bankfiltration technique as an efficient and suitable water treatment method. An important point to evaluate bankfiltration performance is the understanding of the alluvium hydraulics and hydrodynamics. Four pumping wells have been drilled and seven observations wells were installed. Hydraulic head have been monitored and pumping tests were performed. This work presents the results of pumping test and head monitoring. Potentiometric map shows that natural groundwater flow has the direction of river flow, with small inflexions of hydraulic head isolines, indicating that before pumping Beberibe river is effluent at that site. Drawdown surfaces are elliptic with larger axis parallel to river. Aquifer tests were interpreted by Theis and Thiem methods. Hydrogeologic representative parameters are transmissivity:  $2,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , hydraulic conductivity:  $2,03 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  and storage coefficient:  $1,02 \times 10^{-3}$ . The aquifer hydrodynamics is similar to a confined aquifer with recharge from Beberibe river during well pumping.

**Keywords:** Beberibe river. Alluvium. Bankfiltration. Aquifer test.

**Resumo:** As aluviões do rio Beberibe no entorno no bairro de Caixa d’Água, divisa dos municípios de Olinda e Recife, vêm sendo alvo de uma série de pesquisas para avaliar o método da filtração em margem como forma de obter um tratamento da água eficiente e econômico. Uma etapa importante na avaliação do potencial desse método é a compreensão hidráulica/hidrodinâmica da aluvião. Para tanto, foram construídos quatro poços de bombeamento e sete poços de observação, a partir dos quais foram realizados monitoramentos da carga hidráulica e ensaios de bombeamento. No presente trabalho é feita a análise de um dos testes de aquífero e da potenciometria natural da aluvião. A potenciometria mostrou que o fluxo natural da água subterrânea é no mesmo sentido do fluxo do rio, com pequenas inflexões das linhas de mesma carga hidráulica, indicado que antes do bombeamento o rio Beberibe é efluente. Os cones de rebaixamentos são elípticos com eixo maior paralelo ao curso do rio. Os testes de aquífero foram interpretados pelos métodos de Theis e Thiem e os parâmetros hidrogeológicos representativos determinados foram: transmissividade  $2,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , condutividade hidráulica  $2,03 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  e coeficiente de armazenamento  $1,02 \times 10^{-3}$ . O aquífero comporta-se hidraulicamente como confinado, com recarga a partir do rio Beberibe durante o bombeamento.

**Palavras-chave:** Rio Beberibe. Aluvião. Filtração em margem. Teste de aquífero.

## INTRODUÇÃO

O melhor conhecimento das características hidrogeológicas das aluviões das margens de um curso de água é necessário para aprimorar o entendimento das diversas funções dos processos

de tratamento realizados ao se utilizar a água da Filtração em Margem (FM) para abastecimento público.

A técnica de Filtração em Margem consis-

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, Departamento de Geologia, Professor Adjunto (geilson@ufpe.br).

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro Acadêmico do Agreste - CAA, Núcleo de Tecnologia - NT, Professor Adjunto (anderson.paiva@ufpe.br).

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, Departamento de Engenharia Civil - DECIV, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (dayanafandrade@gmail.com).

<sup>4</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, Departamento de Geologia, Graduanda em Geologia (geilson@ufpe.br).

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, Departamento de Engenharia Civil - DECIV, Professor Titular (jcabral@ufpe.br).

te na utilização da água de poços rasos nas margens dos cursos d'água de modo que o bombeamento induza uma recarga proveniente das águas do rio, e acarrete uma melhoria da qualidade dessa água ao passar pelos poros do terreno das margens, envolvendo processos físicos e biogeoquímicos (PAIVA et al., 2010).

A filtração em margem pode reduzir processos do tratamento convencional ou pode funcionar como o tratamento completo obtendo uma considerável diminuição de custos. Dependendo do uso, do grau de filtração e da atenuação do contaminante, a água bombeada já pode ir direto para o sistema de distribuição no abastecimento d'água ou serve como um pré-tratamento na produção de água potável (RAY et al., 2002). Esta técnica vem sendo utilizado por diversos países, principalmente na Europa, em zonas de clima temperado, há mais de um século (GUNKEL, 2010).

A recarga das aluviões pode ocorrer naturalmente quando a superfície freática for inferior ao nível d'água superficial do rio (rio influente) ou lago, ou pode ser induzida artificialmente pela locação de poços de bombeamento próximos à água superficial, em outras palavras, recarga casual ou induzida (BOUWER, 2002).

O método de FM pode remover eficientemente turbidez, microorganismos, matéria orgânica natural, pesticidas, herbicidas, compostos químicos inorgânicos dissolvidos, fármacos, compostos que causam sabor e odor, pelos processos físicos, químicos e biológicos na passagem através do meio poroso (SAHOO et al., 2005). Em diversos países, novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas inclusive para tratamento dos chamados poluentes emergentes que exigem processos mais rigorosos (WANG et al., 1995; TUFENKJI, 2002; WANG, 2002; SENS et al., 2006).

O processo físico de remoção tende ser mais eficiente quanto menor for a velocidade do fluxo subterrâneo e quando o aquífero for formado por material granular bem distribuído. O melhor conhecimento das propriedades hidrogeológicas e das configurações de fluxo subterrâneo são importantes para a análise da performance da técnica.

O presente artigo descreve as características hidrogeológicas no projeto piloto onde foi executada uma bateria de poços para a Filtração em Margem, bem como apresenta os testes e ensaios realizados para avaliação das propriedades nas aluviões das margens do rio Beberibe no município de Olinda, Estado de Pernambuco.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área Experimental

O projeto piloto foi executado nas margens do rio Beberibe na Região Metropolitana do Recife (RMR), na divisa entre Olinda e Recife, no local onde funciona a estação elevatória da COMPESA (Companhia de Saneamento de Pernambuco) limitada pelas coordenadas UTM 9115500 a 9116000 Norte e 289500 a 290000 Leste, no bairro de "Caixa d'Água" em Olinda.

A bacia do Beberibe possui uma área de drenagem de 81,0 Km<sup>2</sup> e atravessa uma região urbana e periurbana que apresenta grandes problemas sociais e ambientais que geram contaminação crescente nos corpos hídricos. O rio Beberibe, em períodos normais é um rio estreito com largura em torno de 6,0 m, tem orientação predominante no sentido oeste-leste, mostrando uma deflexão para o sul e desaguardo no Oceano Atlântico (PERNAMBUCO, 1998, 2006).

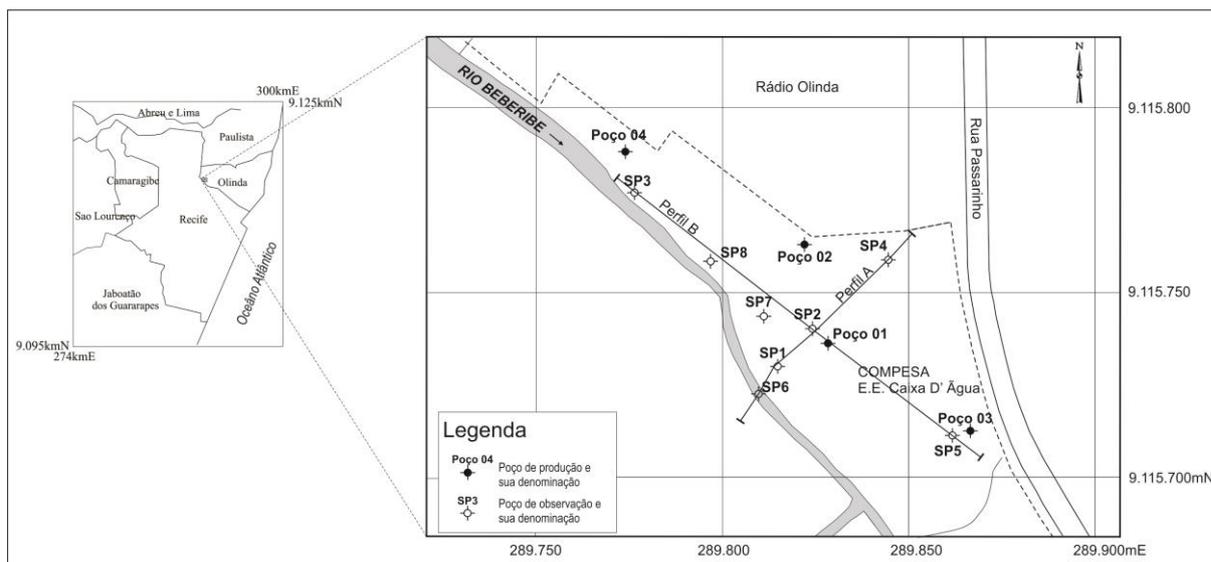
No local da estação elevatória, algumas décadas atrás, havia uma captação a fio d'água do rio Beberibe, mas com o decorrer dos anos a poluição do rio foi se agravando até que esta captação foi desativada.

Objetivando um conhecimento mais detalhado das camadas do solo e subsolo na área alvo do estudo, foram realizados furos de sondagem, sendo um deles no leito do rio. O método de execução dos furos de sondagens seguiram as recomendações da ABNT, segundo as normas NBR-8036/83, NBR-6502/95, e NBR-6484/01 (ABNT, 1983, 1995, 2001). Paiva et al. (2010) apresentaram informações sobre a coleta de amostras de solo a cada metro para todos os furos de sondagem realizados, com a finalidade da descrição do material. Em algumas profundidades foram selecionadas amostras, que representassem as distintas mudanças de camadas, para serem realizados ensaios de granulometria (PAIVA et al., 2010).

Sete furos de sondagens foram aproveitados posteriormente para instalação de poços de monitoramento (figura 1), sendo que no furo de sondagem do leito do rio (SP6) não foi instalado monitoramento. A construção destes poços de monitoramento foi executada seguindo padrões e recomendações NBR-15495-1/07 (ABNT, 2007) e Norma 6410 da CETESB (CETESB, 1988), tomando atenção para a camada de filtro com material granular adequado, colocação do tubo de proteção metálico com tampão, e proteção da parte superficial com base cimentada. Estes poços são constituídos de tubo PVC de 1" sendo que no

trecho do filtro dos poços foram feitas ranhuras transversais ao tubo a cada 10 cm, com 0,8 mm de

espessura, ao longo de 10 m de comprimento, iniciando a partir dos 8 m de profundidade.



**Figura 1** - Localização da área estudada mostrando os poços de bombeamento e observação

**Figure 1** - Study area localization including pumping and observation wells

Na área de estudo foram perfurados 4 poços de produção conforme localização indicada na figura 1. Os poços de produção foram executados com as seguintes características: profundidade de 15 m; diâmetro de perfuração 12 ¼"; método de perfuração rotativa com circulação direta; uma seção de filtro, na profundidade de 6 a 12 m; diâmetro do poço de 6"; sendo utilizado tubos de PVC do tipo geomecânico.

As medições dos níveis potenciométricos nos poços foram realizadas com sensores de nível Levelogger da Solinst e com o uso do medidor de nível manual tradicional. O monitoramento dos níveis potenciométricos são realizados semanalmente, no entanto, durante todo o período dos testes de aquífero foram observados os níveis.

### Geologia e Hidrogeologia

Segundo Mapa Geológico da Região Metropolitana do Recife, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM em 2001, a área está inserida na bacia sedimentar Paraíba (BARBOSA & LIMA FILHO, 2005). No entorno da área estudada predomina a formação Barreiras, seguida pelos sedimentos recentes das aluviões e os depósitos de praia. Na sequência os calcários da formação Maria Farinha/Gramame e os arenitos da formação Beberibe, tal como ilustrado na figura 2.

O principal aquífero na região é o Beberibe, a partir do qual é feito o abastecimento total ou parcial de vários municípios da zona norte da Região Metropolitana do Recife - RMR.

A área de pesquisa está assentada sobre os sedimentos areno-argilosos das aluviões do rio

Beberibe.

Os principais aquíferos no entorno da área de estudo são:

#### *Aquífero Barreiras*

Formado por sedimentos areno-argilosos, não consolidados, com intercalações argilosas e níveis arenosos grosseiros. Por vezes sotoposto ou em contato lateral com os depósitos de cobertura recente. Pode ocorrer ora recobrindo as rochas do embasamento cristalino, ora recobrindo o aquífero Beberibe ou a formação Gramame/Maria Farinha. É um aquífero livre, podendo localmente apresentar-se semiconfinado em função da ocorrência de fácies mais argilosas intercaladas às fácies mais arenosas da formação (OLIVEIRA, 2003).

A potencimetria está condicionada à superfície topográfica da região onde o mesmo ocorre. Em função da heterogeneidade faciológica desses sedimentos, a sua porosidade e permeabilidade são também variáveis, de boa a regular. Condutividade hidráulica média do aquífero de  $1,54 \times 10^{-6}$  m/s. A transmissividade varia de  $4,05 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s a  $3,61 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s (OLIVEIRA, op.cit.).

Em geral, sua importância como aquífero é negligenciada em função da ocorrência de outro mais produtivo, o Beberibe. A produtividade média dos poços é de 4 a 5 m<sup>3</sup>/h, podendo atingir até 16 m<sup>3</sup>/h (OLIVEIRA, op.cit.).

A recarga é a partir da precipitação pluviométrica, ou por infiltração a partir dos Depósitos de Cobertura. Nos locais onde o Barreiras encontra-se sobreposto aos sedimentos da Formação

Beberibe, e principalmente em áreas onde predominam os sedimentos arenosos, suas águas recar-

regam o aquífero sotoposto. (OLIVEIRA, op.cit.)

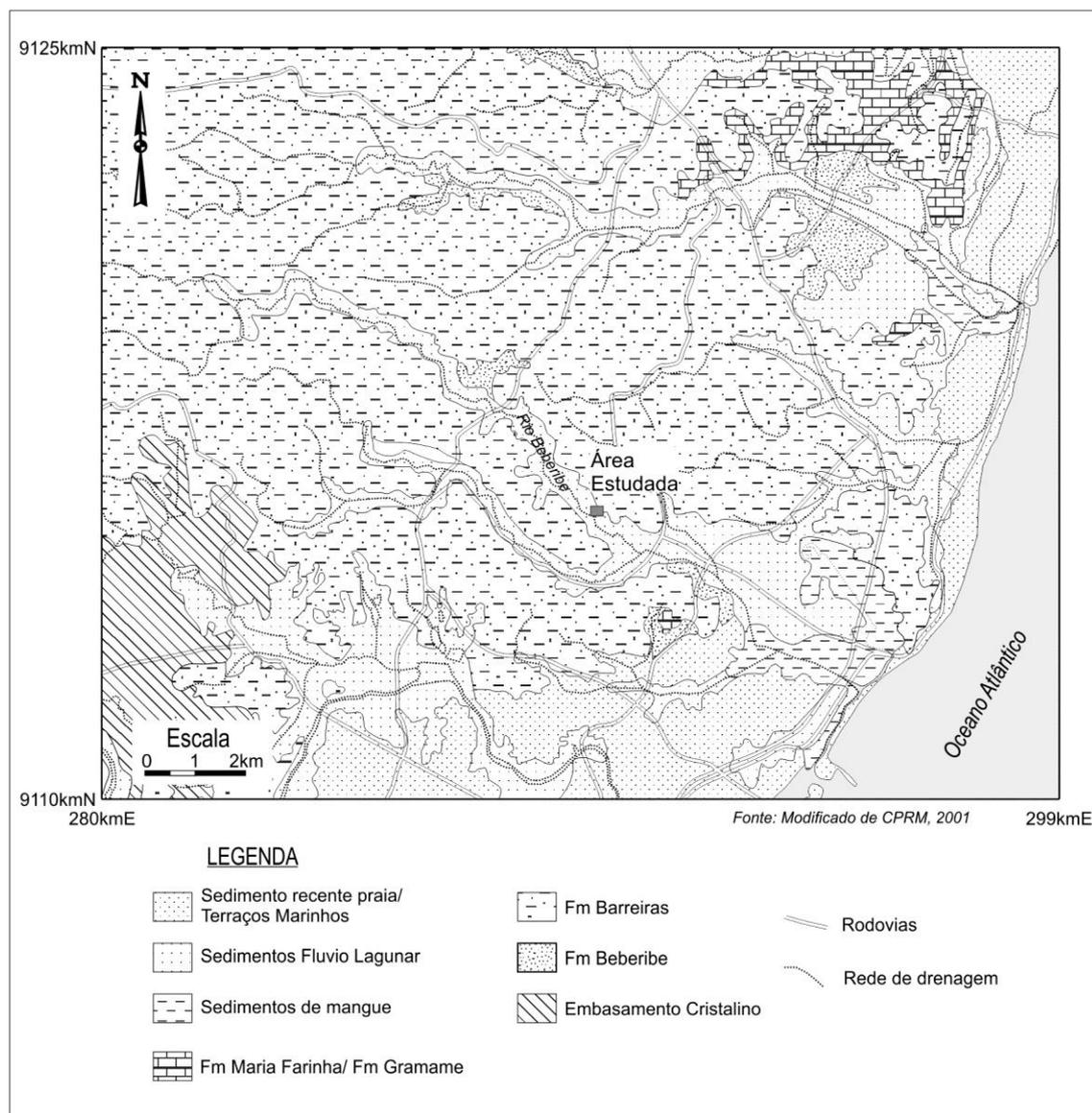


Figura 2 - Mapa geológico no entorno da área estudada

Figure 2 - Geological map of study area and its surroundings

### Aquífero Beberibe

O aquífero Beberibe é formado por duas unidades, uma superior, carbonática e uma inferior, não carbonática. A primeira é denominada de formação Itamaracá e a segunda Beberibe (SOUZA & LIMA FILHO, 2005). A maioria dos autores refere-se ao aquífero Beberibe como a parte não carbonática. Aqui as duas serão tratadas indistintamente.

O coeficiente de armazenamento é de  $5,20 \times 10^{-4}$ , enquanto a condutividade hidráulica média é de  $8,85 \times 10^{-6}$  m/s. Através de testes de bombeamento realizados em 52 poços tubulares, o valor médio da transmissividade foi de  $1,77 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, variando entre  $8,8 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s e  $8,9 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (OLIVEIRA, op.cit.).

Os poços que captam o aquífero Beberibe têm uma profundidade média de 255 m, vazão de produção média de 50 m<sup>3</sup>/h e nível estático médio de 22 m.

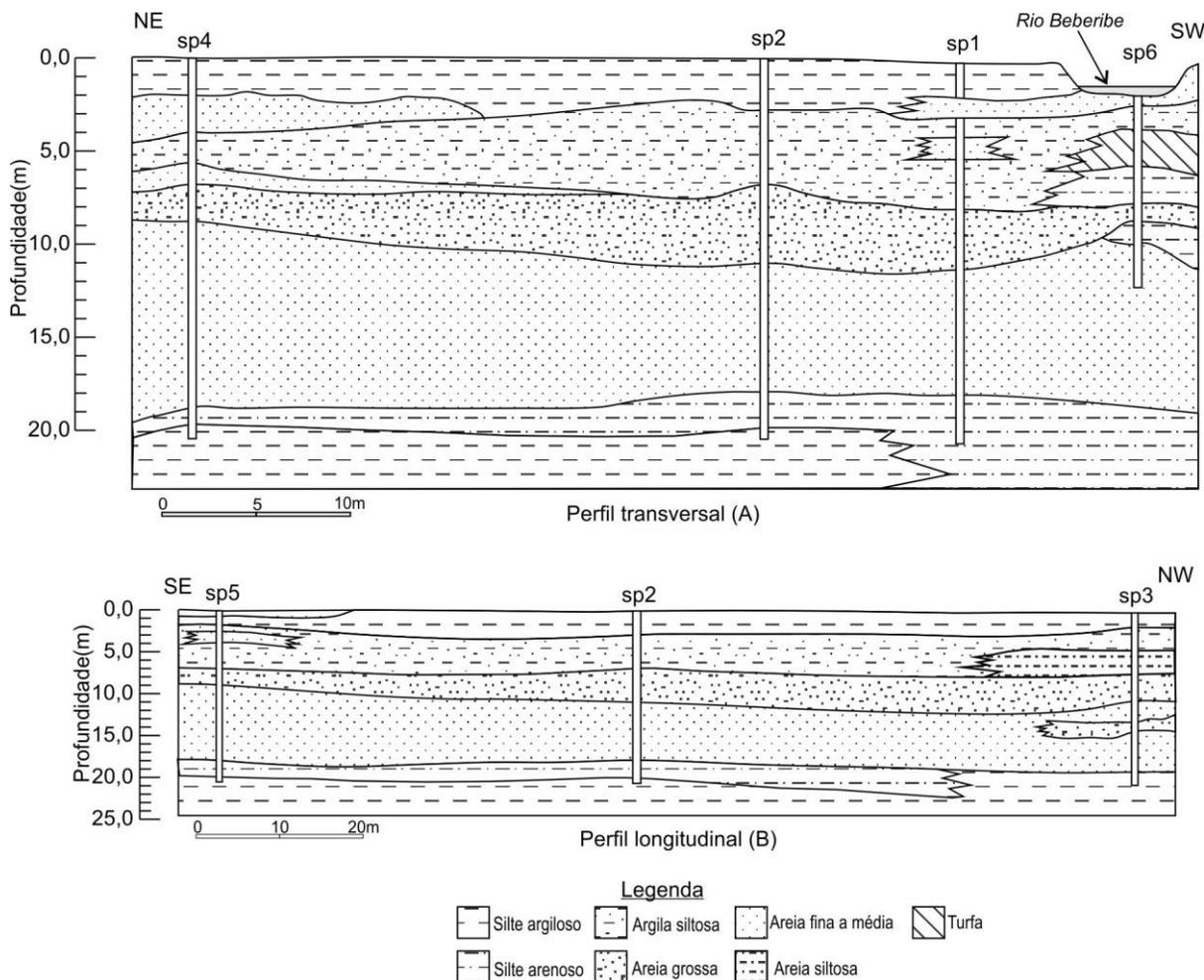
### Formação Maria Farinha e Gramame

As formações Maria Farinha e Gramame são compostas por calcários e, em geral, não apresentam potencial hidrogeológico. Os poucos poços existentes apresentam baixa vazão e com águas ricas em carbonatos. Sua importância é a proteção hidráulica do aquífero Beberibe sotoposto, conferindo a este o caráter confinado ou semi-confinado.

### Aluviões

Localmente as aluviões do rio Beberibe são dominadas no topo e na base por sedimentos silticos-argilosos e na porção intermediárias por sedimentos arenosos, tal qual como mostrado nos dois perfis da figura 3. Os furos de sondagens realizados na área ficaram com a profundidade em torno dos 20 m. O intervalo entre 8 e 18 m de profundidade é onde estão situados os sedimentos arenosos, e consequentemente as zonas de capta-

ções dos poços. Assim, a espessura média do aquífero foi considerada de 10 m. As informações dos poços e sondagens não permitiram caracterizar se as aluviões estão assentadas diretamente sobre os sedimentos da formação Barreiras, que afloram no entorno do rio, ou se sobre outra formação. A hipótese mais plausível é que sejam sobre a formação Barreiras.



Adaptado de Paiva, 2009

**Figura 3** - Seções geológicas da aluvião do rio Beberibe  
**Figure 3** - Geological section of alluvium of Beberibe river

### Teste de Aquífero

Os parâmetros de caracterização de uma formação aquífera são usualmente determinados através de teste de aquífero. Este teste é desenvolvido efetuando-se o bombeamento e anotando a taxa de decaimento do nível de água por tempos pré-determinados no próprio poço e nos poços de observação. Os dados da relação rebaixamento versus tempo são, então, interpretados para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do

aquífero.

Em função das condições hidrodinâmicas de cada tipo de aquífero (confinado, não drenante ou drenante e livre) associadas ao comportamento da evolução dos rebaixamentos (regime permanente ou transiente), existe uma grande quantidade de métodos de interpretação de testes de aquífero (CPRM, 2008).

Vários fatores podem interferir na quali-

dade de resultados dos testes de aquíferos. Para minimizá-los, algumas suposições serão assumidas para melhor avaliação dos mesmos, são elas: o poço de bombeamento possui filtro apenas no aquífero testado; e todos os poços de observação (monitoramento) possuem filtro somente no aquífero testado. Na área de estudo não há poços próximos a fim de interferir no regime de fluxo para o poço de produção em análise.

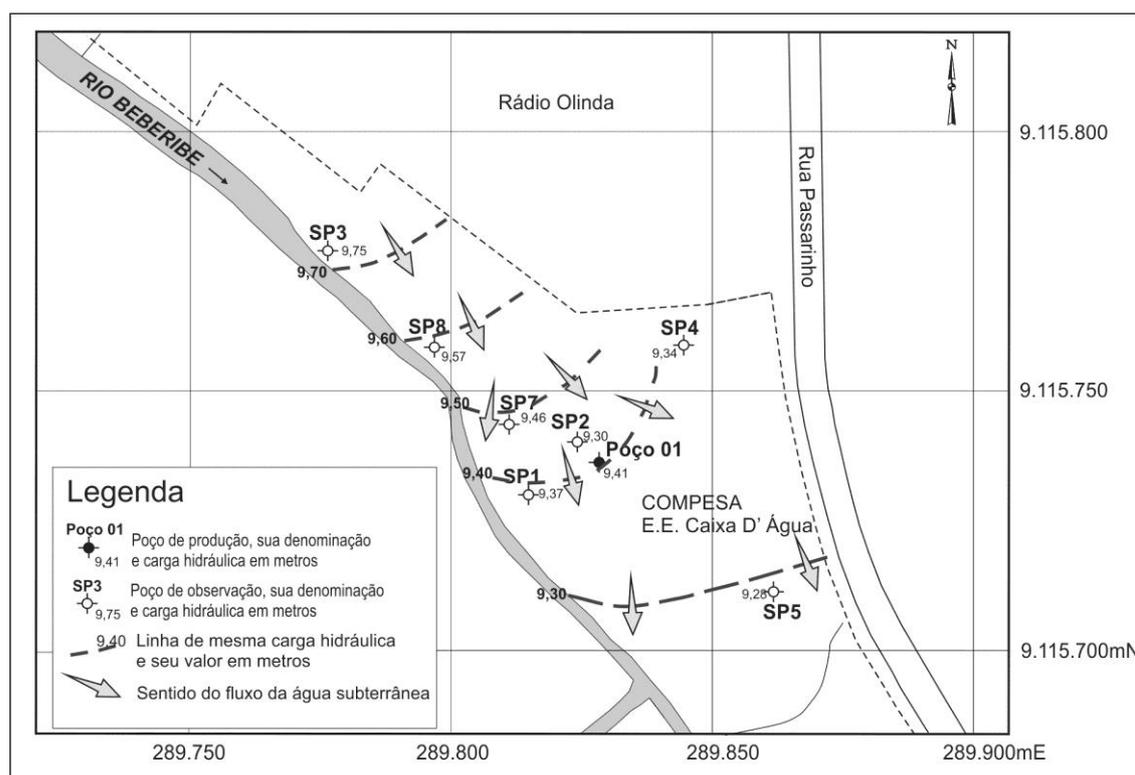
O teste de aquífero foi realizado no dia 05/09/2012, no poço 02, poucas semanas após a execução da perfuração do poço e a limpeza do mesmo. As medições dos rebaixamentos dos níveis nos poços de observação foram realizadas com quatro sensores de nível Levelogger da Solinst, programados para leituras a cada minuto, e com o uso do medidor de nível tradicional. O teste teve duração de 24 horas e foi executado a uma vazão constante. A vazão foi controlada e observada durante todo o teste através do escoador de orifício circular.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Potenciometria

Em qualquer estudo hidrogeológico o mapa potenciométrico é parte obrigatória. É a partir dele que são definidas, por exemplo, as direções do fluxo da água subterrânea e detectadas possíveis heterogeneidades pela análise da variação do gradiente hidráulico.

Durante o monitoramento realizado entre os dias 10 e 15 de agosto de 2012 nenhum dos poços existentes foi bombeado, permitindo a elaboração de uma potenciometria representativa para as condições de fluxo natural com as medidas de nível estático (NE) obtidas no dia 15 de agosto de 2012, cujos dados são apresentados na tabela 1 e o mapa potenciométrico na figura 4. Para a elaboração da potenciometria, os poços foram nivelados com auxílio de um par GPS geodésico.



**Figura 4** - Fluxo natural e potenciometria da aluvião na área estudada

**Figure 4** - Undisturbed groundwater flow and potentiometry at alluvium in study area

Após o bombeamento do dia 15/08/2013 os poços permaneceram sem funcionar até o dia 19, quando o poço 01 foi ligado e no dia 20 de agosto de 2012, após 24 horas de bombeamento, foram tomados os níveis dinâmicos nos mesmos sete poços utilizados para elaboração da potenciometria, tabela 1. Essas informações permitiram elaborar o mapa potenciométrico após 24 horas de

bombeamento, figura 5, e o mapa de rebaixamento, figura 6.

Os gradientes hidráulicos, determinados a partir do mapa da figura 4, variaram de 0,002 a 0,008, com gradiente médio de 0,005. São gradientes baixos, compatíveis com a zona de baixo curso do rio. As linhas de fluxo, no geral, acompanham o sentido de fluxo do rio, mas com pe-

quenas inflexões na direção do rio, indicando que o aquífero é drenado pelo rio Beberibe, ou seja, o rio no local é efluente. Como as aluviões são sedimentos de ocorrência limitada, a água nela contida não seria suficiente para garantir o caráter permanente do rio Beberibe. Dessa forma, a hipótese mais provável é que a efluência do rio seria induzida do aquífero Barreiras existente em ambos os flancos da aluvião.

O mapa potenciométrico para o dia

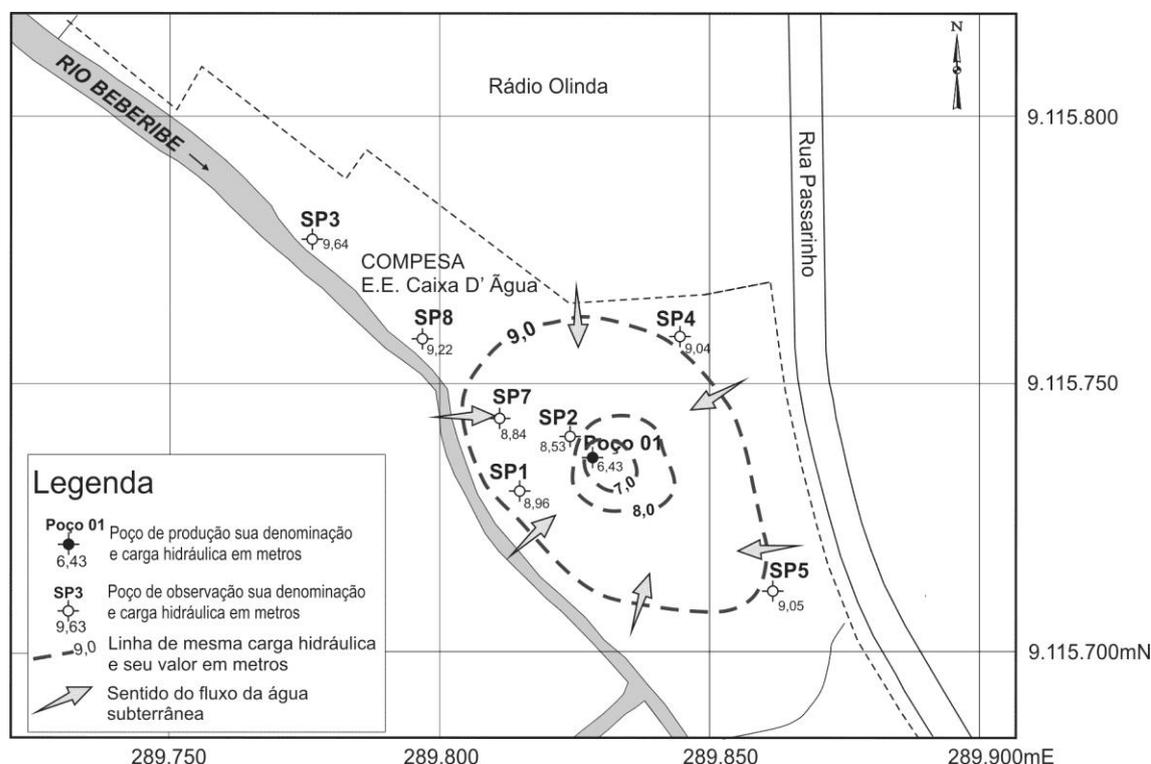
20/08/2012, figura 5, após 24 horas de bombeamento do Poço 01, têm uma forma elíptica, com o eixo maior alinhado com o rio Beberibe. O fluxo é radial na direção do poço. Os gradientes hidráulicos são maiores entre o poço e o rio, indicativo de que o rio funcionou como uma fonte de recarga. As isolinhas de rebaixamento, figura 6, nas proximidades do poço 01, tal como no mapa potenciométrico, tem a forma elíptica com o eixo maior alinhado com o rio.

**Tabela 1** - Potenciometria nos dias 15 e 20 de agosto de 2012

**Table 1** - Head in august 15th and 20th 2012

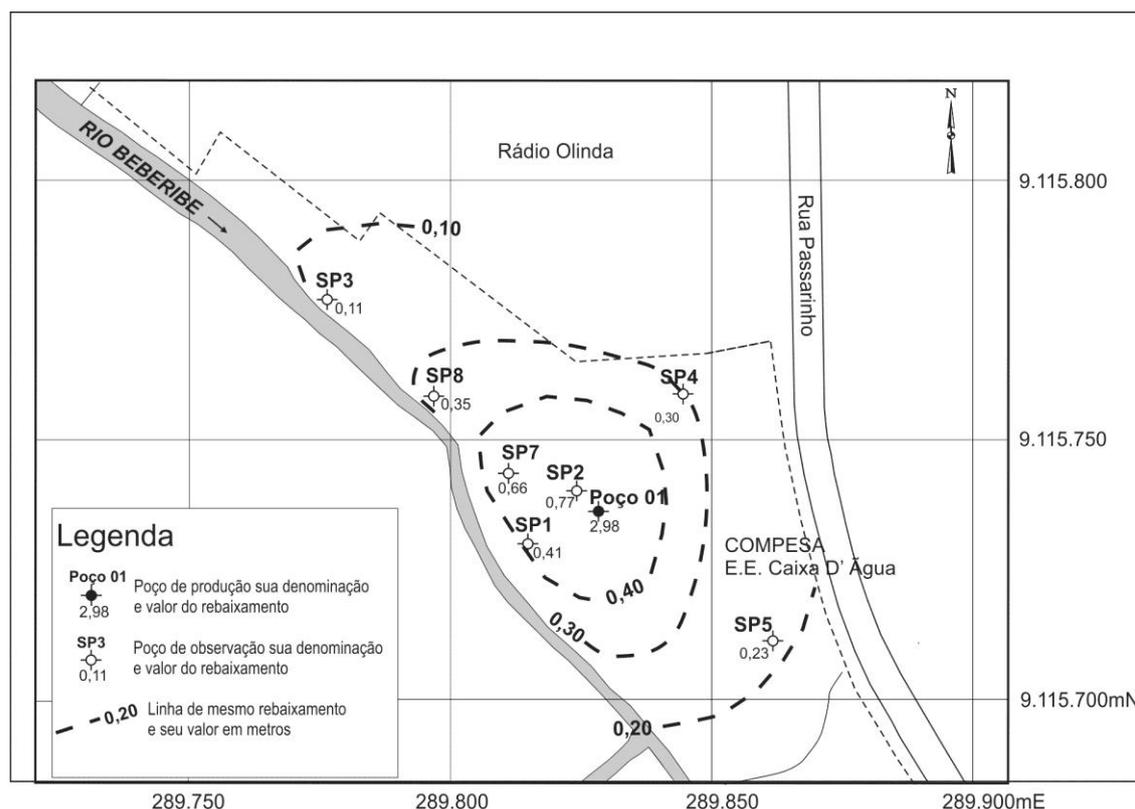
Poço	Cota(m)	15/08/2012		20/08/2012		Dh(m)
		NE(m)	h(m)	ND(m)	h(m)	
SP1	9,99	0,62	9,37	1,03	8,96	0,41
SP2	10,27	0,97	9,30	1,74	8,53	0,77
SP3	9,96	0,21	9,75	0,32	9,64	0,11
SP4	10,13	0,79	9,34	1,09	9,04	0,30
SP5	10,40	1,12	9,28	1,35	9,05	0,23
SP7	10,27	0,81	9,46	1,43	8,84	0,62
SP8	9,86	0,29	9,57	0,64	9,22	0,35
POÇO 01	10,54	1,13	9,41	4,11	6,43	2,98

Obs.: NE = Nível estático; ND = Nível dinâmico; h = Carga hidráulica; Dh = Variação da carga hidráulica (rebaixamento). NE e ND são profundidades da boca do poço até o nível d'água.



**Figura 5** - Potenciometria e fluxo em 20/08/2012, poço 01 bombeando

**Figure 5** - Potentiometry and flux map at august, 20th 2012, well 01 pumping



**Figura 6** - Rebaixamento em 20/08/2012, poço 01 bombeando

**Figure 6** - Drawdown at august, 20th 2013, well 01 pumping

### Cálculo dos Parâmetros Hidrogeológicos

As aluviões, por se tratarem de aquíferos rasos, são em geral classificadas como aquíferos livres. Para os ensaios de bombeamentos realizados nesses casos existem três possibilidades de interpretação: A) Regime de fluxo transitório – métodos de Theis e Jacob, com as devidas correções de rebaixamento. B) Regime de fluxo estacionário – método de Dupuit-Thiem, e C) Regime de fluxo transitório com drenagem retardada – método de Boulton-Pricket e Neumann.

No teste realizado nas aluviões do rio Beberibe em todas as curvas, é nítido que a partir de certo instante, ocorre o efeito de recarga e a estabilização das curvas. A recarga observada é proveniente do próprio rio, a partir do momento em que o cone de rebaixamento intercepta o curso d'água. A interpretação para os métodos de regime de fluxo estacionário não permite a determinação do coeficiente de armazenamento (S) ou da porosidade efetiva ( $S_y$ ), uma vez que, em regime de equilíbrio toda água bombeada provém da fonte de recarga, o aquífero serve apenas como meio de trânsito da água da fonte de recarga até o poço bombeado. Com a finalidade de determinação do valor de S ou  $S_y$  foi analisada inicialmente a parte transitória da curva.

Como não se percebe qualquer efeito de drenagem retardada e como os rebaixamentos foram inferiores a 5% da espessura saturada (10 m) (BATU, 1998), os testes foram analisados utilizando-se a metodologia de Theis (THEIS, 1935). Além do mais, as camadas argilosas, no topo da aluvião, e o nível estático da ordem de 1 m de profundidade, portanto, dentro do nível argiloso superior, conferiu ao aquífero certo grau de confinamento, evidenciado nos valores do coeficiente de armazenamento encontrados. Ou seja, o comportamento da curva levou à consideração de um aquífero confinado com recarga linear ao longo da linha de contato entre o aquífero e o rio.

### Método de Theis

A equação de Theis é escrita da seguinte forma:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

A integral desta equação pode ser aproximada pela seguinte série:

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -0,5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{u^n}{n.n!} = W(u)$$

Assim, a equação de Theis pode ser reescrita como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Sendo:

s = rebaixamento (L)

Q = vazão, que deve ser constante durante o bombeamento (L<sup>3</sup>/T)

T = transmissividade do aquífero (L<sup>2</sup>/T)

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

r = distância do poço bombeado a um ponto qualquer do aquífero (L)

S = coeficiente de armazenamento do aquífero

t = tempo de bombeamento (T)

A equação de Theis foi escrita para aquíferos confinados em regime de fluxo transitório, mas, sob determinadas condições pode ser utilizada para aquíferos livres.

No dia 05/09/2012, o poço 02 foi bombe-

ado durante 24 horas, com vazão constante de 6,095 m<sup>3</sup>/h, controlada e aferida com um escoadouro de orifício circular. A evolução dos níveis dinâmicos foi observada sistematicamente nos poços SP02, SP03, SP04 e SP05, distantes do poço bombeado, respectivamente, 23,09 m, 48,08 m, 22,36m e 65,60m. Foi utilizada uma bomba submersa ligada a rede pública de distribuição de energia elétrica. Os gráficos de rebaixamento x tempo, para os quatro poços de observação, com as respectivas superposições à curva teórica de Theis, são apresentados nas figuras 7, 8, 9 e 10, enquanto os dados do teste são apresentados na tabela 2. Em todas as curvas é nítido o efeito da recarga do rio Beberibe, iniciando em torno de 30 minutos para os poços de observação mais próximos do poço de bombeamento e em torno de 50 minutos para os poços mais distantes, chegando praticamente a estabilizar os níveis dinâmicos.

Na tabela 3 estão resumidos os valores de transmissividade, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica calculados para o aquífero nos quatro poços observados.

**Tabela 2** - Rebaixamentos observados em quatro poços de observação durante o teste de aquífero no Poço 02  
**Table 2** - Drawdown observed in four observation wells during the aquifer test of Well 02

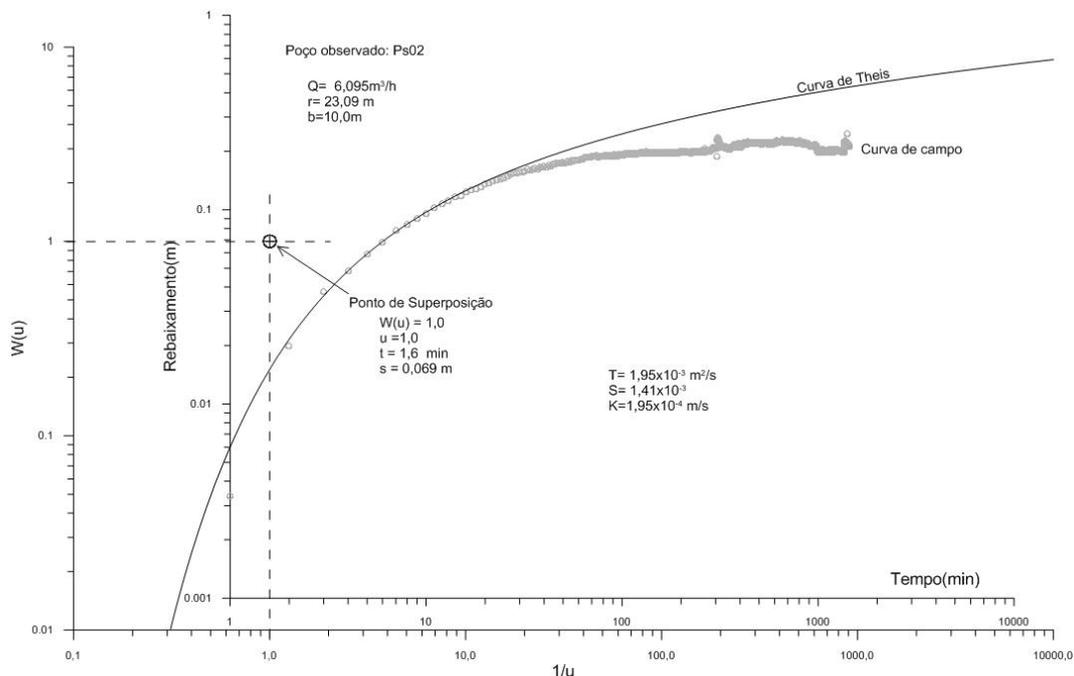
Tempo (min)	Rebaixamentos (m)				Tempo (min)	Rebaixamentos (m)			
	SP02	SP03	SP04	SP05		SP02	SP03	SP04	SP05
1	0,003	0,001	0,002	0,003	150	0,195	0,110	0,250	0,122
2	0,020	0,004	0,014	0,002	180	0,195	0,113	0,250	0,124
3	0,038	0,008	0,024	0,005	240	0,198	0,117	0,254	0,129
4	0,048	0,013	0,036	0,006	300	0,207	0,142	0,272	0,150
5	0,059	0,017	0,051	0,009	360	0,209	0,122	0,259	0,130
6	0,068	0,021	0,062	0,013	420	0,221	0,125	0,262	0,134
8	0,078	0,025	0,073	0,015	480	0,221	0,127	0,265	0,138
10	0,096	0,035	0,099	0,024	540	0,220	0,127	0,267	0,139
12	0,107	0,040	0,114	0,029	600	0,221	0,129	0,269	0,142
15	0,118	0,048	0,132	0,038	660	0,228	0,131	0,272	0,145
20	0,135	0,059	0,153	0,054	720	0,225	0,132	0,273	0,145
25	0,145	0,066	0,174	0,063	780	0,221	0,129	0,271	0,142
30	0,156	0,072	0,186	0,072	840	0,221	0,126	0,268	0,142
40	0,168	0,082	0,203	0,084	900	0,215	0,126	0,266	0,139
50	0,174	0,088	0,216	0,096	960	0,214	0,125	0,267	0,141
60	0,180	0,094	0,225	0,102	1080	0,214	0,125	0,267	0,141
70	0,188	0,099	0,232	0,108	1200	0,200	0,126	0,268	0,141
80	0,188	0,102	0,234	0,110	1320	0,202	0,132	0,276	0,148
100	0,191	0,106	0,241	0,118	1440	0,212	0,154	0,290	0,169
120	0,195	0,108	0,244	0,120					

**Tabela 3 - Resumo dos parâmetros hidrogeológicos**

**Table 3 - Summary of hydrogeological parameters**

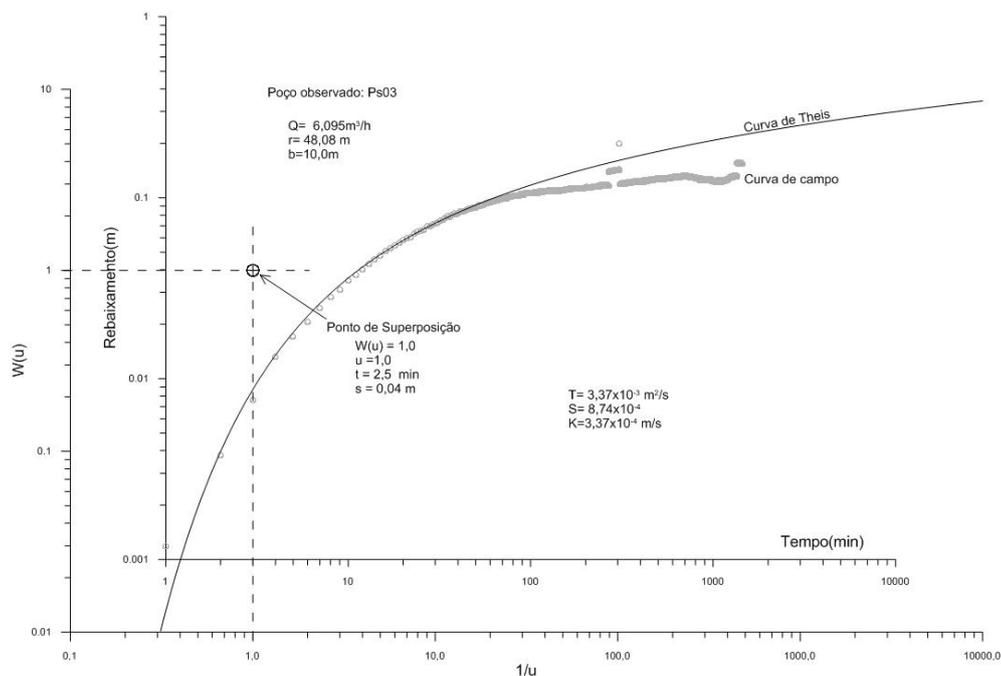
Poço	T(m <sup>2</sup> /s)	S	K(m/s)
SP02	1,95x10 <sup>-3</sup>	1,41x10 <sup>-3</sup>	1,95x10 <sup>-4</sup>
SP03	3,37x10 <sup>-3</sup>	8,74x10 <sup>-4</sup>	3,37x10 <sup>-4</sup>
SP04	1,22x10 <sup>-3</sup>	1,06x10 <sup>-3</sup>	1,22x10 <sup>-4</sup>
SP05	2,39x10 <sup>-3</sup>	7,51x10 <sup>-4</sup>	2,39x10 <sup>-4</sup>
média	2,23x10 <sup>-3</sup>	1,02x10 <sup>-3</sup>	2,23x10 <sup>-4</sup>

T - Transmissividade; S - Coeficiente de armazenamento; K - Condutividade hidráulica.



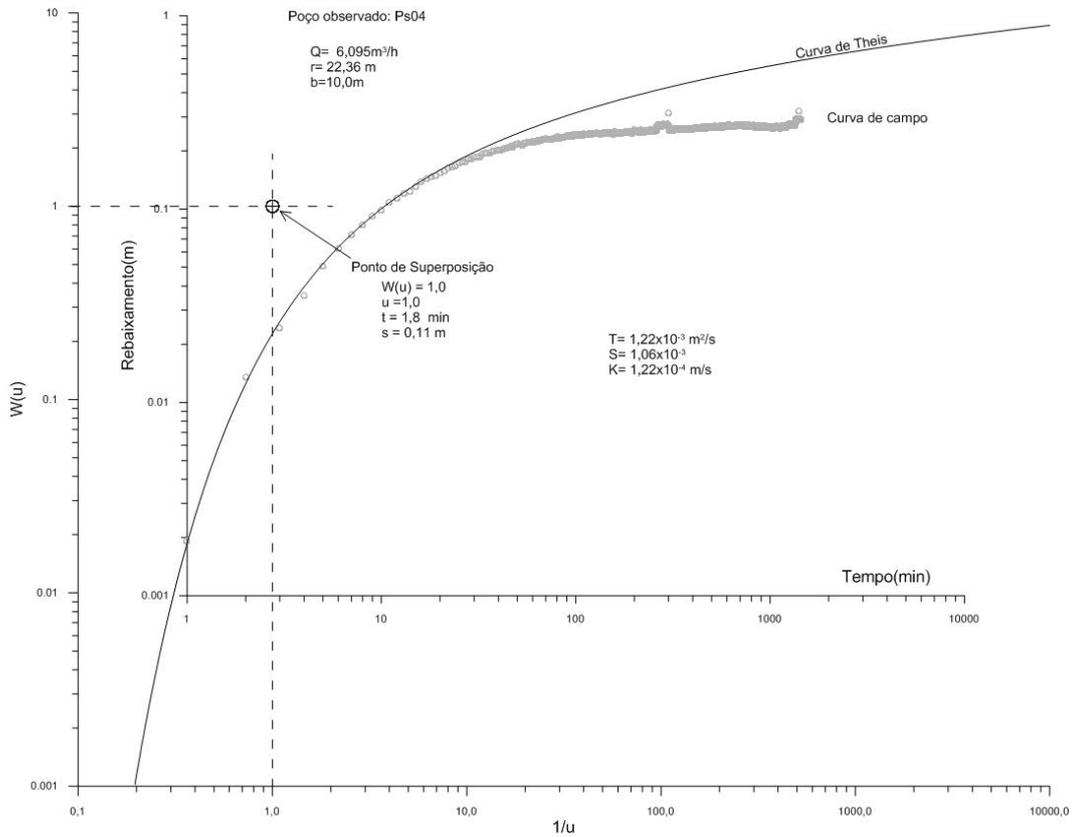
**Figura 7 - Aplicação da metodologia de superposição de Theis para determinação dos parâmetros T e S para o poço SP02**

**Figure 7 - Application of Theis superposition method to determination of T and S for well SP02**



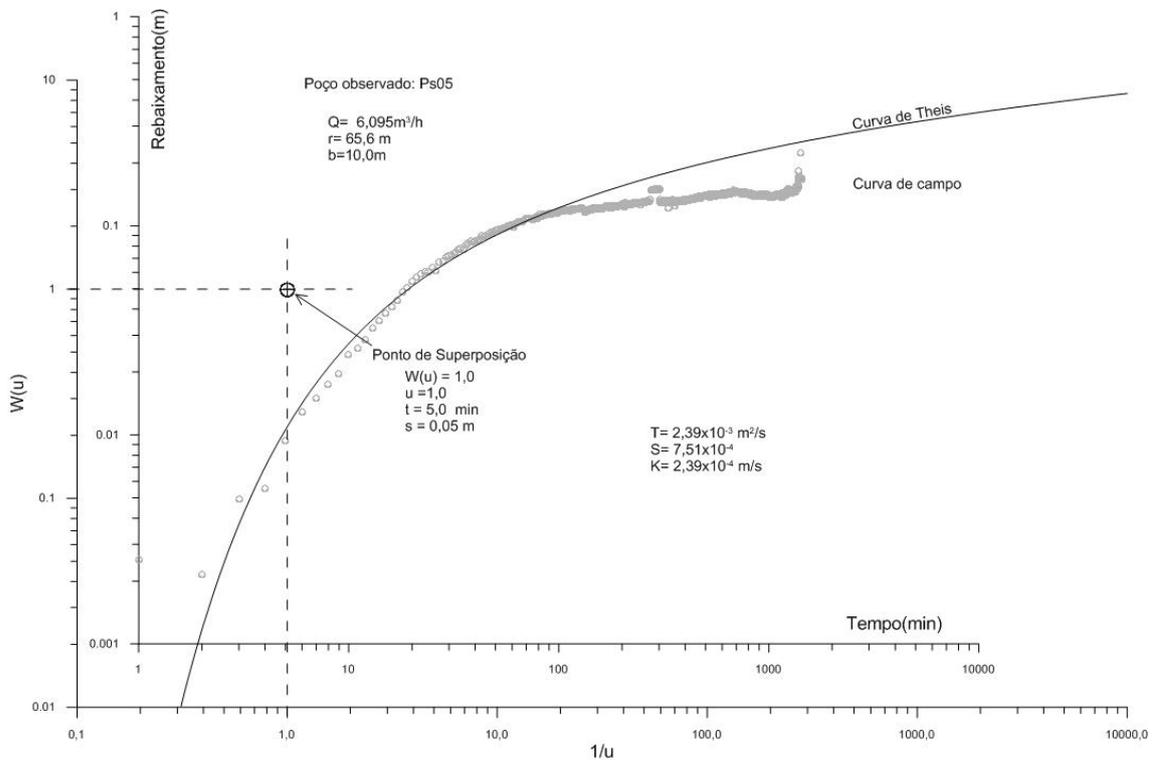
**Figura 8 - Aplicação da metodologia de superposição de Theis para determinação dos parâmetros T e S para o poço SP03**

**Figure 8 - Application of Theis superposition method to determination of T and S for well SP03**



**Figura 9** - Aplicação da metodologia de superposição de Theis para determinação dos parâmetros T e S para o poço SP04

**Figure 9** - Application of Theis superposition method to determination of T and S for well SP04



**Figura 10** - Aplicação da metodologia de superposição de Theis para determinação dos parâmetros T e S para o poço SP05

**Figure 10** - Application of Theis superposition method to determination of T and S for well SP05

Como os valores para os três parâmetros são relativamente próximos nos quatro poços de observação, foram adotados os valores médios como representativos para a aluvião no entorno da área experimental estudada.

A observação mais detalhada mostra que nos poços SP03 e SP05 os valores da transmissividade são maiores do que nos poços SP02 e SP04. Para o coeficiente de armazenamento aconteceu o contrário, os valores foram menores nos poços SP02 e SP05, ou seja, a difusividade hidráulica (T/S) foi maior nestes dois poços. A maior difusividade no sentido longitudinal pode estar associada a dois fatores, a recarga ao longo do rio Beberibe, e uma anisotropia do aquífero com relação à condutividade hidráulica. Ou seja, a difusividade seria maior no sentido do rio, que é o mesmo sentido de deposição dos sedimentos.

### Método de Thiem

Em todas as curvas observa-se a quase total estabilização dos rebaixamentos, verificando-se que na realidade o aquífero comportou-se como confinado (ou confinado com drenança), com recarga a partir do rio Beberibe. Sendo assim, o teste também foi analisado pelo método de Thiem, para determinação do raio de influência, e para confrontação do valor da transmissividade com os obtidos pelo método de Theis.

Thiem desenvolveu a sua equação para aquífero confinado em regime permanente, admitindo que a recarga fosse radial em direção ao poço. Nessas condições o aquífero se comportaria como uma ilha circular com o poço bombeado em seu centro.

A equação de Thiem, conforme Custodio e Llamas(1983), é escrita como:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left( \frac{R}{r} \right)$$

Sendo:

s = rebaixamento máximo em um ponto qualquer do aquífero (L)

T = transmissividade do aquífero (L<sup>2</sup>/T)

Q = vazão de bombeamento (L<sup>3</sup>/T)

R = raio de influência (L)

r = distância do poço bombeado a um ponto qualquer do aquífero (L).

Aplicando-se essa equação para dois poços de observação, subtraindo-se os rebaixamentos calculados e transformando a base neperiana

para decimal, a equação de Thiem é reescrita como:

$$s_1 - s_2 = \Delta s = \frac{0,366Q}{T} \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right)$$

Reescrevendo em função da transmissividade, tem-se:

$$T = \frac{0,366Q}{\Delta s} \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right)$$

Sendo:

T = transmissividade do aquífero (L<sup>2</sup>/T)

Q = vazão de bombeamento (L<sup>3</sup>/T)

Δs =variação de rebaixamento entre os poços de observação (L)

r<sub>1</sub> e r<sub>2</sub> = distância entre o poço bombeado e os poços de observação (L).

Como é nítida a feição de recarga nas curvas rebaixamentos, com a quase estabilização dos níveis dinâmicos, foi feita uma estimativa do rebaixamento máximo em cada um dos poços de observação, a partir de um gráfico semi-logarítmico, apresentados na figura 11.

Na tabela 4 são condensados os valores dos rebaixamentos máximos em cada poço de observação e suas respectivas distâncias ao poço bombeado.

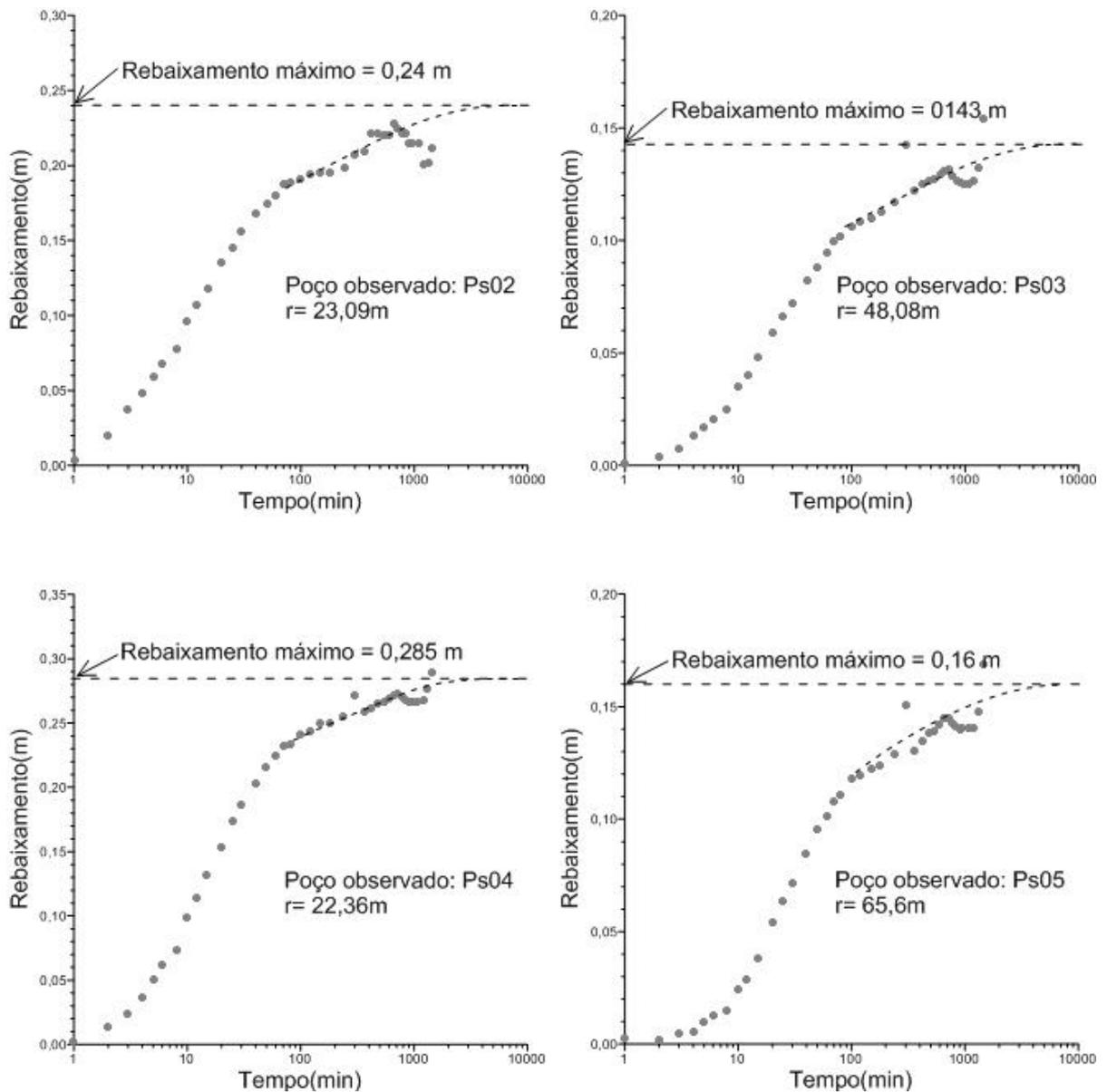
**Tabela 4** - Rebaixamentos máximos x distância do poço 02

**Table 4** - Maximum drawdown x distance to well 02

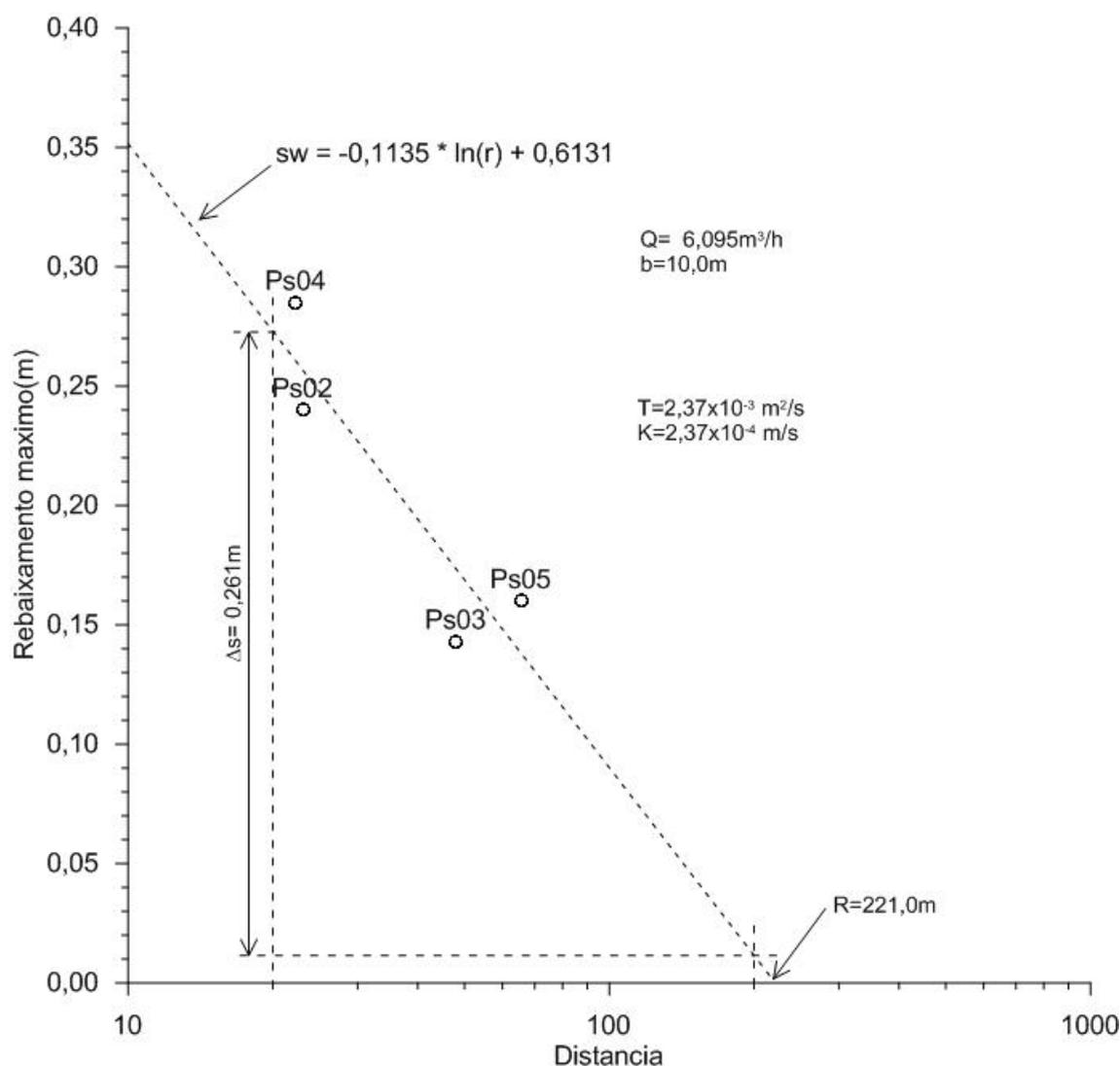
Poço	Rebaixamento Máximo(m)	Distância (m)
SP02	0,240	23,09
SP03	0,152	48,08
SP04	0,290	22,36
SP05	0,163	65,60

Na figura 12 é apresentado o gráfico semi-logarítmico do rebaixamento máximo em função da distância. Os valores de transmissividade e condutividade hidráulica encontrados foram 2,37x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s e 2,37x10<sup>-4</sup> m/s, respectivamente, enquanto o raio de influência foi 221 m.

Os valores de T e K calculados pelo método de Thiem e Theis (valores médios) são muito próximos, podendo ser considerados idênticos, apenas 6% de diferença. O raio de influência encontrado é mais representativo para o eixo longitudinal.



**Figura 11** - Estimativa dos rebaixamentos máximos nos poços de observação SP2, SP3, SP4 e SP5  
**Figure 11** - Forecast of maximum drawdown at observation wells SP2, SP3, SP4 and SP5



**Figura 12** - Determinação dos parâmetros T e K através do Método de Thiem, no aquífero às margens do rio Beberibe

**Figure 12** - Determination of T and K parameters by Thiem method, in aquifer at Beberibe river banks

## COMENTÁRIOS FINAIS

Para melhor conhecimento das características hidrogeológicas das aluviões na área da estação experimental no bairro de “Caixa d’Água”, às margens do rio Beberibe, entre Olinda e Recife (estado de Pernambuco), foram realizados testes de bombeamento com acompanhamento dos rebaixamentos num conjunto de poços de observação instalados na área.

Verificou-se pelo método de Theis e pelo método de Thiem, que as aluviões do rio Beberibe no entorno da referida estação experimental no bairro de Caixa d’água, apesar de formarem um aquífero raso, comportam-se hidráulicamente como confinado com recarga (recarga linear ao longo do contorno entre o aquífero e o rio).

Verificou-se que cerca de 30 minutos após o início do bombeamento, o cone de rebaixamento atinge o curso d’água e inicia uma recar-

ga induzida do rio para o aquífero, de modo que a curva real do rebaixamento perde aderência com a curva teórica e tende à estabilização após mais algum tempo.

Os cones de rebaixamentos têm a forma elíptica, com eixo maior paralelo ao curso do rio. Esse alongamento deve-se à recarga do rio durante o bombeamento, podendo também estar associada uma anisotropia do aquífero, sendo que neste caso as condutividades hidráulicas seriam maiores ao longo do rio Beberibe.

Para a transmissividade e a condutividade hidráulica representativas para a aluvião foi adotada a média aritmética entre os valores obtidos pelo método de Theis e o método de Thiem, que, a saber, são:  $2,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $2,03 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ . Para o coeficiente de armazenamento foi adotado o valor de  $1,02 \times 10^{-3}$ , que foi a média dos valores obtidos

pelo método de Theis.

Os resultados da análise hidrogeológica contribuíram para a verificação que o local é adequado para a aplicação de “Filtração em Margem”

devido ao fato de existir uma conexão hidráulica entre o rio e o aquífero, e que o bombeamento tem a capacidade de induzir uma recarga do rio para o aquífero.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FACEPE (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo financiamento do projeto APQ-1173-3.01/08 e pelas bolsas para os alunos de pós-graduação, ao CNPq pelo projeto 479126\_2011-9, à COMPESA pelo apoio ao projeto piloto, aos professores Maurício Sens (UFSC) e Günkel Günter (TU-Berlin) e suas equipes pelas parcerias sobre a temática.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8036/83 - Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios - Procedimentos. 1983.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6502/95 - Rochas e Solos - Terminologia. 1995.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-15495-1/07 - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados. Parte 1: Projeto e construção. 2007.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6484/01 - Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. 2001.
- BARBOSA, J. A.; LIMA FILHO, M. **Os Domínios da Bacia da Paraíba**, Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, 2005 ([http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0333\\_05.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0333_05.pdf))
- BATU, V. **Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis**. John Wiley & Sons, Nova York, 727p, 1998.
- BOUWER, H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, vol.10, p.121-142. 2002.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Norma 6410. Amostragem e monitoramento das águas subterrâneas - Norma CETESB, 1988.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações**. Fernando A. C. Feitosa, João Manoel Filho, Edilton C. Feitosa e J. Geilson Demétrio (Org.). 3ª. Edição. CPRM. 2008.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife, Projeto Singre II, vol.2, Recife, 2001. (<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=23&inford=175>)
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. (Organizadores). **Hidrologia Subterrânea**, Vol. 01, Ediciones Omega, Barcelona, 1983.
- GUNKEL, G. **Bank filtration - an eco-technology for drinking water treatment and the application to the semi-arid zone**. Second International Conference: Climate, Sustainability and Development in Semi-arid Regions. Fortaleza, Ceará, Brazil. 2010.
- OLIVEIRA, L. T. **Aspectos Hidrogeológicos da Região Costeira Norte de Pernambuco - Paulista a Goiana**. Recife, 118p, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. 2003.
- PAIVA, A.L.R. de. **O Processo de Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe**. Recife, 172p, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. 2009.
- PAIVA, A.L.R. de; CABRAL, J.J.S.P.; DEMÉTRIO, J.G. A.; SOBRAL, M. C. M. Filtração em Margem para Indução de Recarga e Melhoria da Qualidade de Água - Estudo de Caso: Rio Beberibe. *Águas Subterrâneas*, v.24, n.1, p.103-114. 2010.
- PERNAMBUCO - GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. SECTMA - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH. Recife - PE. 1998.
- PERNAMBUCO - GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. SECTMA - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco. Coordenação Técnica de Simone Rosa da Silva. 104p. Recife - PE. 2006.
- RAY, C.; SCHUBERT, J; LINSKY, R.B; MELIN, G. **Riverbank Filtration - Improving Source-Water Quality**. Chapter: Introduction. Kluwer Academic Publishers. California, USA. 2002.
- SAHOO, G.B.; RAY, C.; WANG, J.Z.; HUBBS, S.A.; SONG, R.; JASPERSE, J.; SEYMOUR, D. Use of artificial neural networks to evaluate the effectiveness of riverbank filtration. *Water Research*, v.39, p. 2505-2516. 2005.
- SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.; MONDARDO, R. I.; MELO FILHO, L. C. Filtração em Margem. In: PÁDUA, V. L. (Coord.). Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas

de tratamento de água para consumo humano. RJ:ABES, cap.5. 2006.

SOUSA, E.M; LIMA FILHO, M. Marco Estratigráfico nos Arenitos Calcíferos (Formação Itamaracá) do Campaniano da Bacia Paraíba à Luz da Estratigrafia de Sequências. *Revista de Geologia*, Fortaleza, V18, N.1, p. 61-68. 2005.

THEIS, C. V., The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-water Storage”, Transactions, *American Geophysical Union*, Vol. 16, pp. 519-524. 1935.

TUFENKJI, N.; Ryan, J. N.; E Elimelech, M. *Bank filtra-*

*tion: a simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water*. Environmental Science & Technology. Colorado, USA. p. 423 – 428. 2002.

WANG, J. *Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality*. Chapter: Riverbank Filtrate Case Study at Louisville, Kentucky. Kluwer Academic Publishers. California, USA. 2002.

WANG, J.; J. SMITH; L. DOOLEY. *Evaluation of riverbank infiltration as a process for removing particles and DBP precursors*. Proceedings, Water Quality Technology Conference, American Water Works Association, Denver, Colorado.1995.