

## Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva<sup>1</sup>, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral<sup>2</sup>, Dayana Andrade de Freitas<sup>2</sup>

anderson.paiva@ufpe.br, jcabral@ufpe.br, dayanaafandrade@yahoo.com.br

Recebido: 25/04/12 – revisado: 22/08/12 – aceito: 10/12/12

### RESUMO

Um projeto piloto com aplicação da técnica de Filtração em Margem (FM) foi implantado às margens do rio Beberibe, no bairro de Caixa d'Água, localizado na divisa entre Olinda e Recife. A técnica de Filtração em Margem é caracterizada pela locação de poços de bombeamentos próximos a rios e/ou lagos no intuito de induzir água do manancial superficial até o poço. Neste trajeto a água passa por processos físicos e bioquímicos que melhoram sua qualidade. A FM é utilizada largamente em países da Europa no abastecimento de água já por muito tempo. No desenvolvido do projeto foram realizadas sondagens para caracterização da área e construção de perfis litológicos, testes de condutividade hidráulica, perfuração do poço de produção e de 5 poços de observação além dos monitoramentos de níveis potenciométricos e de qualidade de água. Para um melhor entendimento do percurso da água pelo solo foi elaborado um modelo conceitual e aplicado um software disponível. A contribuição de fluxo do corpo d'água superficial para o sistema subterrâneo é calculada dependendo do gradiente hidráulico e da drenança da camada do leito do rio. As cargas hidráulicas e os fluxos obtidos pelo modelo condizem com as observações de campo e o objetivo desse artigo é descrever o projeto piloto e a modelagem computacional realizada na área experimental.

**Palavras-chave:** Filtração em Margem. Modelagem Numérica. Modflow. Rio Beberibe.

### INTRODUÇÃO

A Filtração em Margem (FM), conhecida como River Bank Filtration - RBF, consiste na utilização de poços próximos às margens de rios ou reservatórios, utilizando os materiais sedimentares do leito e das margens do manancial superficial como meio filtrante. Com a ação do bombeamento através dos poços, cria-se uma diferença de carga hidráulica entre o manancial e o lençol freático, ocorrendo uma indução da água do manancial superficial, através do meio poroso, até o poço (HUNT; SCHUBERT; RAY, 2002; TUFENKJI; RYAN; ELIMELECH, 2002). Os sistemas de Filtração em Margem reduzem consideravelmente a concentração de poluentes presentes na água de superfície devido a processos físico-químicos e biológicos que consequentemente atuam na melhoria de qualidade da água (HISCOCK; GRISCHEK, 2002; HOFFMANN; GUNKEL, 2011;

LORENZEN et al., 2010; STAUDER et al., 2012) ou pelo menos podem ser um passo importante de pré-tratamento aos tratamentos convencionais de água para o abastecimento público (RAY; MELIN; LINSKY, 2002).

Vários estudos relatam que a FM é eficiente na eliminação ou redução de pesticidas, resíduos farmacêuticos (HEBERER et al., 2004), matéria orgânica natural (GRÜNHEID; AMY; JEKEL, 2005), microrganismos patogênicos como, *Cryptosporidium* e *Giardia* (BERGER 2002; METGE et al., 2010; WEISS et al., 2005), cianobactérias e suas cianotoxinas (CHORUS; BARTRAM, 1999; DILLON et al., 2002; SENS et al., 2006).

A FM tem sido utilizada como importante fonte para a produção de água para consumo humano em diversos países da Europa (HOFFMANN; GUNKEL, 2011), Ásia (DASH et al., 2010; LEE et al., 2009; WU et al., 2007), África (SHAMRUKH; ABDEL-WAHAB, 2008) e Estados Unidos (HISCOCK; GRISCHEK, 2002; RAY; MELIN; LINSKY, 2002). No Brasil estudos pioneiros foram feitos por Sens et al. (2006), na utilização de FM para remoção de cianobactérias e cianotoxinas na Lagoa do Peri, Florianópolis, estado de Santa Catarina. No nordeste, a técnica é promissora para a

<sup>1</sup> Núcleo de Tecnologia, Centro Acadêmico do Agreste - UFPE

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE

região semiárida (GÜNKEL, 2010). Além disso, no estado de Pernambuco um sistema piloto de Filtração em Margem foi instalado no rio Beberibe para avaliação da técnica sob condições geológicas e hidrológicas locais. A água do poço de produção apresentou resultados satisfatórios dentro dos padrões de potabilidade exigidos pela legislação para qualidade de água para consumo humano (PAIVA et al., 2010).

Para aplicação da FM é necessário analisar algumas características hidrogeológicas locais que favorecem a conexão hidráulica entre o manancial superficial e o poço de produção tais como heterogeneidade das camadas de sedimentos, condutividade hidráulica (FLECKENSTEIN; NISWONGER; FOGG, 2006). Adicionalmente deve-se avaliar a sazonalidade de fluxo do rio, estabilidade do canal de fluxo, qualidade da água dos corpos hídricos e da água subterrânea (RAY; MELIN; LINSKY, 2002; SCHUBERT, 2002), considerando que a água advinda dos poços de produção sob condições dos sistemas de FM é uma mistura entre a água do manancial superficial e da água subterrânea (GRISCHEK et al., 2010).

Considerando interações água superficial com água subterrânea os sistemas de Filtração em Margem são caracterizados pela interação entre rio-aquífero (SOPHOCLEOUS, 2002). Schubert (2002) avaliaram aspectos hidráulicos da FM no rio Reno onde as interações rio-aquífero foram regidas pelas flutuações no nível da água do rio, com isso o resultante dos gradientes entre a rápida mudança do nível do rio e a gradual adaptação da água subterrânea controla o fluxo e o transporte na FM.

Os processos que envolvem a interação rio-aquífero que ocorre na Filtração em Margem ainda são um desafio aos pesquisadores. Nos últimos anos, em diversos países, várias pesquisas vêm sendo realizadas para entender melhor os processos físicos e bioquímicos que ocorrem na zona de interação entre as águas superficiais e subterrâneas.

Para modelar o fluxo e transporte em meio poroso, muitos hidrogeólogos do mundo continuam usando o Modflow (MCDONALD; HARBAUGH, 1988) que tem se mostrado robusto e eficiente, e que ao longo do tempo tem recebido contribuições de novos pacotes e subrotinas, incorporando interfaces gráficas e transporte de solutos. Na pesquisa realizada, a versão do software utilizada foi a "Visual Modflow 4.2 Pro" que apresenta interfaces de pré e de pós processamento elaboradas pela Waterloo/Schlumberger.

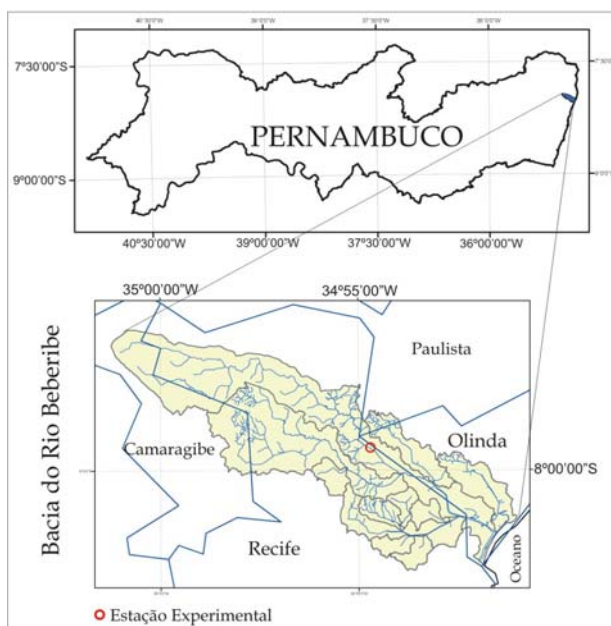
O presente artigo descreve um projeto piloto de FM desenvolvido às margens do rio

Beberibe no Estado de Pernambuco e apresenta uma modelagem computacional em busca de um melhor entendimento dos processos de fluxo entre o rio e o sistema aquífero a partir do bombeamento induzido por um poço de produção.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Descrição da Área

O projeto piloto de Filtração em Margem foi instalado no bairro de Caixa d'Água, na cidade de Olinda, no terreno da COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento). O projeto piloto teve início em março de 2009, contando com um poço de produção e 5 poços de observação dispostos na área de estudo, com os quais são acompanhados os níveis potenciométricos semanalmente. Atualmente, este poço produz ininterruptamente 12.500 L/hora, apresentando um rebaixamento da ordem de 4,5 metros.



**Figura 1 – Localização área de estudo, às margens do rio Beberibe na divisa entre Olinda e Recife**

A área do projeto está situada na Região Metropolitana de Recife (RMR), na divisa entre Olinda e Recife, limitada pelas coordenadas UTM 9115500m a 9116000m Norte e 289500m a 290000m Leste, MC -33° datum SAD69 (Figura 1), sendo o rio

Beberibe o limite entre os municípios de Olinda e Recife neste trecho da RMR. A RMR possui economia basicamente urbana, apresentando muitas habitações às margens do curso d'água sem instalações sanitárias causando problemas relacionados com recursos hídricos, estas dificuldades vêm sendo enfrentadas, mas ainda existem muitos problemas sociais e ambientais.

Na área experimental de Caixa d'Água algumas décadas atrás funcionava uma captação a fio d'água no rio Beberibe, nas margens da própria EE Caixa d'Água, no entanto, com a degradação crescente do rio esta captação foi desativada, e realocada para um trecho a montante, onde funciona atualmente.

A região pode ser considerada como uma área peri-urbana com um alto grau de urbanização no entorno da área experimental em Caixa d'Água, nos trechos médio e baixo da bacia do rio Beberibe, após a BR101, mas apesar disto, ainda existem áreas verdes nas proximidades da área de estudo.

#### **Bacia do Rio Beberibe**

A bacia do Beberibe encontra-se totalmente inserida na RMR, envolvendo parte dos municípios de Recife (54Km<sup>2</sup>), Olinda (14Km<sup>2</sup>) e Camaragibe (7,45Km<sup>2</sup>). Em valores percentuais, esses municípios envolvem 64,51% (Recife), 21,29% (Olinda) e 14,19% (Camaragibe) (Campos, 2003).

Os dados climáticos foram obtidos da Estação Meteorológica do Recife (Curado), com uma série histórica de 30 anos, para o período de 1961 a 1990 (INMET/3ºDISME, 2003).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da área é do tipo As', quente e úmido, com chuvas de outono e inverno (CAMPOS, 2003), e está situada na zona fisiográfica do litoral - Mata Atlântica. A precipitação pluviométrica mostra-se abundante em relação à região do Nordeste brasileiro, com média de 2.450,7 mm/ano, apresentando um período mais chuvoso que vai de março a agosto (seis meses), com valor máximo em julho (389,7mm) e um período mais seco, de setembro a fevereiro (seis meses) com o valor mínimo em novembro (45,2mm) e o valor médio mensal de 204,2mm.

A evaporação total alcança valores de 1.323,4mm/ano, superando a precipitação pluviométrica entre os meses de outubro e fevereiro. O valor máximo da evaporação é observado em fevereiro (153,3mm), para uma média anual de 110,3mm. A temperatura média anual é de 25,5°C, com valor máximo médio mensal de 26,6°C nos

meses de janeiro e fevereiro, e média mínima mensal de 23,9°C no mês de julho. A amplitude térmica média anual é de apenas 2,7°C, tornando o clima da região agradável durante todo o ano.

A região central da cidade do Recife, incluindo também uma faixa a sudeste e a leste de Olinda, é composta por uma planície com cotas variando de 1,0m a 10,0m acima do nível do mar, denominada planície costeira, tendo sua cota média entre 3,0 e 4,0 metros e inclinação suave para leste, semicircundada por uma linha de morros, com cotas de até 100m gerando uma feição de anfiteatro.

Com relação à cobertura vegetal, a bacia do Beberibe apresenta duas porções bem distintas: a região à montante da BR-101, onde predominam as culturas em chácaras, sítios e granjas, encontrando-se ali resquícios da mata exuberante que constituía a vegetação original desta região; e a porção à jusante da BR-101, onde o processo de ocupação urbana tornou rarefeita a vegetação (CAMPOS, 2003).

A área de estudo está inserida totalmente na bacia hidrográfica do rio Beberibe, e pertencente ao primeiro grupo de Bacias Hidrográficas Litorâneas (GL-1) do Estado de Pernambuco.

A bacia do Beberibe possui uma área de drenagem de 81Km<sup>2</sup> e representa cerca de 0,08% do estado de Pernambuco. O rio Beberibe é formado pelos rios Araçá e Pacas, com nascentes no município de Camaragibe (Aldeia). Possui uma extensão de aproximadamente 19Km, desde a confluência desses dois rios até a desembocadura no Oceano Atlântico. Em períodos normais, este rio é estreito, com largura em torno de 6 metros (PERNAMBUCO, 1997). O afluente mais importante pela margem direita é o rio Morno, que recebe uma grande contribuição do riacho Macacos e córrego do Euclides, ainda em seu trecho superior. Pela margem esquerda, recebe os riachos das Moças, do Abacaxi ou Lava-Tripa e o canal da Malária.

Do ponto de vista hídrico, a bacia do rio Beberibe pode ser dividida em três compartimentos: o alto Beberibe, das nascentes até próximo a BR-101; o médio Beberibe, a partir da BR-101 até o seu encontro com o rio Morno; e o baixo Beberibe, a partir da confluência com o Morno até a foz conjunta com o Capibaribe (CAMPOS, 2003).

O segmento médio do rio Beberibe, com extensão de cerca 3,5Km, vai da BR-101 norte até o encontro com o rio Morno. Este trecho inclui a estação de bombeamento d'água da COMPESA, no bairro de Caixa d'Água, onde se localiza a área de estudo.

A CPRH (Agência Estadual de Meio Ambiente / PE) possui algumas estações de amostragem da qualidade da água nos rios do estado. De acordo com o histórico de monitoramento da CPRH, no trecho da área experimental, ocorre problemas tanto para DBO, OD e coliformes fecais, extrapolando os limites de qualidade da água (PAIVA, 2009).

### Hidrogeologia Local

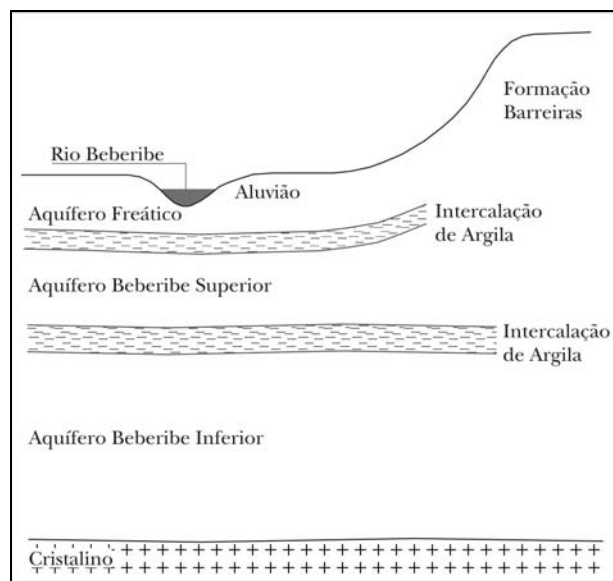
O Grupo de Pequenas Bacias Litorâneas - GL1 está situada predominantemente sobre rochas sedimentares da bacia Pernambuco-Paraíba e rochas do embasamento cristalino. A Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, de idade Terciária apresenta-se, estruturalmente, com o embasamento cristalino mergulhando suavemente para leste, constituindo uma faixa continental de largura média em torno de 20Km ao longo de todo o litoral norte da RMR, estreitando-se quase que abruptamente nas proximidades do Lineamento Pernambuco e abrange a unidade lito-estratigráfica: Formação Beberibe do Cretáceo Superior.

A formação Beberibe é composta de uma sequência essencialmente arenosa, com uma espessura média de 200m, em geral sem fósseis, constituindo-se de arenitos friáveis, cinzentos a cremes, mal selecionados, com componentes argilosos (MABESOONE; ALHEIROS, 1991).

Estes arenitos calcíferos representam uma fácies litorânea marinha e aparecem apenas em subsuperfície, constituindo-se no Beberibe Superior, enquanto a seção inferior, de caráter arenoso, com algumas intercalações de silte e argila, denomina-se de Beberibe Inferior e apresenta-se como o principal aquífero na RMR. Estas intercalações de silte e argilas têm espessura média de 10m. Regionalmente, este nível siltico-argiloso, funciona como aquífero, separando os dois subníveis e condicionando um comportamento de semi-confinado para o nível inferior (PERNAMBUCO, 1998). Acima da camada terciária localiza-se a formação Barreiras que compõe a cadeia de morros de Olinda e Recife e as camadas de aluvião nos vales dos cursos d'água, onde situa-se o poço em estudo (Figura 2).

Os poços profundos da região podem chegar até cerca de 200 m de profundidade e captam água do aquífero Beberibe superior, do Beberibe inferior (água com menor dureza) ou de ambos quando se pretende obter maior quantidade de água. No processo de filtração em margem, o objetivo não é utilizar água do aquífero profundo,

mas sim, utilizar água do rio induzido para o freático ampliando a oferta de água para abastecimento.

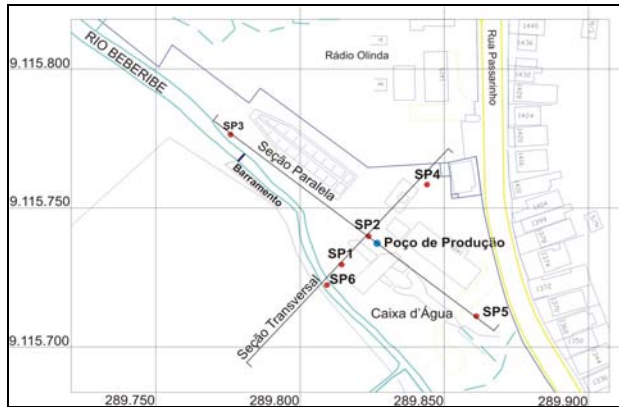


**Figura 2 – Esquema das camadas geológicas da região onde se localiza o projeto piloto, fora de escala**

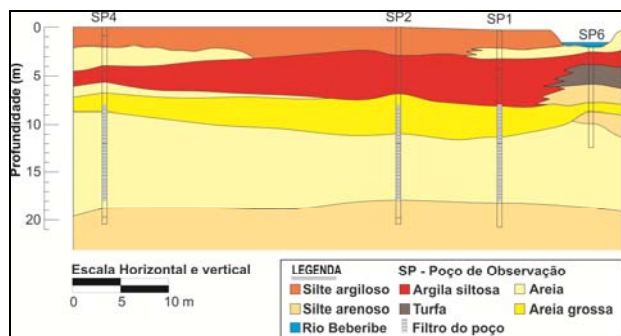
Para um detalhamento do subsolo local, como parte do projeto de FM, foram executados 6 furos de sondagens (Figura 3), sendo um deles no leito do rio, em outubro de 2007. O método de execução dos furos de sondagens seguiram as recomendações da ABNT, segundo as normas NBR-8036, NBR-6484, e NBR-6502. Foram coletadas 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. Com as informações obtidas dos perfis de sondagem foram traçadas seções litológicas paralela e transversal ao rio Beberibe. A figura 4 ilustra a seção transversal, conforme situado na figura 3. A numeração dos furos de sondagens são da equipe de perfuração, seguindo a ordem de perfuração.

A seção transversal ao rio Beberibe foi elaborada a partir das informações dos furos de sondagens SP4, SP2, SP1 e SP6 (leito do rio). A seção inicia-se com material fino, silte-argiloso, gradando imediatamente para uma areia fina a média. Em seguida, há presença de um nível argiloso contínuo, argilo-siltoso (ao longo de toda a seção), com espessura variando entre 2 e 5 metros.

Encontrando-se sob o leito do rio uma camada com turfa. Observou-se uma camada com areia grossa também contínua em toda a seção, sob a camada argilosa. A distribuição dos materiais identificados apresenta-se uniforme, o que pode ser visualizado pela seção litológica paralela ao rio Beberibe.



**Figura 3 – Localização dos furos de sondagens na área experimental de Caixa d'Água (Olinda/Recife, PE)**



**Figura 4 – Seção litológica transversal ao rio Beberibe, na área experimental de Caixa d'Água (Olinda/Recife, PE)**

### Testes e Monitoramento

Para o projeto de FM um poço de 15 metros de profundidade foi construído, pelo método de perfuração rotativa com circulação direta, aproximadamente no centro da área experimental. Este poço de produção possui diâmetro de 6" (150 mm) e zona filtrante dos 6,00 aos 12,00 metros de profundidade (PAIVA, 2009).

Aproveitando-se os furos de sondagens, exceto o no leito do rio, foram instalados poços de observação. A construção destes poços de monitoramento foi executada seguindo padrões e recomendações NBR-15495-1/2007 e Norma 6410 da CETESB, tomando atenção para a camada de

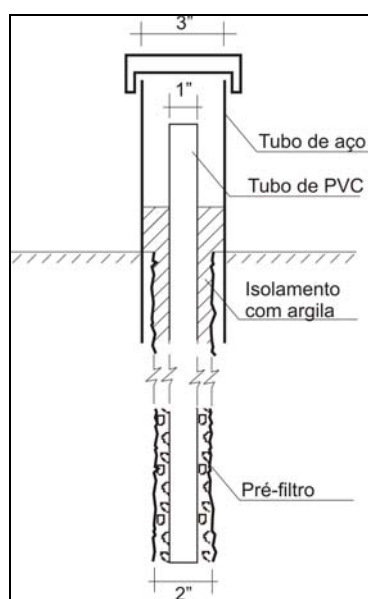
filtro, colocação do tubo de proteção metálico com tampão, e proteção da parte superficial com base cimentada. Estes poços são constituídos de tubo PVC de 1" (uma polegada) e a extremidade acima do solo foi protegida por um tubo de aço de 1,20 m e 3" de diâmetro. A instalação da tubulação para o poço de observação foi feita logo após a conclusão da perfuração de cada um dos furos de sondagem, e para o trecho do filtro dos poços foram feitas ranhuras transversais ao tubo a cada 10,00 cm, com 0,80 mm de espessura, ao longo de 10,00 metros de comprimento, iniciando a partir dos 8,00 metros de profundidade. Também foi utilizado material granular propício para a zona filtrante (Figura 5).

Para estimativa do parâmetro condutividade hidráulica, testes Slug Test e Bail-Down Test foram executados para cada um dos poços de observação. Onde nestes testes, adiciona-se e retira-se um determinado corpo de volume conhecido no poço, respectivamente, e acompanha-se o tempo de recuperação do nível d'água inicial. O valor médio obtido foi  $1,5 \times 10^{-5}$  m/s, sendo essa informação é resultado das características no entorno de cada poço individualmente. Após a construção do poço de produção, foi realizado o teste de aquífero, onde acompanha-se o rebaixamento no próprio poço de produção, conjuntamente com a informação em outro poço de observação. Neste teste, obteve-se uma condutividade hidráulica estimada de  $3,0 \times 10^{-4}$  m/s, a qual abrange basicamente toda a área de estudo, sendo mais representativo do aquífero (PAIVA, 2009).

O sistema de FM entrou em operação no dia 17/03/2009. O poço de produção opera continuamente, com uma bomba centrífuga de 1,5CV, captando 12,5 m<sup>3</sup>/h. Campanhas de medição dos níveis potenciométricos foram realizadas anteriores a entrada em operação do poço de produção, extraindo-se então uma configuração do fluxo subterrâneo original na área. Após, o sistema entrar em operação os níveis potenciométricos foram monitorados, a princípio semanalmente. Concomitantemente, leituras da lâmina d'água no rio Beberibe, no trecho que margeia a área experimental, também foram obtidas. Observou-se que o sistema estabilizou o rebaixamento do nível freático em poucas horas, após ligar a bomba.

Como objetivo principal de um projeto de Filtração em Margem, a qualidade da água tanto do rio Beberibe quanto do poço de produção foram monitorados, com parâmetros físico-químicos, onde semanalmente amostras de água foram coletadas. Nas mesmas campanhas de medição dos níveis, amostras de água foram coletadas. Os valores

observados para os parâmetros analisados da água do poço de produção (pH, turbidez, condutividade elétrica, dureza total, amônia, nitrito, nitrato, DBO, DQO, ferro total e manganês total) estiveram todos dentro dos padrões de potabilidade (FREITAS et al., 2012; PAIVA et al., 2010) estabelecidos pela portaria do Ministério da Saúde n.2914/2011 (BRASIL, 2011). O que comprova a eficácia da Filtração em Margem implementada nas margens do rio Beberibe em fornecer água de melhor qualidade em relação a água superficial já contaminada. Complementarmente ao monitoramento da qualidade, também foi analisados dados isotópicos de deutério e oxigênio 18, comprovando a contribuição do rio Beberibe para a água subterrânea (SANTOS et al., 2010).



**Figura 5 – Ilustração esquemática da construção dos poços de observação**

### Características do Modelo

O modelo conceitual, observando-se os perfis litológicos apresentados por Paiva et al. (2010), constitui-se de três camadas. Sendo a primeira camada a superior, a qual possui a menor permeabilidade. Já a segunda camada é a que possui o maior valor de condutividade hidráulica, sendo a principal zona de captação. E logo abaixo, uma outra camada, ainda na zona de captação do poço de produção, no entanto, com uma condutividade hidráulica inferior a da camada 2. Todas estas três camadas estão dentro do aquífero freático formado

por sedimentos recentes sobrepostos à camada de argila que separa a camada sedimentar terciária que compõe o aquífero Beberibe. Esta região sofre influência de recargas tanto do escoamento de base do rio Beberibe, onde deve ocorrer uma interação rio-aquífero, como também de zonas verdes que contribuem naturalmente para a área de estudo. O rio Beberibe na área de estudo possui uma largura média de 4 metros. Com relação ao nível d'água, há uma pequena barragem de elevação de nível que ocasiona um desnível de cerca de 1,0 metro nos níveis de montante e jusante. Este barramento foi instalado pela COMPESA décadas atrás, quando se fazia a captação a fio d'água no rio Beberibe. A lâmina d'água do rio Beberibe jusante ao barramento é de cerca de 15 centímetros durante o período seco. Durante eventos de alta intensidade pluviométrica a lâmina d'água do rio pode chegar a 3,0 m.

Para desenvolver o modelo computacional, foi utilizado o software Visual Modflow versão 4.2 Pro. A área utilizada no modelo é de 260 metros de comprimento por 116 metros de largura, com 18 metros de profundidade. Estando o barramento situado no centro da malha, e o rio situado no centro da malha paralelo ao eixo x. Orientou-se a malha paralela ao rio, para facilitar o traçado da mesma pela característica das células retangulares. Inicialmente, considerando as células regulares de 10x10m, exceto no trecho do rio, projetou-se uma malha com 13 linhas e 26 colunas. No entanto, houve a necessidade de refinamento da malha, no qual alcançou-se uma configuração com 30 linhas, 57 colunas e 6 camadas, conforme figura 06. Foi refinado em torno do rio, poço e barramento no rio, para representar melhor os gradientes de carga hidráulica, respeitando-se o critério de uma célula não ser menor que a metade da célula vizinha (ANDERSON; WOESSNER, 1992).

Em termos das camadas, pela geologia, seriam três zonas. No entanto, subdividiu-se cada camada em duas para melhor representação computacional. As camadas 1 e 2 (mais superficiais) representam as camadas de menor condutividade hidráulica, uma zona onde ocorreu aterros. A camada 3 representa a camada de maior condutividade hidráulica, zona produtora. E as camadas 5 e 6 (mais profundas) representam a camada com condutividade hidráulica intermediária, porém contribui para o poço de produção.

A condição de contorno da base impermeável do aquífero (abaixo da camada 6) é de fluxo nulo. Nas faces laterais o Modflow assume implicitamente que não há fluxo. Para a condição

de contorno rio o software possui um pacote específico, no qual simula-se a influência dos corpos d'água superficiais no fluxo subterrâneo. Avalia-se a contribuição de fluxo d'água do rio para o aquífero ou vice-versa dependendo da carga hidráulica entre os dois sistemas, a partir da percolação na camada do leito do rio determinado pela condutância desta camada (HARBAUGH et al., 2000). Como avaliado por Osman e Bruen (2002) o uso de um modelo matemático para fluxo em aquíferos saturados, caso do Modflow, é adequado tanto quando há a conexão da camada do leito do rio com a formação aquífero livre.

Para simulação, adotou-se dois períodos, um seco (0 a 183 dias) e um chuvoso (183 a 365 dias). Considerando-se as camadas isotrópicas, as camadas 1, 5 e 6 possuem condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-4}$  m/s, a camada 2 apresenta  $1 \times 10^{-5}$  m/s, e a camada 3 possui  $3 \times 10^{-4}$  m/s. O valor para a camada 3 foi resultado do teste de aquífero realizado, os demais valores foram estimados a partir das informações do material coletado na perfuração dos poços. As cargas hidráulicas iniciais foram adotados com a cota 0m. A recarga para o período seco é de 218 mm/ano e para o período chuvoso de 571 mm/ano. Costa et al. estimaram o percentual de recarga para o aquífero Beberibe, que compreende a parte superior e a parte confinada, um valor médio de 11% do volume precipitado do total anual. No entanto, o aquífero considerado é apenas a parte livre e são observadas grandes áreas verdes próximas à instalação do projeto piloto. Sendo assim, chegou-se a estes valores de recarga, considerando que há 20% do precipitado recarregando no período seco, onde a precipitação média dos 6 meses secos é de 546,7 mm/ano (de setembro a fevereiro); e há 15% para o período chuvoso, onde a precipitação média é de 1904 mm/ano (março a agosto) (COSTA; COSTA FILHO, 2002; INMET, 2003). Além dessa recarga, foi necessário adicionar duas zonas de entrada de fluxo, o qual foi adicionado através do pacote "Recarga" diretamente na terceira camada. Isso se deve a proximidade da zona de recarga.

O poço de produção foi inserido nas coordenadas X = 73,75m, e Y = 38,75m, de forma a ficar no centro da célula. O filtro foi posicionado nas cotas de -6 a -13m, e taxa de bombeamento é de 300m<sup>3</sup>/dia. Os cinco poços de observação foram inseridos com a posição do ponto médio do filtro na cota de -13m, e as coordenadas podem ser visualizadas na tabela 1. Para os valores de carga hidráulica observado nos poços de observação, foi obtido do histórico um valor médio para o período chuvoso e outro para o período seco (Tabela 1).

Com relação ao rio, foi adotado dois grupos, um para o trecho montante ao barramento e outro para o trecho de jusante. A cota do leito do rio é de -2 m. A condutividade hidráulica adotada para a camada do leito do rio é de  $1 \times 10^{-5}$  m/s (VERAS, 2011). As cotas do nível d'água no rio variaram para o período seco e chuvoso, trecho de jusante com cotas de -1,6 e -1,8 m, e trecho de montante com cotas de -0,3 e -0,8 m. No trecho do barramento, onde no modelo computacional aparece apenas o desnível no nível d'água nas duas células centrais, a variação brusca da carga hidráulica na condição de contorno "rio" provocou problema numéricos. Por isso, foi necessário refinar as células, a montante e jusante ao barramento, e adicionar uma variação gradativa no nível d'água nas células do rio, como pode ser visualizado na figura 6.

**Tabela 1 – Parâmetros dos poços de observação inseridos no modelo computacional**

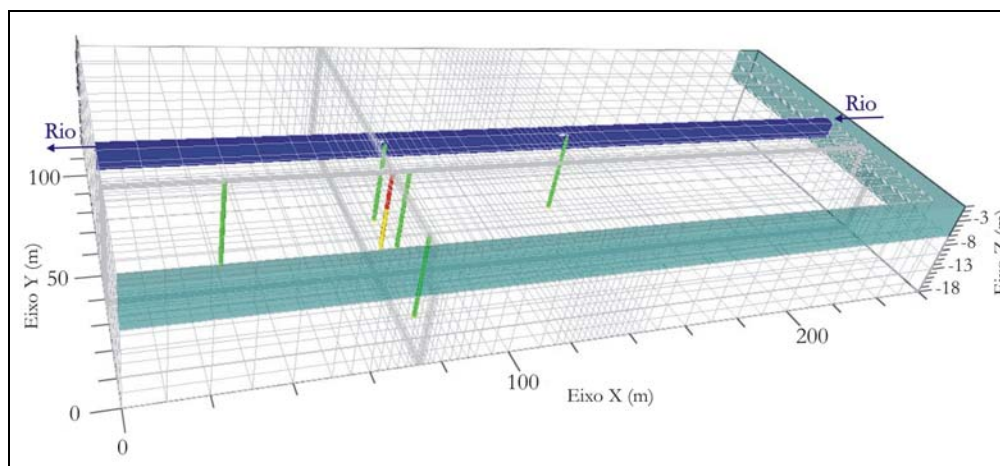
Poço	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	N.Potenc. Período Seco (m)	N.Potenc. Período Úmido (m)
SP1	76,25	53,00	-1,63	-1,44
SP2	78,75	38,75	-2,11	-2,00
SP3	136,00	53,00	-0,67	-0,44
SP4	73,75	8,75	-1,20	-1,00
SP5	28,75	38,75	-1,45	-1,26

N.Potenc. – Cota do nível potenciométrico; Coord. – Coordenada

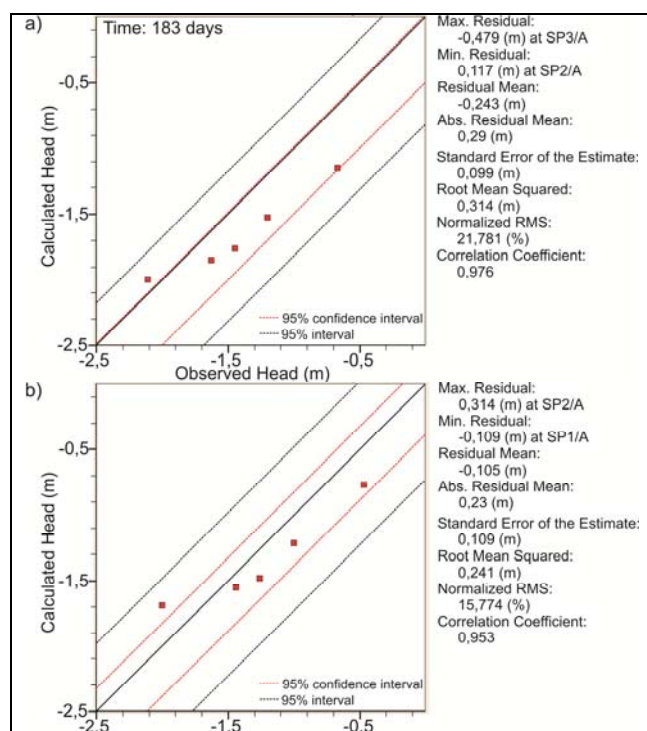
Em relação à variação temporal da simulação numérica, foi adotado 10 'time steps' para cada período, o solver utilizado foi o WHS, com possibilidade para 100 iterações, critério residual de 0,01.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após algumas tentativas de ajustar o modelo computacional criado, observou-se a dificuldade em convergir para uma solução numérica. Identificou-se que o problema gerado foi devido ao desnível brusco no nível d'água do rio devido à existência do barramento, como mencionado anteriormente. A alternativa para contornar esse problema numérico foi melhorar o refinamento da malha nas duas células centrais da área, onde se situa o barramento, e modificou-se as cargas hidráulicas nestas células na condição de contorno rio gradativamente. Isso não interferiu diretamente sobre o fluxo para o poço de produção, e permitiu chegar às soluções do problema.



**Figura 6 – Modelo computacional 3D, com malha e localização do poço de produção (em vermelho, em amarelo corresponde a zona de filtro), poços de observações (em verde) e rio (em azul)**



**Figura 7 – Calibração do modelo computacional: (a) para período seco (183 dias), (b) para período úmido (365 dias)**

Considerando-se, como foi identificado por Paiva et al. (2010), que há um aporte de fluxo d'água que chega na área, foi usado através do módulo de recarga uma entrada de fluxo diretamente na terceira camada. Esse fluxo

corresponde a uma alimentação do aquífero a partir das zonas de recarga natural.

A técnica de calibração utilizada foi a de “tentativa e erro” a partir do conhecimento das condições reais (ANDERSON; WOESSNER, 1992). Alguns parâmetros hidrogeológicos, inicialmente estimados, e as condições de contorno foram ajustadas para que as cargas hidráulicas geradas pelo modelo matemático fossem análogas àquelas presentes no sistema real. Ao completar a convergência, comparando-se as cargas hidráulicas nos poços de observações com as calculadas pelo modelo criado, alcançou-se uma boa calibração. As diferenças observadas foram da ordem de 0,20m, no qual o modelo gerou rebaixamentos ligeiramente superiores, de acordo com o resíduo médio que foi de -0,243 para o período seco e de -0,105 para o período úmido. A exceção foi o poço de observação (SP2) próximo ao poço de produção que para o modelo o rebaixamento foi inferior ao observado. Estas pequenas diferenças podem ser devido a algumas incertezas no modelo conceitual, como a homogeneidade das camadas consideradas. Os resultados da calibração podem ser visualizados na figura 7. As calibrações resultaram num coeficiente de correlação de 97,6% para o período seco e de 95,3% para o período úmido.

### Cargas Hidráulicas e Fluxo

O modelo computacional criado gerou os mapas potenciométricos como ilustrado nas figuras 8 e 9. O fluxo subterrâneo se dá no sentido do escoamento do rio, da direita para a esquerda pelo

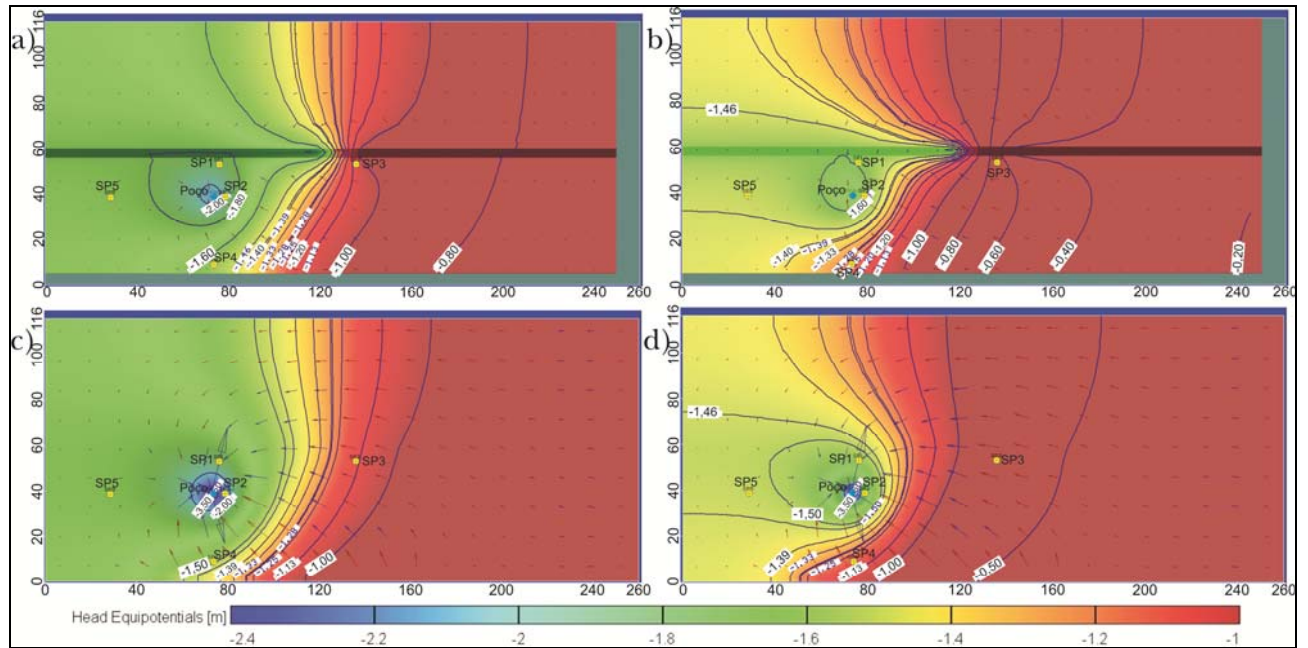


Figura 8 – Cargas hidráulicas, com vetores de velocidades: a) camada 1, período seco; b) camada 1, período úmido; c) camada 3, período seco; d) camada 3, período úmido

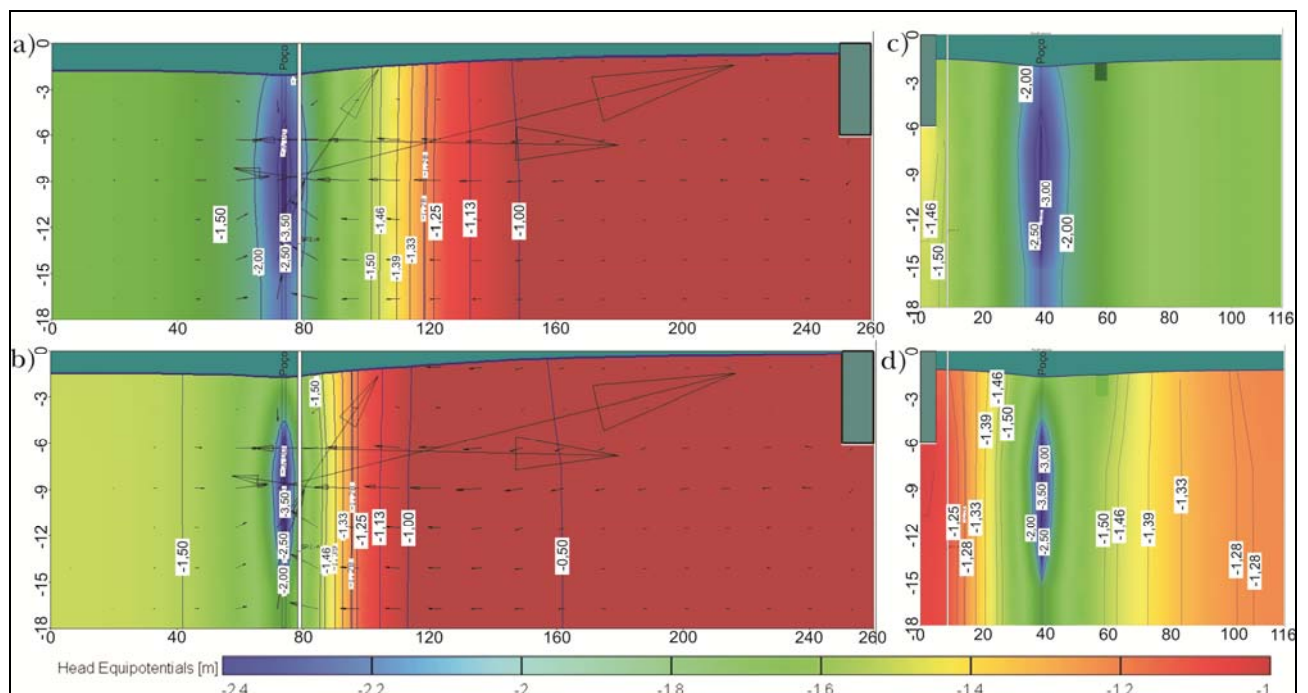


Figura 9 – Cargas hidráulicas, passando pelo poço de produção: a) seção paralelo ao rio, período seco; b) seção paralela ao rio, período úmido; c) seção transversal ao rio, período seco; d) seção transversal ao rio, período úmido

modelo criado, havendo um aporte de fluxo subterrâneo no sentido noroeste, devido à zona de recarga natural existente. Observou-se a necessidade de aumentar o fluxo de entrada no sistema, na direção das zonas de recarga do aquífero. Os resultados obtidos foram satisfatórios e reproduz o observado em campo, dentre algumas incertezas que ainda existem, como a real capacidade de fluxo do leito do rio para o aquífero.

No período seco as cargas hidráulicas atingem cotas inferiores a -2,0m no entorno do poço de produção, já para o período úmido estes valores atingem patamares inferiores a -1,7m. Os cortes ilustrados na figura 9 mostram bem o rebaixamento do poço de produção, alcançando a zona do rio. Principalmente, no período úmido, fica evidente há existência da componente de fluxo do rio para o poço de produção.

Foi avaliado o balanço hídrico entre as condições de contorno do modelo e as diversas zonas configuradas para melhor observar os fluxos, ferramenta disponível no software pelo 'zone budget' (balanço hídrico por zonas do aquífero). Como objetivo de avaliar a contribuição do rio para o aquífero, os resultados encontrados foram que há uma contribuição do rio, em seu trecho de montante, nos valores de: 6,41 m<sup>3</sup>/dia saindo lateralmente da camada 1, apenas para a margem esquerda, e 25,50 m<sup>3</sup>/dia verticalmente, isso para o período seco; analogamente para o período chuvoso, 17,97 m<sup>3</sup>/dia lateralmente e 40,93 m<sup>3</sup>/dia verticalmente. Estes valores foram obtidos para as células da primeira camada na linha central do modelo onde se localiza o rio. Conforme esperado, existe uma contribuição do rio para o aquífero apenas na zona a montante do barramento, visto que a carga hidráulica no rio é maior neste trecho. No período chuvoso observou-se que cerca de 20% da vazão de bombeamento corresponde à contribuição do rio Beberibe.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Num processo de Filtração em Margem é importante o entendimento do percurso das partículas de água provenientes do rio, e a modelagem computacional utilizando o Visual Modflow possibilitou o cálculo e a representação gráfica do referido fluxo.

Na barragem de elevação de nível existente na antiga captação de água para abastecimento ocorre uma variação brusca de carga hidráulica

causando instabilidade na solução numérica. Este problema pode ser evitado realizando um refinamento da malha no entorno do barramento.

O modelo computacional construído correspondeu às observações de campo. A aplicação do "zone budget" possibilitou a avaliação das contribuições da água superficial e da água subterrânea para o total bombeado. O rio contribui para o aquífero, no entanto, basicamente no trecho de montante ao barramento. No período úmido a contribuição é o dobro em relação ao período seco.

## 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 ao CNPq pelo projeto 479126\_2011-9, à COMPESA pelo apoio ao projeto piloto, aos professores Maurício Sens e Günkler Günter e suas equipes pelas parcerias sobre a temática.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W. *Applied groundwater modeling*. Simulation of flow and advective transport. San Diego, EUA: Academic Press, 1992.
- BERGER, P. Removal of Cryptosporidium using bank filtration. In: NATO ADVANCED RESEARCH WORKSHOP ON RIVERBANK FILTRATION: UNDERSTANDING CONTAMINANT BIOGEO-CHEMISTRY AND PATHOGEN REMOVAL, 2001, Tihany, Hungary. *Proceedings...* 2002 p. 85-121.
- BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria MS nº 2914 de 12/12/2011, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Brasília, 2011.
- CAMPOS, H.L. *Processo Histórico de Gestão na Bacia Hidrográfica do Rio Beberibe (PE): uma retrospectiva*. 2003. 226 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- CHORUS, I.; BARTRAM, J. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences*,

monitoring and management. London: E & FN Spon, 1999.

COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D. *Estudo Hidrogeológico de Recife – Olinda – Camaragibe – Jaboatão dos Guararapes: HIDROREC II. Relatório Técnico Final – Tomo II.* Recife: Costa Consultoria e Serviços Técnicos e Ambientais, 2002.

DASH, R. R.; BHANU PRAKASH, E.V.P.; KUMAR, P.; MEHROTRA, I.; SANDHU, C.; GRISCHEK, T. River bank filtration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bacteria. *Hydrogeology Journal*, v. 18, n. 4, p.973–983, 2010.

DILLON, P.J.; MILLER, M.; FALLOWFIELD, H.; HUTSON, J. The potential of river bank filtration for drinking water supplies in relation to microcystin removal in brackish aquifers. *Journal of Hydrology*, v. 266, n. 3-4, p. 209–221, 2002.

FLECKENSTEIN, J.; NISWONGER, R.; FOGG, G. River-Aquifer Interactions, Geologic Heterogeneity, and Low-Flow Management. *Ground Water*, v. 44, n. 6, p.837-852, 2006.

FREITAS, D. A.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; MOLICA, R. J. R. Application of bank filtration technology for water quality improvement in a warm climate: a case study at Beberibe River in Brazil. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, v. 61, n.5, p.319-330, 2012.

GRISCHEK, T.; SCHOENHEINZ, D.; SYHRE, C.; SAUPE, K. Impact of decreasing water demand on bank filtration in Saxony, Germany. *Drinking Water Engineering Science*, v. 3, n. 1, p. 11–20, 2010.

GRÜNHEID, S.; AMY, G.; JEKEL, M. Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge. *Water Research*, v. 39, n. 14, p. 3219–3228, 2005.

GÜNKEL, G. Bank filtration - an eco-technology for drinking water treatment and the application to the semi-arid zone. INTERNATIONAL CONFERENCE: CLIMATE, SUSTAINABILITY AND DEVELOPMENT IN SEMI-ARID REGIONS, 2., 2010, Fortaleza, CE. *Proceedings...* 2010.

HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M.C.; MCDONALD, M.G. *MODFLOW-2000, Modular Ground-Water Model—User Guide to Modularization*

*Concepts and the Ground-Water Flow Process.* Reston, Virginia, USA: The U.S. Geological Survey, 2000. 121 p. Open-File Report 00-92.

HEBERER, T.; MECHLINSKI, A.; FANCK, B.; KNAPPE, A.; MASSMANN, G.; PEKDEGER, A.; FRITZ, B. Field Studies on the Fate and Transport of Pharmaceutical Residues in Bank Filtration. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 24, n. 2, p. 70-77, 2004.

HISCOCK, M.; GRISCHEK, T. Attenuation of groundwater pollution by bankfiltration. *Journal Hydrology*, v. 266, n. 3-4, p. 139-144, 2002.

HOFFMANN, A.; GUNKEL G. Bank filtration in the sandy littoral zone of Lake Tegel (Berlin): structure and dynamics of the biological active filter zone and clogging processes. *Limnologica*, v. 41, n. 1, p. 10–19, 2011.

HUNT, H.; SCHUBERT, J.; RAY, C. Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems. In: RAY, C.; MELIN, G.; LINSKY, R. N. Riverbank Filtration: improving source-water quality. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2002. p. 19-28.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. *Boletim com a Normais Climatológicas no período 1961 a 1990.* Brasília: INMET, 2003. 3º Distrito de Meteorologia (DISME).

LEE, J-H.; HAMM, S-Y.; CHEONG, J-Y.; KIM, H-S.; KO, E-J.; LEE, K-S.; LEE, S-L. Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, Republic of Korea. *Journal Hydrology*, v. 376, n. 1-2, p. 209-220, 2009.

LORENZEN, G.; SPRENGER, C.; TAUTE, T.; PEKDEGER, A.; MITTAL, A.; MASSMANN, G. Assessment of the potential for bank filtration in a water-stressed megacity (Delhi, India). *Environmental Earth Science*, v. 61, n. 7, p. 1419–1434, 2010.

MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M. M. Base Estrutural. *Estudos Geológicos. Série B. Estudos e Pesquisas*, v. 10, p. 33-43, 1991.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.* Hamburg: U.S. Geological Survey. Techniques of Water-Resources Investigations, 1988. chap. A1.

METGE, D.; HARVEY, R.; AIKEN, G.; ANDERS R.; LINCOLN, G.; JASPERSE, J. Influence of organic carbon loading, sediment associated metal oxide content and sediment grain size distributions upon *Cryptosporidium parvum* removal during riverbank filtration operations, Sonoma County, CA. *Water Research*, v. 44, n. 4, p. 1126-1137, 2010.

OSMAN, Y. Z.; BRUEN, M. P. Modelling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer: an improved loosing-stream package for MODFLOW. *Journal of Hydrology*, v. 264, n. 1-4, p. 69-86, 2002.

PAIVA, A. L. R. *O processo de Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe*. 2009. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Pernambuco, -Recife, 2009.

PAIVA; A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; DEMÉTRIO, J. G. A.; SOBRAL, M. C. M. Filtração em Margem para Indução de Recarga e Melhoria da Qualidade da Água – Estudo de Caso: Rio Beberibe. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 24, n. 1, p. 117-128, 2010.

PERNAMBUCO. GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. SEPLAN – Secretaria de Planejamento. *Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica das Bacias dos Rios Beberibe, Capibaribe e Jaboatão – PQA/PE*. Estudos de Consolidação e Complementação do Diagnóstico sobre a Qualidade das Águas, Relativos à Preparação do Programa de Investimentos nas Bacias dos Rios Beberibe, Capibaribe e Jaboatão. Recife, PE: [s.n.], 1997. Relatório n.1, Tomos I e II.

PERNAMBUCO. GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. SECTMA – Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. *Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH*. Recife, PE: [s.n.], 1998.

RAY, C.; MELIN, G.; LINSKY, R. (Org.). *Riverbank Filtration: improving source-water quality*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.

SCHUBERT, J. Hydraulic aspects of river bank filtration: field studies. *Journal Hydrology*, v. 266, 3-4, p. 145-161, 2002.

SANTOS, L. L.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; ZUCCI, M. R. Utilização de isótopos estáveis para análise da interação da água superficial e água subterrânea num estudo de filtração em margens.

In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16., 2010, São Luis, MA. *Anais...* 2010.

SENS, M. L.; DALSASSO, 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*. Rio de Janeiro: ABES, 2006. cap. 5.

SHAMRUKH, M.; ABDEL-WAHAB, A. Riverbank filtration for sustainable water supply: application to a large-scale facility on the Nile River. *Clean Technology Environmental Policy*, v. 10, n. 4, p. 351-358, 2008.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 52-67, 2002.

STAUDER, S.; STEVANOVIC, Z.; RICHTER, C.; MILANOVIC, S.; TUCOVIC, A.; PETROVIC, B. Evaluating Bank Filtration as an Alternative to the Current Water Supply from Deeper Aquifer: A Case Study from the Pannonian Basin, Serbia. *Water Resources Management*, v. 26, n. 2, p. 581-594, 2012.

TUFENKJI, N.; RYAN, J.; ELIMELECH, M. The Promise of Bank filtration. *Environmental Science Technology*, v. 36, p. 422A-428A, 2002.

VERAS, T. B. *Análise da interação rio-aquífero na zona hiporreica para a tecnologia da filtração em margem: estudo de caso no rio Beberibe – PE*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

WEISS, W.; BOUWER, E.; ABOYTES, R.; LECHEVALLIER, M.; O'MELIA, C.; LE, B.; SCHWAB, K. Riverbank filtration for control of microorganisms: results from field monitoring. *Water Research*, v. 39, n. 10, p. 1990-2001, 2005.

WU, Y.; HUI, L.; WANG, H.; LI, Y.; ZENG, R. Effectiveness of riverbank filtration for removal of nitrogen from heavily polluted rivers: a case study of Kuihe River, Xuzhou, Jiangsu, China. *Environmental Geology*, v. 52, n. 1, p. 19-25, 2007.

***River-Aquifer Interaction With Pumping Into A Well  
Near A River Bank Filtration System***

**ABSTRACT**

*A pilot project with application of the BankFiltration technique (BF) was deployed on the banks of the Beberibe River, in the Caixa d' Água neighborhood, located on the border between Olinda and Recife. The BF technique is characterized by the construction of pumping wells near rivers and/or lakes in order to induce superficial water to enter the phreatic aquifer. In this pathway the water goes through physical and biochemical processes that enhance its quality. BF has already been used for a long time in the water supply system of European countries. Boreholes were drilled, lithological profiles, hydraulic conductivity tests, production well drilling and 5 observation wells made for characterization of the study area. Potentiometric levels and water quality were monitored. For a better understanding of the path taken by water through the soil a conceptual model was prepared and an available software was applied. The contribution of superficial water flow to the underground system is calculated depending on the hydraulic gradient and conductance of the riverbed. Hydraulic heads and flows obtained by the model confirm the field observations and the purpose of this article is to describe the pilot project and computer modeling performed in the experimental area.*

**Key-words:** *Bankfiltration; Numerical Modelling; Modflow; Beberibe River.*