

Aplicação e Modelagem da Recarga Artificial com Águas Pluviais para Recuperação Potenciométrica de Aquífero Costeiro na Planície do Recife-PE

George do Espírito Santo Silva, Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Giancarlo Lins Cavalcanti

Depto. Eng. Civil - UFPE

george@ufpe.br, suzanam@ufpe.br, giancarlolc@ig.com.br

Lícia Mouta da Costa

Depto. Eng. Civil – UFCG

licia@geotecnia.ufcg.edu.br

Aberlardo Antônio de A. Montenegro

Depto. de Tecnologia Rural – UFRPE

monte@hotlink.com.br

Recebido: 19/05/05 revisado: - aceito: 15/03/06

RESUMO

A recarga artificial de aquíferos pode ser empregada no aumento de disponibilidade e armazenamento de água, controle de salinização em aquíferos costeiros e controle de subsidência de solos. O sistema aquífero da Planície do Recife (PE) é composto por dois aquíferos profundos, Cabo e Beberibe, de características confinadas, recobertos por um aquífero freático, o Boa Viagem. O problema do rebaixamento excessivo nos níveis do aquífero Cabo pela super-exploração é agravado pelo elevado grau de urbanização que diminui sobremaneira a oportunidade de recarga natural do sistema. Desta forma, destaca-se a relevância de se avaliar o potencial da recarga artificial utilizando água de chuva como alternativa para recuperação dos níveis potenciométricos do aquífero Cabo. Neste contexto, apresenta-se neste trabalho a condução de experimento de recarga artificial que utiliza águas de chuva, juntamente com a análise de ensaios preliminares de campo. Os ensaios foram realizados na área de maior redução dos níveis potenciométricos do aquífero Cabo, a fim de verificar a resposta em campo à recarga artificial. Com a finalidade de se analisar diferentes cenários de recarga artificial, foi efetuada análise numérica, utilizando-se modelo em elementos finitos, CODE- BRIGHT. Os resultados indicam que a recarga artificial através de poços de injeção na área em estudo é viável, devendo ser realizados estudos de adicionais de longo prazo de modo a avaliar a variação dos níveis em resposta a recarga.

Palavras-chave: Recarga artificial, aquífero costeiro, fluxo de água subterrânea, modelagem numérica, elementos finitos.

INTRODUÇÃO

A exploração excessiva de aquíferos costeiros, em desequilíbrio com o processo de recarga natural vêm causando grandes rebaixamentos da potenciometria dos aquíferos na Região Metropolitana do Recife (RMR), Pernambuco. O rebaixamento excessivo, além de comprometer as reservas do manancial hídrico subterrâneo pode colocar o sistema sob risco de salinização por intrusão marinha, ou até risco de subsidência. O fenômeno da salinização provoca a degradação do aquífero, tornando suas águas impróprias para diversos usos, incluindo o consumo humano e preocupa pesquisadores em todo o mundo. A subsidência, além de causar danos

às edificações, pode inutilizar o aquífero como manancial.

O sistema aquífero da Planície do Recife é composto por dois aquíferos profundos, Cabo e Beberibe, de características semi-confinadas, recobertos por um aquífero freático, o Boa Viagem. Devido aos rebaixamentos ocorridos em função do aumento do número de poços, principalmente durante a última estiagem entre 98/99, os níveis potenciométricos no aquífero Cabo têm sofrido grande redução, variando o gradiente hidráulico no sentido oeste para leste de 1 m/Km, em 1970, para 30 m/Km, em 2000 (Monteiro et al., 2001). O aquífero Cabo em grande parte de sua extensão encontra-se semi-confinado, devido à camadas sedimentares de baixa permeabilidade que compõem a parte

inferior do aquífero Boa Viagem, o que torna lenta a recuperação potenciométrica por drenança vertical.

Costa et al. (1998) elaboraram um estudo que originou o zoneamento da exploração de águas subterrâneas para a planície do Recife, denominado HIDROREC I, recentemente atualizado constituindo o HIDROREC II (Costa et al., 2003), o qual apresenta mapa identificando as zonas denominadas A, B, C, D, E e F, com a descrição do aquífero explorado, situação da profundidade atual dos níveis d'água e condicionantes de exploração. Das zonas identificadas, a mais crítica é a chamada zona A, onde os poços atualmente existentes deverão ter sua vazão reduzida em 50% e um monitoramento contínuo deverá ser exercido. Na zona A, a recarga natural não repõe o volume de água explorado, causando um déficit hídrico que resulta na diminuição dos níveis potenciométricos do aquífero na região.

O aquífero Boa Viagem, superior ao Cabo, possui águas contaminadas por diversas fontes, como esgotos, mangues, estuários, que podem contaminar o aquífero Cabo, devido ao grande número de poços construídos na última estiagem (98/99), muitos dos quais podem apresentar problemas construtivos. O fluxo entre os aquíferos Boa Viagem e Cabo através da camada semi-confinante também pode contribuir para a contaminação.

Segundo Monteiro (2000), mesmo que os atuais níveis de exploração no bairro de Boa Viagem se mantivessem a partir do ano 2000, os níveis potenciométricos se estabilizariam apenas em 2010. Uma forma possível de recuperação do aquífero nas atuais condições de exploração é a prática da recarga artificial, que permitiria a elevação dos níveis potenciométricos.

Apesar da carência de água para o abastecimento, a RMR conta com um índice pluviométrico anual médio de 2200 mm. A impermeabilização, associada à topografia relativamente plana da área, e o fato da mesma se situar praticamente ao nível do mar vem acarretando sérios prejuízos à população, que sofre crescentes alagamentos em virtude de chuvas de alta intensidade.

As práticas mais comuns de recarga artificial são baseadas na utilização de águas residuárias e de rios (O'Shea, 1994; Kitu et al., 1995; Dillon et al., 1997). Por outro lado, a captação de água de chuva vem sendo apontada como uma alternativa para a disponibilização de recursos hídricos em meios rurais, principalmente de regiões semi-áridas, e para o auxílio na solução de problemas de drenagem de águas pluviais em zonas urbanas. Procedimentos de gerenciamento de recursos hídricos que integram a

prática de captação de águas de chuva com a recarga artificial de aquíferos não são comuns. A utilização destas águas permitiria uma gradual recuperação dos níveis dos aquíferos, além de diminuir os alagamentos que ocorrem em épocas de chuva.

Pyne (1994) destaca que a modelagem matemática é uma parte importante em projeto de recarga artificial, particularmente na metodologia conhecida como ASR (aquifer storage and recovery), que consiste na utilização da recarga para promover o armazenamento da água subterrânea visando uma extração posterior. Murilo Díaz et al. (2001) avaliaram os efeitos da recarga na remediação dos problemas de super-exploração e intrusão marinha que vêm ocorrendo no aquífero Plana de Gandía-Denia, na Espanha, mediante o emprego de um modelo matemático de fluxo implementado no MODFLOW. Flint (2003) utilizou o programa TOUGH2 para desenvolver um modelo numérico tridimensional e analisar uma bacia de infiltração, calibrado através de dados de ensaios de campo.

A utilização de um sistema de poços injetores na Zona A, possibilitaria a reposição gradual dos volumes retirados nos últimos anos, e traria uma outra série de benefícios, como o impedimento do possível avanço da cunha salina, e a melhoria da qualidade das águas contaminadas. É importante salientar ainda que estudos de recarga artificial para a área são extremamente urgentes, devido não apenas ao problema do rebaixamento potenciométrico e da salinização, mas também à questão da subsidência, que poderia trazer enormes prejuízos à região e, uma vez ocorrendo a subsidência, a recuperação do aquífero não se tornaria possível devido à diminuição dos espaços porosos que conferem armazenamento.

Esse trabalho apresenta alguns resultados de um experimento de recarga artificial com utilização de águas de chuva em escala piloto na cidade do Recife. Em conjunto, apresentam-se análises numéricas da recarga artificial de aquífero, utilizando o programa de elementos finitos CODE_BRIGHT (Olivella., 1995). Os dados dos ensaios foram utilizados para calibrar o modelo conceitual, a fim de possibilitar sua aplicação como uma ferramenta de gerenciamento no estudo da dinâmica de fluxo e da capacidade de recuperação do sítio em estudo.

HIDROGEOLOGIA DA PLANÍCIE DO RECIFE

O sistema aquífero da planície do Recife compreende dois aquíferos semi-confinados: o Be-

beribe ao norte do Lineamento Pernambuco, e o Cabo ao sul; além de um aquífero freático, o Boa Viagem que recobre os outros dois. O aquífero Boa Viagem é facilmente explorável e desempenha papel fundamental na recarga dos aquíferos semi-confinados. Os sedimentos da Formação Beberibe constituem o aquífero mais explorado nesse domínio em termos de volumes extraídos (Costa et al., 1998). O aquífero Cabo, objeto desse estudo, possui o maior número de poços em exploração e é uma importante fonte de abastecimento d'água da RMR. Segundo Costa et al. (2003), existem somente no Recife 13.000 poços (uma média de 110 poços/Km²), sendo que destes, 33% exploram de aquíferos profundos.

Costa et al.(1998) determinaram parâmetros hidrodinâmicos para os aquíferos da planície do Recife. As análises feitas indicaram que o aquífero Cabo possui menor transmissividade do que o aquífero Beberibe, apesar de possuírem espessuras médias semelhantes. Isto decorre do fato do aquífero Cabo possuir menor permeabilidade devido à presença de uma matriz argilosa. A Tabela 1 resume os valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos para os aquíferos da planície do Recife.

Tabela 1 - Parâmetros hidrodinâmicos da planície do Recife (Costa et al., 1998).

Parâmetros hidro-dinâmicos	Aquíferos		
	Boa Viagem	Beberibe	Cabo
Transmissividade (m ² /s)	7,0x10 ⁻³	2,2x10 ⁻³	8,6x10 ⁻⁴
Condutividade Hidráulica (m/s)	1,7x10 ⁻⁴	2,2x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵
Porosidade eficaz (%)	10	10	7
Coefficiente de armazenamento	-	2,0x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻⁴
Vazões	Média a elevada com média em torno de 17 m ³ /h	Média a elevada com média de 18 m ³ /h	Inferiores a 10 m ³ /h
Vazões específicas	Elevada (4,5 m ³ /h/m em média)	Média a elevada com média 3 m ³ /h/m	Baixas (<1 m ³ /h/m)

AQUÍFEROS EM ESTUDO

Aquífero Boa Viagem

O aquífero Boa Viagem é composto basicamente por sedimentos de aluviões, dunas, sedimentos de praia e mangues, aflorando em quase toda a planície do Recife (Costa et al.,1994). No bairro de Boa Viagem, esse aquífero chega a atingir 80 m de espessura. Devido à grande variação de sua constituição granulométrica, que vai de desde a fração argilosa até a fração de areia grossa, a avaliação do comportamento de fluxo descendente é difícil, bem como a avaliação mais precisa dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero. O Boa Viagem geralmente funciona como um aquífero livre ou semiconfinado.

Aquífero Cabo

O aquífero Cabo possui baixa permeabilidade, em decorrência do cimento argiloso caulínico que conduz a classificação de “arenito arcoseano” (Costa et al., 1998). Além da presença do caulim como cimento do arenito, a formação possui uma intercalação de camadas ou lentes siltico-argilosas. De uma forma geral, o aquífero Cabo possui muitas “fáceis granulométricas”, indo desde o conglomerado polimítico da base, passando pelo arenito arcoseano e indo até camadas de argila (Costa et al., 2003). Essa variação faciológica ocorre tanto na vertical, quanto na horizontal, fazendo com que a permeabilidade se apresente maior onde predomina as fácies arenosas, e, com permeabilidade menor, onde predomina as fácies siltico-argilosa (Costa et al., 2003).

CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO

O sítio em estudo localiza-se na Planície do Recife, mais precisamente no bairro de Boa Viagem, em Recife, Pernambuco, entre as coordenadas UTM 290628 a 290703 mE e 9101827 a 9101896 mN, meridiano 33⁰, na denominada “Zona A”, sendo o projeto de recarga instalado no condomínio Le Grand Village, localizado na rua Francisco da Cunha, n^o 1910, conforme apresentado por Silva (2004). Neste sítio, os aquíferos presentes são o Boa Viagem, mais acima e o Cabo, logo abaixo, semi-confinado. Na área existe um grande número de poços em operação e alguns desativados, devido ao excessivo rebaixamento potenciométrico, de condomínios e estabelecimentos comerciais diversos, incluindo um Shop-

ping Center. Alguns poços também vêm sendo abandonados pela alta salinidade da água.

MONTAGEM DO EXPERIMENTO DE RECARGA

Para a montagem do experimento de recarga foram selecionados poços que possuísem dados de perfis litológico e construtivo, possibilitando assim a obtenção de mais informações sobre a geologia local. O poço injetor selecionado foi o do condomínio Le Grand Village, que estava fora de operação, sendo um poço piezômetro instalado ao seu lado. Por fim, poços de condomínios vizinhos foram selecionados para monitoramento de níveis. Silva et al. (2004a) descrevem os detalhes da montagem do experimento de recarga artificial e da metodologia empregada durante os ensaios. A Tabela 2 apresenta algumas características dos poços utilizados durante os ensaios. O sistema de recarga é composto basicamente pelos poços injetores e de monitoramento de níveis, pelo sistema de captação, filtração e armazenamento das águas pluviais e pelo sistema injetor, composto pela bomba injetora e por sensores de nível instalados no poço injetor e no reservatório de águas pluviais.

Tabela 2 – Características dos poços injetor e de monitoramento de nível.

Poço	Função	Coordenadas UTM		Filtro (m)	Ano inst.
		E	N		
Le Grand Village	Injetor	290680	9101890	102 a 118	1992
Piezômetro	Monit.	290675	9101892	100 a 114	2003
Central Park*	Monit.	290703	9101896	100 a 120	1989
Chambord*	Monit.	290628	9101828	92 a 112	1991

*Poços em operação

ENSAIOS DE CAMPO

Foram realizados durante o período de novembro de 2003 a maio de 2004 quatro ensaios de recarga, com o objetivo verificar a variação dos ní-

veis potenciométricos do aquífero e estimar parâmetros hidrogeológicos do sítio, através da análise do comportamento hidrodinâmico do mesmo à recarga artificial.

Os níveis estáticos medidos no sítio antes do início dos ensaios mostraram que havia uma grande diferença entre os níveis dos poços monitorados (Tabela 3, dados de 05/11/2003), principalmente quando são comparados os dados do piezômetro com os dos outros poços. A diferença de nível entre o poço injetor (LGV) e o piezômetro era cerca de 18,27 m, sendo a distância horizontal entre eles de apenas 4,6 m.

Tabela 3 – níveis estáticos medidos nos dias 05/11/2003 e 28/05/2004

Poço	Nível Estático (m)	
	05/11/2003	28/05/2004
Piezômetro	77,51	77,22
Le Grand Village	95,78	86,20
Central Park	95,12	92,36
Chambord	-	82,57

Diversas razões poderiam explicar essa diferença de nível e então foram procedidas investigações a respeito. A perfilagem ótica realizada no poço injetor descartou a possibilidade de defeitos construtivos ou vazamentos pelas juntas. Por outro lado, outro poço nas proximidades também apresentou em julho de 2003 nível estático próximo ao do piezômetro, igual a 81,88 m. Antes do início dos ensaios de recarga havia-se feito um trabalho de desenvolvimento no poço injetor. O poço piezômetro era recém instalado e assim como no injetor, foi realizada perfilagem ótica no piezômetro, sendo verificado que estava em boas condições. Com isso, não se pode afirmar que esta diferença de nível ocorresse devido a problemas construtivos nos poços. A possível causa desta diferença entre os níveis piezométricos seria a hidrogeologia local, já que o aquífero Cabo na área em estudo possui várias intercalações de camadas argilosas, que interferem no fluxo da região. Observou-se por dados litológicos que o poço injetor possui o filtro instalado em uma camada inferior à do piezômetro, que por uma possível diferença entre as velocidades de fluxo entre a camada superior e inferior ao mesmo poderiam causar a diferença entre os níveis. Outro fator de influência seria os bombeamentos de poços vizinhos nesta

mesma camada inferior, o que diminuiria ainda mais os níveis do injetor.

Os ensaios de recarga foram realizados utilizando água armazenada no reservatório do condomínio Le Grand Village. Este reservatório foi destinado à coleta das águas pluviais através do sistema de captação de águas pluviais. A água do reservatório era bombeada para o poço injetor e o volume de água medido através de hidrômetro. Durante os ensaios de recarga eram monitorados os níveis nos poços vizinhos e no próprio poço injetor.

INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO TELEMÉTRICA/REDESENVOLVIMENTO DO POÇO INJETOR

Em novembro de 2003 foi realizado um trabalho de desenvolvimento do poço injetor visando melhorar seu desempenho, caso os filtros não estivessem funcionando adequadamente. O trabalho consistiu em jatear os filtros com água e posteriormente aplicar defloculante (hexametáfosfato), deixando-o agir por 24 horas. Após esse período foi feito o enxágüe com água limpa e retirada a água com compressor. Foram realizados durante o período de novembro de 2003 a maio de 2004 mais quatro ensaios de recarga. Os ensaios de campo permitiram um aperfeiçoamento da metodologia aplicada, bem como o ajuste da vazão de injeção no poço em função da taxa de infiltração estimada. Os ensaios também geraram contribuições para a proposição do modelo conceitual, a exemplo da consideração de lentes de camadas argilosas que seriam responsáveis pelas diferenças entre os níveis estáticos dos poços vizinhos. Apenas um dos ensaios foi utilizado para a modelagem matemática.

Mesmo sendo realizado o desenvolvimento do poço injetor (LGV), a diferença entre os níveis dos poços injetor e piezômetro não teve mudança significativa, sugerindo mais uma vez que a diferença entre os níveis dos poços monitorados seria devido principalmente a efeitos de bombeamento em prédios vizinhos e a hidrogeologia.

Após a análise dos ensaios anteriores, foi verificada a necessidade de novos ensaios de campo com três poços de monitoramento, a fim de estabelecer as condições de contorno do modelo numérico a ser utilizado para simulação de diversos cenários. Para tanto foi selecionado o poço do edifício Chambord, onde foi instalado tubo de acesso para medidor de nível, para acompanhamento dos níveis durante os ensaios. Os níveis estáticos medidos demonstram que a diferença entre o piezômetro e o

poço do condomínio LGV é aproximadamente constante, sendo que no dia do ensaio era de 8,9 m (ver Tabela 3).

Este ensaio foi realizado de modo a manter a vazão na bomba constante, sendo considerada a vazão dada como taxa de recarga, ou seja, a vazão registrada pelo hidrômetro seria aproximadamente a mesma infiltrada durante o ensaio. Os níveis foram monitorados no poço piezômetro, no poço do edifício Central Park, no poço do edifício Chambord, e as vazões registradas pelo hidrômetro foram anotadas. Na Figura 1.a tem-se a variação da vazão durante o ensaio. A partir destes resultados pode-se determinar aproximadamente a taxa de infiltração, que ficou em 2,543 m³/h. O volume total injetado foi 6,358 m³, em 150 minutos de teste.

A Figura 1.b mostra que o comportamento hidráulico dos níveis medidos no piezômetro e no poço do edf. Central Park é semelhante, conforme foi observado nos ensaios anteriores.

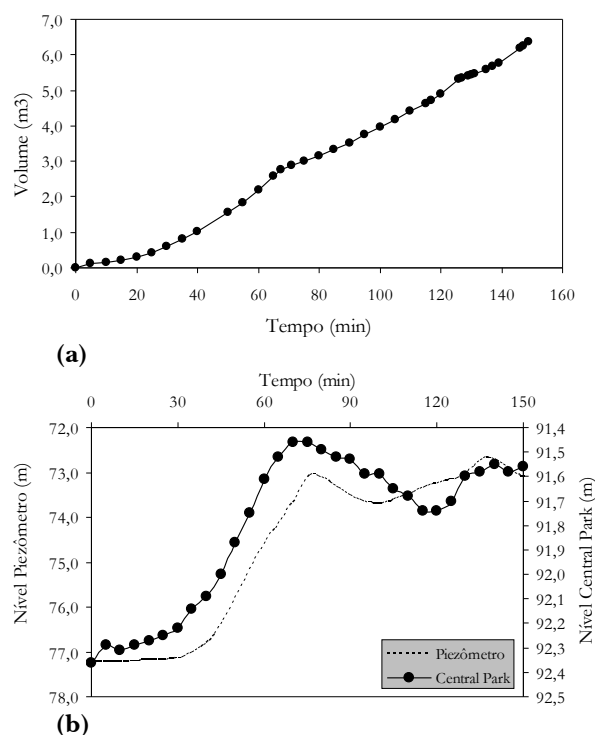


Figura 1 – (a) Volumes acumulados dados pelo hidrômetro. (b) Variação dos níveis piezométricos medida nos poços piezômetro e do edf. Central Park.

MODELAGEM NUMÉRICA

A utilização de modelos computacionais é elemento fundamental no entendimento do fluxo subterrâneo. Com a utilização de modelos computacionais

cionais é possível um melhor entendimento do aquífero em estudo, analisar as informações obtidas em campo, ajustar parâmetros hidrodinâmicos, avaliar se há ou não a necessidade de mais dados em uma determinada área, planejar etapas futuras de um sistema de recarga, etc.

A ferramenta numérica utilizada nesta pesquisa é o programa de elementos finitos denominado CODE_BRIGHT (Coupled Deformation, Brine, Gas and Heat Transport), desenvolvido na Escola Politécnica de Catalunha, capaz de resolver problemas termo-hidro-mecânicos e Geoquímico (THMG) acoplados em meios porosos deformáveis e multifásicos (Olivella, 1995; Guimarães, 2002). Neste programa, todas as equações acopladas, quando discretizadas, são resolvidas simultaneamente pelo método de Newton-Raphson. A formulação implementada trata o meio poroso como multifásico, contendo uma fase sólida e duas fases fluidas. As equações que regem o problema THM (Olivella, 1995) são as equações de continuidade (balanço de massa), as equações constitutivas e as restrições de equilíbrio.

As possibilidades de aplicação desta formulação em problemas reais de engenharia são muito amplas. Cabral et al. (2002a, 2002b); Costa (2000); Costa et al. (2002, 2001a, 2001b); Guimarães et al. (2002) tem aplicado o CODE_BRIGHT com êxito em simulações envolvendo análises de fluxo de um ou mais fluidos.

Além do CODE_BRIGHT, utiliza-se o software GiD para pré e pós-processamento. O GiD foi desenvolvido pelo Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) (GiD - User's Guide, 2001).

Considerando que nas simulações realizadas na presente pesquisa o meio é rígido e que os processos são isotérmicos, as análises utilizarão apenas o módulo hidráulico do código. Assim, as equações resolvidas pelo CODE_BRIGHT nas análises aqui apresentadas são:

Conservação da massa de água

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w S_w \phi) + \nabla \cdot (\rho_w q_w) = f^w \quad (1)$$

onde:

ϕ é a porosidade; ρ_w é a densidade da água [M.L⁻³]; S_w é o grau de saturação de água; q^w é o fluxo volumétrico de água [L.T⁻¹], dado pela lei de Darcy e f^w é um termo fonte/sumidouro de água [M. L⁻³. T⁻¹].

Equações Constitutivas

O problema hidráulico de modelagem de fluxo tem como equação constitutiva fundamental a lei de Darcy. Além da lei de Darcy, faz-se necessária uma segunda equação constitutiva, que descreva a curva de retenção, já que pelas medições dos níveis estáticos verificou-se que os níveis não estavam atingindo o topo do aquífero Cabo, sendo então levantada a hipótese do mesmo não estar completamente saturado. No presente trabalho, a curva de retenção será modelada através da expressão largamente utilizada, conhecida como modelo de van Genuchten (1980):

$$\frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr}} = S_e = \left(1 + \left(\frac{s}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (2)$$

em que

S_{lr} é a saturação residual; S_l é a saturação de líquido; S_{ls} é a saturação máxima de líquido; P é a tensão e superficial e λ é um parâmetro de ajuste da curva de retenção.

SIMULAÇÃO DO EXPERIMENTO DE RECARGA

A partir das respostas obtidas inicialmente em campo, de dados da literatura, dados litológicos e de perfis construtivos dos poços, foi possível conceber um modelo conceitual do sítio em estudo.

A partir do modelo conceitual, foi gerada uma malha bidimensional em elementos finitos que representa o domínio em estudo. Na Figura 2, cada camada está identificada por uma cor diferente, sendo a superior o aquífero Boa Viagem, a camada intermediária o aquífero e a inferior o aquífero Cabo. Os elementos lineares em branco são os que representam os filtros dos poços. A discretização do domínio resultou em uma malha de elementos finitos composta de 1647 nós e 3161 elementos. O modelo possui 162 m de extensão, sendo que o poço injetor localiza-se no centro da malha.

Os filtros dos poços de monitoramento são discretizados em dois elementos lineares. O filtro do poço injetor localizado no condomínio Le Grand Village (LGV) foi discretizado em 10 elementos. O poço do edifício Central Park foi utilizado como principal poço de monitoramento.

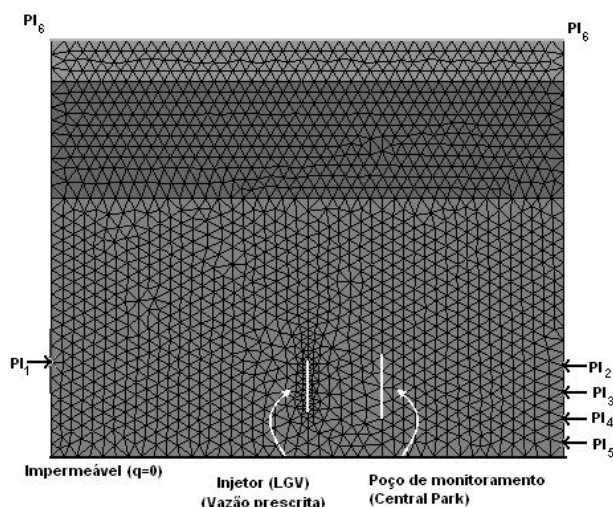


Figura 2 - Malha bidimensional vertical de elementos finitos inicialmente utilizada nas simulações numéricas.

As condições iniciais e de contorno no caso em estudo foram estabelecidas a partir das medidas obtidas nos ensaios. As pressões de água iniciais foram estabelecidas a partir dos níveis medidos em campo.

Como condições de contorno, adotaram-se as indicadas na Figura 2, a saber:

- Fluxo vertical nulo na base do aquífero, representando a base do aquífero Cabo impermeável, devido à presença logo abaixo do material cristalino detectado em sondagens ($q = 0$);
- Pressão de água correspondente ao nível d'água medido no poço do edifício Chambord, durante os ensaios (PI_1);
- Pressão de água correspondente ao nível d'água ajustado de forma a se obter os níveis estáticos medidos no poço do edifício Central Park, durante os ensaios (PI_2 , PI_3 , PI_4 , PI_5);
- Pressão de água correspondente ao nível estático do aquífero Boa Viagem a 0,5 m de profundidade, medido em poços rasos do condomínio Le Grand Village (PI_6).

Diante da dificuldade de ajustar a diferença de nível entre o poço injetor e o piezômetro sem uma mais precisa aferição dos dados hidrogeológicos do sítio em estudo, o poço piezômetro foi desconsiderado nas simulações. Entretanto, foi adotada a modelagem de um meio heterogêneo que refletisse melhor as condições hidrogeológicas locais, em

que se admitiu a presença de lentes argilas nas proximidades do piezômetro (detectada através de ensaio geofísico). Tal consideração implicou na modificação do modelo conceitual inicialmente proposto, o qual passou a ter a configuração apresentada na Figura 3. A discretização do domínio resultou em uma nova malha de elementos finitos, composta de 1844 nós e 3554 elementos.

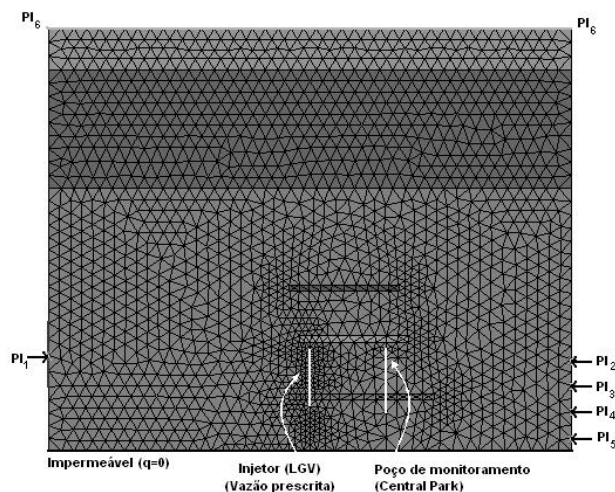


Figura 3 - Malha bidimensional vertical de elementos finitos utilizada nas simulações numéricas.

Os parâmetros utilizados na simulação encontram-se listados na Tabela 4. Os parâmetros das lâminas argilosas foram considerados os mesmos do aquífero.

Tabela 4 - Parâmetros hidrodinâmicos utilizados na simulação.

Parâmetros	Aquífero Boa Viagem	Aquífero Cabo	Aquífero Cabo
Permeabilidade (m/s)	$1,7 \times 10^{-4}$	1×10^{-11}	$4,9 \times 10^{-4}$
Porosidade eficaz	0,1	0,05	0,07

Foram consideradas duas curvas de retenção, uma para os aquíferos Cabo e Boa Viagem, e outra para o aquífero. Os parâmetros utilizados para as curvas de retenção, modeladas pela expressão de van Genuchten, foram estimados a partir do tipo de solo, sendo os aquíferos considerados predominantemente arenosos, e o aquífero composto basicamente de materiais argilosos, o que se mostrou compatível com os materiais detectados em

ensaios litológicos. Os parâmetros estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros da curva de retenção.

Parâmetros	P ₀ (MPa)	λ	S _{ri}	S _{ls}
Aquíferos	0,03	0,4	0	1
Aquífero	1	0,4	0,04	1

O ensaio de recarga utilizou uma vazão que manteve-se em torno de 2,5 a 3 m³/s durante cerca de 90 minutos de injeção. O gráfico da Figura 4 mostra a curva de vazão de campo e curva de vazão adotada para fins de simplificação da simulação de recarga.

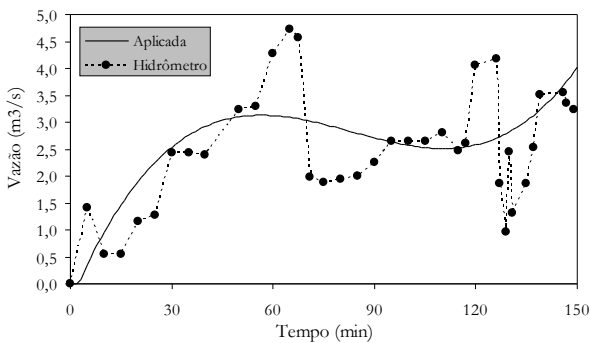


Figura 4 - Vazão de recarga na simulação e medição registrada pelo hidrômetro.

O modelo conceitual foi inicialmente implementado com os parâmetros hidrodinâmicos descritos acima. A partir de então, um ajuste mais preciso foi feito com base nos dados do ensaio de recarga. Os parâmetros hidrodinâmicos utilizados para o aquífero Boa Viagem e o aquífero não sofreram modificações, sendo que os ajustes foram realizados em relação ao aquífero Cabo. A Tabela 6 apresenta os dados de ajuste do modelo.

Tabela 6 - Parâmetros hidrodinâmicos ajustados do aquífero Cabo para o sítio em estudo.

Parâmetros	Aquífero Cabo
Condutividade hidráulica (m/s)	4,9x10 ⁻⁴
Porosidade eficaz	0,7

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos nas análises numéricas realizadas e as medidas em campo, no poço do edifício Central Park. Os resultados sugerem que a potenciometria medida no edifício Central Park está sofrendo influência das

camadas argilosas detectadas nos ensaios geofísicos. O pico de pressões apresentado no campo e simulado no modelo com lâmina pode ser associado ao fato que boa parte da recarga se acumularia entre as camadas argilosas entre o poço injetor e o Central Park, devido à baixa permeabilidade destas camadas, aumentando assim a pressão de líquido entre essas camadas.

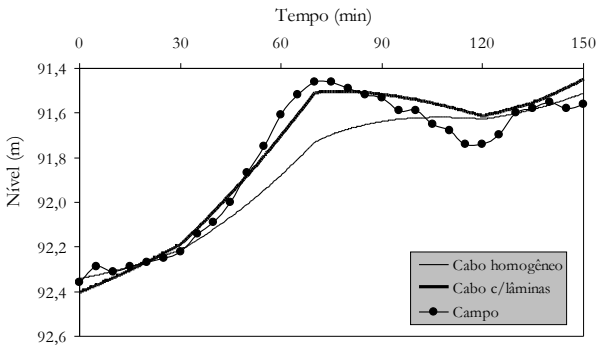


Figura 5 - Resultados das simulações numéricas e dados medidos em campo no poço do edifício Central Park.

A partir do modelo ajustado, é possível simular diversos cenários de recarga, objetivando estudar a eficiência da mesma em diversas situações, como modificações na montagem do projeto, vazões de recarga, além de simular cenários que possibilite conduzir as futuras investigações do projeto. Foram simulados três cenários de recarga: o primeiro cenário mostra a influência da variação do comprimento do filtro do poço injetor na variação potenciométrica; o segundo cenário apresenta a variação da potenciometria devido à recarga por um período prolongado de tempo; o terceiro cenário analisa a influência do aumento da vazão de injeção, conforme apresentado por Silva et al. (2004b).

CENÁRIO 1 – INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DO FILTRO

Este cenário busca simular a influência do comprimento do filtro do poço injetor na recarga. Com uma maior superfície de exposição ao aquífero, tem-se a possibilidade de aumentar a taxa de recarga do mesmo. Para tanto, foram simuladas 5 situações, variando as dimensões do filtro em 16, 18, 20, 23 e 28 metros de comprimento. A situação com filtro medindo 16 m corresponde a instalada no projeto piloto, servindo de comparação com as demais. Para este ensaio foram simulados dois casos: vazão de recarga constante de 2,38 m³/h, onde a vazão injetada não varia com o comprimento do

filtro, e vazão de recarga que varia com o comprimento do filtro, sendo aplicada uma vazão específica de $0,149 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Na Figura 6 pode-se observar a variação da piezometria obtida no edf. Central Park para as diferentes situações simuladas, no modelo com lâminas argilosas. As situações foram simuladas utilizando como condição de contorno no aquífero Cabo apenas fluxo regional, permitindo assim variação dos níveis piezométricos até os limites do domínio do modelo.

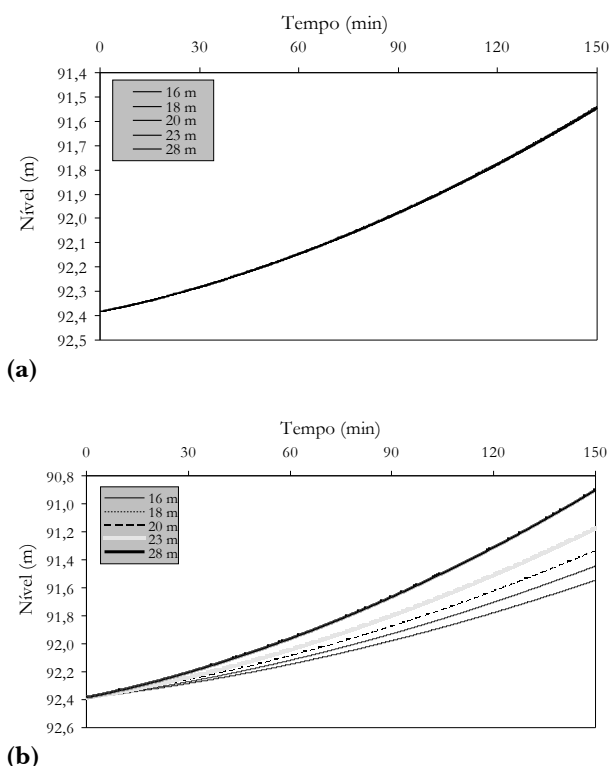


Figura 6 – Variação dos níveis potenciométricos simulada no poço do edf. Central Park influenciada pelo comprimento do filtro na configuração Cabo com lâminas argilosas (a) vazão constante (b) vazão específica constante.

Na Figura 6.a pode-se observar que a influência da variação do comprimento do filtro sem um correspondente aumento da vazão não resulta num aumento da piezometria. Na Figura 6.b observa-se que com o aumento do comprimento do filtro e o conseqüente aumento da vazão devido a aplicação de uma vazão específica por metro de filtro ocorre um acréscimo nos níveis potenciométricos. Foi observada uma variação potenciométrica cerca de 75% maior com filtro de 28 m em relação ao de 16 m. Essa diferença pode ser essencial na montagem de

sistemas de recarga simples, como em projetos para edifícios residenciais.

CENÁRIO 2 – RECARGA PROLONGADA

Através da utilização de modelos numéricos pode-se fazer o planejamento de aplicação de recarga de forma contínua, estimando a variação da piezometria local sobre diferentes condições de recarga, permitindo um maior entendimento da dinâmica da recarga e guiando futuros passos do projeto.

Com base nos dados das séries históricas de pluviometria no sítio em estudo, e considerando perdas na captação das águas de chuva pode-se avaliar o impacto da recarga. O cenário foi simulado estimando uma vazão de $2,16 \text{ m}^3/\text{h}$, injetada durante 3 horas por dia durante 3 meses, correspondendo ao período de chuvas mais freqüentes. A vazão foi estimada considerando dados históricos de precipitação em Recife (posto INMET- Instituto Nacional de Meteorologia) no trimestre mais chuvoso (maio a julho). Este cenário pode ser conduzido em campo pelo projeto de recarga instalado, permitindo assim uma posterior comparação dos resultados e um melhor ajuste do modelo. O cenário considerou ainda que durante o período não haveria influência da exploração do poços vizinhos no mesmo.

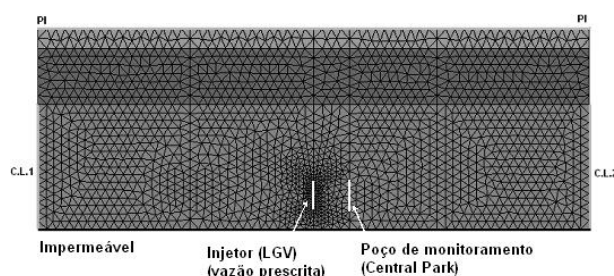


Figura 7 – Discretização da malha e condições de contorno para o terceiro cenário.

Devido às condições específicas deste cenário, foram definidas novas dimensões para o domínio e condições de contorno que permitissem avaliar a recuperação da piezometria a partir do volume injetado. Foram mantidos os parâmetros hidrodinâmicos e as condições iniciais. Para que as condições de contorno laterais não interferissem nos resultados, foi observada a necessidade de estender o domínio. A Figura 7 apresenta a discretização do domínio para este cenário, que possui 1786

nós e 3414 elementos, sendo 3402 triangulares e 12 lineares. Conforme as simulações anteriores, a malha possui uma maior discretização na área próxima do poço injetor. Em relação ao domínio original, os contornos foram afastados em 100 m para cada lado, totalizando uma extensão de 362 m, onde o injetor localiza-se no centro da malha. Neste cenário o aquífero Cabo foi considerado homogêneo.

Além das condições de contorno adotadas no modelo anterior, foi adotada a seguinte condição de contorno:

- Fluxo regional representado pela entrada de massa de água no contorno lateral à esquerda (C.L.1) e pela saída de massa de água (C.L.2) à direita, estimado de forma a corresponder aos níveis estáticos medidos em campo nos poços dos edifícios Chambord e Central Park;

Devido à incerteza sobre as condições de contorno laterais, foram simuladas três hipóteses, com condições diferentes em cada lateral do domínio. A primeira situação considerando fluxo regional, como já apresentado. A segunda situação foi simulada considerando fluxo nulo no contorno, e a terceira com os contornos laterais livres. Comparando os resultados obtidos nas análises das três situações, observa-se que os resultados obtidos são praticamente os mesmos, o que permite afirmar que os contornos do modelo estão suficientemente afastados para que suas condições não interfiram nos resultados.

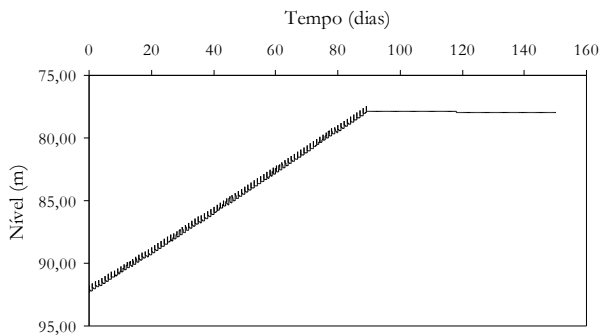


Figura 8 – Evolução da potenciometria simulada no poço do edifício Central Park.

Durante as simulações realizadas, foi observada uma elevação de nível bastante acentuada em todo o domínio. O gráfico da Figura 8 apresenta a variação da potenciometria no poço do edifício Central Park. As pequenas oscilações apresentadas

nos gráficos ocorrem devido ao período de recarga, que causam picos diários durante a injeção, para logo após atingir uma nova situação de equilíbrio, cessada a injeção.

A Tabela 7 resume os resultados obtidos na simulação.

Tabela 7 – Níveis piezométricos medidos no poço do edf. Central Park e volumes acumulados injetados para 30, 60 e 90 dias de recarga.

Dias	Nível piezométrico (m)	Volume injetado (m³)	Variação Piezométrica a 24m do injetor (m)
0	92,36	0	0,00
30	87,70	194,4	4,65
60	82,85	388,8	9,50
90	77,92	583,2	14,44

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de campo em experimento piloto demonstraram que a recarga artificial através de poços de injeção na área em estudo é viável, devendo ser realizados estudos de longo prazo de modo a avaliar a variação dos níveis em resposta a esta recarga. A partir dos ensaios de campo e de pesquisas na literatura foi possível determinar elementos essenciais para análise matemática, além de observar a resposta do aquífero à recarga. Cabe destacar:

- A vazão de injeção estimada possível de ser injetada é de 2,07 m³/h, considerando todos os ensaios realizados.
- Apesar da complexa hidrogeologia local, as respostas à recarga nos poços monitorados são semelhantes.
- Um fator importante para se obter boas taxas de recarga é a manutenção periódica do poço injetor, pois o desenvolvimento do poço elimina as impurezas que se acumulam no filtro durante a operação de recarga, mantendo assim sua eficiência.
- O experimento de recarga deve ser aprimorado para que o sistema funcione automaticamente com a água de chuva;
- A partir dos dados obtidos neste trabalho foi possível implementar um modelo matemá-

tico para simular cenários de recarga, permitindo assim estimar os possíveis resultados de novas investigações.

Com os resultados das simulações pode-se concluir:

- A comparação entre as configurações que consideram o aquífero Cabo homogêneo e o que considera a heterogeneidade, através da presença de lâminas argilosas, demonstrou que a hidrogeologia influi decisivamente nos resultados, devendo ser considerada de extrema importância na elaboração do modelo conceitual.
- Os cenários de recarga que apresentam a influência do dimensionamento dos filtros do poço injetor demonstraram que a variação piezométrica é a mesma para uma determinada vazão de injeção, independentemente do tamanho dos filtros; Ao ser aplicada uma vazão que varia com o comprimento do filtro (vazão específica), observou-se uma variação potenciométrica cerca de 75% maior com filtro de 28 m em relação ao de 16 m. Essa diferença pode ser essencial na montagem de sistemas de recarga simples, como em projetos montados em edifícios residenciais. Isto pode ser decisivo para a recarga;
- As simulações de cenário de recarga por um período prolongado de tempo mostraram que há uma recuperação considerável nos níveis potenciométricos, principalmente nas imediações do poço injetor;

O modelo implementado consegue simular com bons resultados cenários de recarga simples. Faz-se necessário considerar modelos tridimensionais, que permita analisar melhor cenários mais complexos como, por exemplo, a influência de vários prédios explorando durante o processo de recarga e em escala regional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CT-HIDRO/CNPq por concessão de bolsa de mestrado e financiamento da pesquisa e ao PIBIC-UFPE por concessão de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- CABRAL, J. J. S. P., SANTOS, S. M., COSTA, L. M., GUIMARÃES, L. N., PONTES FILHO, I. D. S., 2002a. Possibilidade de Ocorrência de Subsidência devido a Superexploração de Aquíferos. 3º Workshop sobre a Utilização de Água Subterrânea no Semi-árido Brasileiro. Recife.
- CABRAL, J. J. S. P., SANTOS, S. M., COSTA, L. M., GUIMARÃES, L. N., PONTES FILHO, I. D. S., 2002b. Simulação Numérica da Possibilidade de Ocorrência de Subsidência devido a Superexploração de água Subterrânea. Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió.
- COSTA, L. M., PONTES FILHO, I. D. S., FERREIRA, S. R. M., 2002. Simulation for Plate Test with Wetting in Collapsible Soil. *Proceedings of the Third Joint Conference of Italian Group of Computational Mechanics and Ibero-Latin American Association of Computational Methods in Engineering – GIMC_2002*. Giulianova, Itália.
- COSTA, L. M., PONTES FILHO, I. D. S. & FERREIRA, S. R. M., 2001a. A Hydro-Mechanical Simulation for Plate Tests in Collapsible Soils. *Proceedings of the 1st Albert Caquot International Conference Modelling and Simulation In Civil Engineering: From Practice To Theory*. Paris, anais em CD-ROM.
- COSTA, L. M., SANTOS, E. A., MAIA, L. M., 2001b. Análise de Fluxo de Água em Meio Poroso Não Saturado. *Anais do Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia. INFOGEO*, Curitiba.
- COSTA, L. M., 2000. *Análise Hidro-Mecânica de Solos Não Saturados com Aplicação a Barragem de Terra*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- COSTA, W. D.; COSTA, H. F.; FERREIRA, C. A.; MORAIS, J. F. S de, VILLA VERDE, E. R.; COSTA, L. B., 2003. *Estudo Hidrogeológico de Recife- Olinda- Camaragibe- Jaboatão dos Guararapes- HIDROREC 2*. SRH-PE. Recife, 150p.
- COSTA, W.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS A. C.; BRITO, A. M.; SOUZA, F. J.; LOPES, A. V.; SANTOS A. J., 1998. *Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana do Recife. UFPE/FADE, IRDC*.
- COSTA, W. D.; SANTOS, A. C.; COSTA FILHO, W. D. ,1994. O Controle Estrutural na Formação dos Aquíferos na Planície do Recife. In: 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recife, ABAS. 38-43.
- DILLON, P., PAVELIC, P., SIBENBALER, X., GERGES, N., CLARK, R., 1997. New Development of New Water Resources by Aquifer Storage and Recovery Using Stormwater Runoff. In: *Australian Water Works Association's 17th Annual Federal Convention*. Adelaide, Australia. Proceedings (Vol. 2).

- GID - *User's Guide*, 2001, Version 6, Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE).
- GUIMARÃES, L. N., 2002. *Análisis Multi-componente no Iso-termo em Medio Poroso Deformable no Saturado*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- GUIMARÃES, L. N., COSTA, L. M., SANTOS, E. A., COSTA, A. P., PONTES FILHO, I. D. S., 2002. Multiphase Flow of Water and Oil in Heterogeneous Reservoir. In: *MECOM 2002*. Santa Fe. Mecanica Computacional, v. XXI, p. 670-682.
- KITU, N. VARADORAJ, R. CHAKKARAPANI, 1995. Impact of Urbanisation on Groundwater in the Madras Coastal Área, Tamil Nadu, Índia. *Groundwater in the Urban Enviroment, Selected Profiles*. Bakelma, Rotterdam.
- MONTEIRO, A.B., COSTA, W. D. & FRANÇA, A. E., 2001. Zona "A" – O Aquífero Cabo pede Socorro. IV *Sim-pósio de Hidrogeologia do Nordeste*. Olinda, PE.
- MONTEIRO, A.B., 2000. *Modelagem de Fluxo Subterrâneo nos Aquíferos da Planície do Recife seus Encaixes*. Dissertação de Mestrado UFPE.
- OLIVELLA, S., 1995. *Nonisothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Thorough Saline Media*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica.
- O'SHEA, M. J., 1994. Drought Management Using Artificial Aquifer Recharge in North London. In: Reeve & Watts (eds), *Drought, Pollution & Management*. Balkema, Rotterdam.
- SILVA, G. E. S., 2004. *Avaliação do Potencial da Recarga Artificial como Alternativa para a Recuperação da Potenciometria de Aquífero - Estudo de Caso na Planície do Recife – PE*. Dissertação de Mestrado, UFPE.
- SILVA, G. E. S., MONTENEGRO, S. M. G. L., MONTENEGRO, A. A. A., COSTA, L. M., CAVALCANTI, G. L., MOURA, A. E. S. S., 2004a. Avaliação do Potencial da Recarga Artificial Através de Águas Pluviais para a Recuperação da Potenciometria de Aquífero Costeiro na Planície do Recife-PE (Brasil) *XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Cuiabá, MT. Anais em cd-room.
- SILVA, G. E. S., L. M., CAVALCANTI, MONTENEGRO, S. M. G. L., 2004b. Modelagem Numérica de Recarga Artificial em Aquífero Costeiro na Planície de Recife (Brasil). In: *XXV Iberian Latin American Congresso on Computacional Methods in Engineering - CILAMCE*. Recife, PE. Anais em cd-room.
- VAN GENUTCHTEN, M.T., 1980. A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science American Society*. Vol. 44, pp. 892-898.

Application And Modeling Of Artificial Recharge Using Rainwater For Potentiometric Recovery In A Coastal Aquifer In The Recife Plain- Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

Artificial recharge in aquifers may be performed to increase groundwater storage and availability, salinization control in coastal aquifers and land subsidence. Recife coastal Plain (PE) multiaquifer system consists of two deep semi-confined aquifers, Cabo and Beberibe, covered by a phreatic aquifer, Boa Viagem. The excessive drawdown of the potentiometric levels in the deep aquifers due to over exploitation is aggravated by the high level of urbanization, which greatly decreases the chance of natural recharge of the system. Thus, the importance of evaluating the potential of artificial recharge using rainfall as an alternative to recover the potentiometric levels in the confined aquifers is highlighted. In this context, the study presents an artificial recharge experiment using rainfall, and some analysis of preliminary tests. The experiments were performed in a region where the greatest drawdowns in Cabo aquifer were observed, in order to verify the results of artificial recharge. In order to analyze different scenarios, numerical analysis was performed using the finite element program CODE_BRIGHT. The results suggest that artificial recharge by injection well at the site studied is feasible. Nevertheless, to evaluate the potentiometric level variations due to recharge, experiments with long duration analysis should be carried out..

Key-words: Artificial recharge, coastal aquifer, groundwater flow, numerical modeling, finite elements

