

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA RECARGA ARTIFICIAL ATRAVÉS DE ÁGUAS PLUVIAIS PARA RECUPERAÇÃO DA POTENCIOMETRIA DE AQUÍFERO COSTEIRO NA PLANÍCIE DO RECIFE-PE (BRASIL)

George do Espírito Santo Silva¹; Suzana Maria Gico Lima Montenegro²;
Aberlardo Antônio de A. Montenegro³; Lícia Mouta da Costa²;
Giancarlo Lins Cavalcanti⁴ & Albert Einstein Spindola Saraiva de Moura⁵

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 confinado 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 confinado. Neste contexto, apresenta-se neste trabalho a montagem de um experimento de recarga artificial que utiliza águas de chuva, juntamente com a análise de alguns ensaios preliminares de campo. Os ensaios foram realizados em área onde tem ocorrido a maior redução dos níveis potenciométricos do aquífero Cabo, a fim de verificar a resposta em campo à recarga artificial e obter parâmetros hidrogeológicos locais para avaliação da recuperação da potenciométrica a partir de um sistema de recarga artificial com poços de injeção.

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 confined aquifers, Cabo and Beberibe, covered by a phreatic aquifer, Boa Viagem. The excessive drawdown of the potentiometric levels in the aquifers

¹ Mestrando do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPE. Bolsista CT-HIDRO/CNPq e-mail: george@ufpe.br

² Prof. Depto. Eng. Civil - UFPE, e-mail: suzanam@ufpe.br, licia@ufpe.br

³ Prof. Depto. de Tecnologia Rural – UFRPE, email: monte@hotlink.com.br

⁴ Aluno de graduação do curso de Engenharia Civil – UFPE. Bolsista PIBIC/UFPE, e-mail: giancarloic@ig.com.br

⁵ Aluno de graduação do curso de agronomia da UFRPE. - Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE - Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n -Cidade Universitária-Recife,PE-50740-530 - Tel : 2126-8709 Fax: 21268220

due to over exploitation is aggravated by the high urbanization level, which highly decreases the chance of natural recharge of the system. So, it is highlighted the importance of evaluating the potential of artificial recharge using rainfall as an alternative for recovering the potentiometric levels in the confined aquifers. In this context, this paper presents the setup of an artificial recharge experiment using rainfall, and some preliminary results. The experiments were carried out in a region where the highest drawdowns in Cabo aquifer have been observed, allowing estimation of local hydrogeological parameters and the response in the potentiometric levels.

Palavras-Chave - Recarga artificial; aquífero costeiro.

INTRODUÇÃO

A exploração excessiva de aquíferos costeiros, em desequilíbrio com o processo de recarga natural vem causando grandes rebaixamentos da potencimetrica dos aquíferos na Região Metropolitana do Recife (RMR), Pernambuco. O rebaixamento excessivo, além de esgotar o manancial hídrico subterrâneo pode colocar o sistema sob risco de salinização por intrusão marinha, ou até o 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 (PE) é composto por dois aquíferos profundos, Cabo e Beberibe, de características confinadas, recobertos por um aquífero freático, o Boa Viagem. Devido aos grandes rebaixamentos ocorridos em função do aumento do número de poços, principalmente durante a última estiagem ocorrida no período de 1998 e 1999, os níveis potencimétricos no aquífero Cabo tem 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 se encontra semi-confinado, devido à presença de camadas sedimentares de baixa permeabilidade que compõem a parte inferior do aquífero Boa Viagem, o que torna a recuperação da potencimetrica por drenança vertical extremamente lenta.

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, B₁, B₂, B₃, C e D, com a descrição do aquífero explotado, 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 estar contaminando o aquífero Cabo, pois grande número de poços construídos na última estiagem foram por empresas não credenciadas, muitos dos quais apresentam problemas construtivos. Outro fator é o aumento da drenança vertical, que aumentaria consideravelmente o fluxo das águas do Boa Viagem até o Cabo.

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.

A utilização de um sistema de poços injetores na Zona A, além de possibilitar a reposição gradual dos volumes retirados nos últimos anos, traria uma outra série de benefícios, como o impedimento do possível avanço da cunha salina, e a melhora da qualidade das águas contaminadas por drenança vertical. É importante salientar ainda que estudos de recarga artificial para a área são extremamente urgente, 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. Numa etapa posterior poderá ser

avaliada a recuperação da potenciometria do aquífero Cabo em um período de recarga prolongado, com os resultados obtidos neste trabalho.

HIDROGEOLOGIA DA PLANÍCIE DO RECIFE

O sistema aquífero da planície do Recife compreende dois aquíferos semi-confinados: o Beberibe ao norte do Lineamento Pernambuco e o Cabo ao sul; e um 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. As características desses aquíferos são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características hidrogeológicas dos aquíferos da RMR (Costa et al., 1998).

Idade	Aquífero	Espessura Média (m)	Geologia
Quaternário	Boa Viagem	40	Areias, siltes e argilas
Cretáceo Superior	Beberibe	100	Arenitos com intercalações de siltitos e argilitos
Cretáceo Inferior	Cabo	90	Arenitos, siltitos e argilitos.

Costa et al (1998) determinaram, através de ensaios de bombeamento, 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 (arenito arcoseano). A Tabela 2 resume os valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos para os aquíferos da planície do Recife.

Tabela 2 - Parâmetros hidrodinâmicos da planície do Recife (Costa et al., 1998).

Parâmetros hidrodinâmicos	Aqüíferos		
	Boa Viagem	Beberibe	Cabo
Transmissividade (m^2/s)	$7,0 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-4}$
Condutividade Hidráulica (m/s)	$1,7 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-5}$	1×10^{-5}
Porosidade eficaz (%)	10	10	7
Coefficiente de armazenamento	-	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$
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 ($<1 m^3/h/m$)

AQÜÍFEROS DA PLANÍCIE DO RECIFE

Aqüífero 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 grosseira, 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.

Aqüífero 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 polimictico 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 fáceis arenosas, e com permeabilidade menor, onde predomina as fáceis 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, aproximadamente entre as coordenadas UTM 290628 a 290703 mE e 9101827 a 9101896 mN, meridiano 33^o, na denominada “Zona A” (Figura 1), sendo o projeto de recarga instalado no condomínio Le Grand Village, localizado na rua Francisco da Cunha, n^o 1910. 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 Shopping Center.

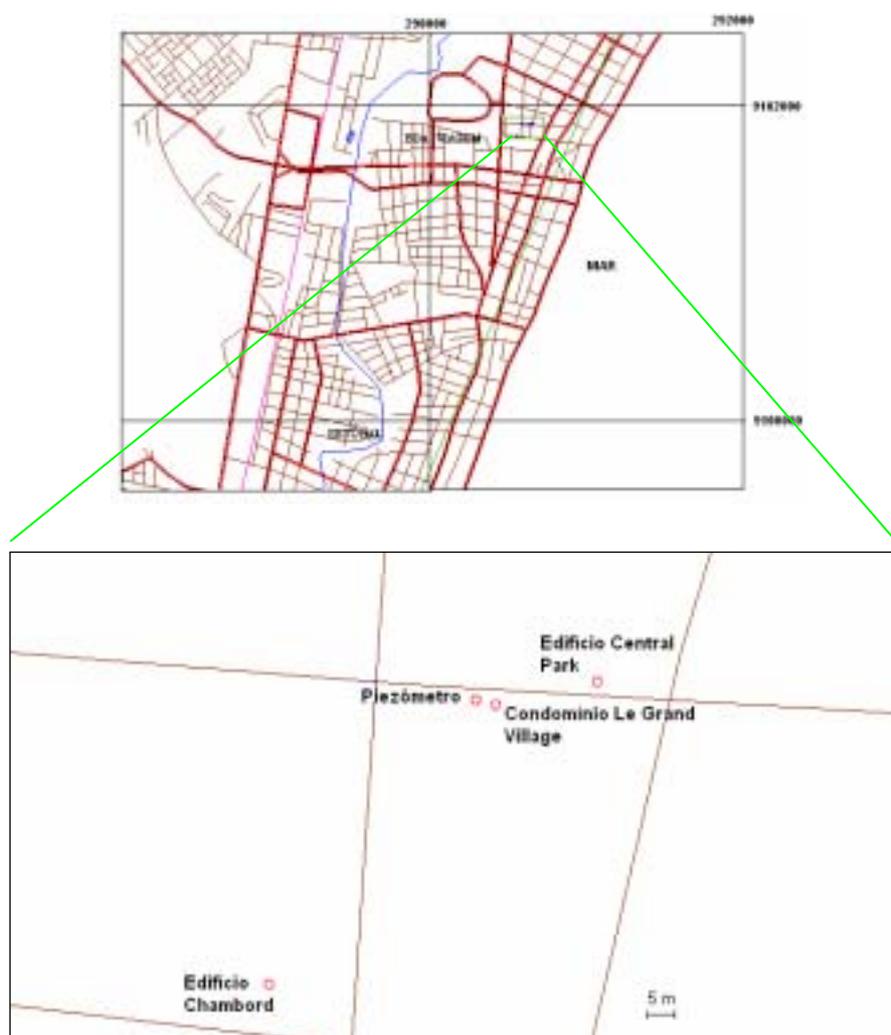


Figura 1 – Área em estudo, em detalhe poços utilizados durante o experimento.

MONTAGEM DO EXPERIMENTO DE RECARGA

A montagem do experimento de recarga artificial foi realizada levando-se em conta a hidrogeologia local, a captação de água de chuva e o controle da qualidade da mesma, além das características do uso do solo no local. Sendo o local de montagem do experimento densamente povoado e a hidrogeologia local indicando o aquífero Cabo como semi-confinado, com sua camada de topo a cerca de 70 m de profundidade, verificou-se que o método de recarga artificial a ser aplicado no estudo deveria ser subsuperficial, de modo que injetasse a água a essa profundidade e interferisse o menos possível no uso do solo. Optou-se então pela utilização de poços de injeção, que utiliza para recarga as águas de chuva coletadas por um sistema de captação, o qual permite controlar a procedência da mesma, o volume a ser armazenado e a sua qualidade.

Poços de injeção / monitoramento de níveis

Durante a montagem do experimento de recarga, foram selecionados poços que possuísem dados de perfis litológico e construtivo, possibilitando assim a obtenção de mais dados 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. A Tabela 3 apresenta os poços utilizados durante os ensaios.

Tabela 3 – Características dos poços injetor e de monitoramento de nível.

Poço	Função	Coordenadas UTM		Filtro (m)	Ano de instalação
		E	N		
Le Grand Village	Injeção	290680,04	9101890,90	102 a 118	1992
Piezômetro	Monitoramento	290675,55	9101892,06	100 a 114	2003
Central Park*	Monitoramento	290703,09	9101896,10	100 a 120	1989
Chambord*	Monitoramento	290628,61	9101828,83	92 a 112	1991

*Poços em operação

- Poço de recarga – Poço do condomínio Le Grand Village, que parou de ser explorado devido ao seu baixo nível piezométrico. O desempenho do poço de recarga pode ser seriamente afetado pela acumulação de sólidos suspensos ou impurezas químicas e biológicas, bem como ar dissolvido e a formação de bolhas de ar devido à turbulência do fluxo. Os efeitos causados por entupimento podem ser evitados através de diversos tipos de tratamento, mas o entupimento uma vez ocorrido exige procedimentos de redensolvimento do poço (Asano, 1985). Antes dos experimentos, o poço injetor passou por dois processos de desenvolvimento:

o primeiro antes de iniciarem-se os ensaios, e o segundo durante a instalação da estação telemétrica pela CPRH (Agência de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente do Estado de Pernambuco);

- Poço piezômetro – poço localizado a 4,6 m de distância do poço injetor, instalado para medir o nível d'água na proximidade do poço injetor;
- Poços de monitoramento – poços de condomínios vizinhos escolhidos para monitorar os efeitos da recarga em áreas próximas ao injetor. Para isto foram instalados nestes poços tubos de acesso para medidor de nível.

Área de captação das água de chuva

É formada pela área do telhado mais a área de livre circulação externa (pátio e lazer), perfazendo um total de 2.270 m². As águas do telhado e do pátio são captadas por um sistema de tubulações independentes das tubulações do condomínio, sendo que as tubulações que captam as águas provenientes do telhado e da área de circulação são independentes entre si, podendo-se assim escolher se determinada área do condomínio contribuirá ou não na acumulação das águas de chuva. Com isso evita-se, por exemplo, que água contaminadas de uma determinada área do condomínio comprometam a qualidade da água do reservatório.

Sistema de filtração/captação das águas pluviais

Uma importante consideração sobre a qualidade da água na recarga artificial de aquíferos é a concentração de sólidos suspensos da fonte de suprimento (Pyne, 1995). Antes de serem recolhidas ao reservatório, as águas captadas passam por um sistema de filtração, que tem a função de reter todo material granular carregado pela chuva. Acoplado a este sistema há um sistema de controle de captação das águas pluviais que permite a seleção da procedência das águas através de um sistema de registros (Figura 2). A água coletada é direcionada para o reservatório enterrado.

Com a utilização deste sistema é possível determinar se a captação das água de chuva acumularia água da área total (cobertas e pátio) ou apenas de uma determinada área do condomínio. Este sistema permite também a saída das águas diretamente para a rua, no caso do reservatório ficar completamente cheio. O reservatório utilizado possui capacidade de 100 m³. A Figura 2 apresenta o esquema de funcionamento do sistema de captação de águas pluviais.

Além do tratamento físico das águas de chuva, se faz necessário o acompanhamento da qualidade das águas de chuva e do reservatório através de análises químicas. A água da recarga deve ser quimicamente compatível com a do aquífero e com a água presente no solo, para evitar reações químicas que poderiam reduzir a porosidade efetiva e a capacidade de recarga, como por exemplo, reações que causam precipitação. Outro problema pode ser a presença de gases

dissolvidos, que podem alterar o pH do líquido ou ficar fora da solução, formando bolhas de ar que consomem espaço e diminuem a permeabilidade do aquífero. Substâncias tóxicas em teor superior ao exigido pela saúde pública não devem estar presentes na água de recarga.

Agentes biológicos como algas ou bactérias podem estar presentes na água de recarga. O crescimento de algas ou bactérias durante a recarga pode causar entupimento da superfície de infiltração e iniciar a produção de gases que futuramente influiriam negativamente no resultado da recarga (Asano, 1985). A remediação nesses casos é dispendiosa. Alguns tratamentos, como a cloração, podem evitar este problema.



Figura 2 – Sistema de captação das águas pluviais e filtro.

Sistema injetor

O sistema injetor é formado por um conjunto de vários elementos, sendo o principal a bomba injetora, que é acionada assim que a bóia no reservatório atinge um determinado nível, iniciando assim a recarga. Além do sensor de bóia instalado no reservatório, o sistema injetor possui outro sensor de nível instalado no poço injetor, que desliga a bomba quando o nível do poço chega a cota do terreno. A vazão da bomba injetora é regulada de modo a permitir a maior taxa de recarga possível para o ensaio.

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Inicialmente, foi realizado um ensaio de recarga com carga variável, com o objetivo de obter uma estimativa inicial da taxa de recarga aplicável, sendo obtido o valor de 500 l/h. A importância do conhecimento da taxa de infiltração consiste no fato de que ela possibilita ajustar o sistema de recarga para uma vazão ótima, a fim de obter melhores respostas de recarga durante os ensaios e permitir que estudos de recarga a longo prazo sejam realizados sem que haja a necessidade de um ajuste da vazão do sistema.

A variação dos níveis d'água foi aferida através da utilização de medidores automáticos e manuais. Pela importância maior dos seus dados, no poço piezômetro foi instalado um medidor de nível automático (LT-Levelogger 45003), com capacidade de suportar carga hidráulica de até 30 m. Ele registra a variação dos níveis e os dados podem ser posteriormente descarregados (Figura 3.a). Nos poços dos edifícios Chambord e Central Park foram utilizados medidores de nível manuais, que possuem um fio graduado com um sensor na ponta (Figura 3.b). Ao tocar na água, o circuito do sensor fecha e ele emite um sinal sonoro e um luminoso.



Figura 3 – medidores de nível (a) automático e (b) manual.

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 níveis potenciométricos do aquífero e estimar parâmetros hidrogeológicos do sítio, através da análise do comportamento hidrodinâmico do mesmo à recarga artificial. Os ensaios permitiram simplificar a metodologia aplicada, permitindo assim realizar ensaios que obtenham melhores respostas do aquífero à recarga.

Ensaio de campo do dia 05/11/2003

Os níveis estáticos medidos no sítio antes do início dos ensaios mostraram que havia uma grande diferença entre os níveis dos poços monitorados (Tabela 4), principalmente quando comparamos 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 4,6 m.

Tabela 4 – níveis estáticos medidos no dia 05/11/2003

Poço	Nível Estático (m)	Nível Estático no ano de instalação (m)
Piezômetro	77,51	77,51
Le Grand Village	95,78	51
Central Park	95,12	38

As razões para tal diferença de nível entre poços tão próximos não são claras. Antes do início dos ensaios de recarga havia-se feito um trabalho de desenvolvimento no poço injetor (poço do condomínio Le Grand Village), o poço piezômetro era recém instalado, e os dois poços passaram por perfilagem ótica. Com isso, não se pode afirmar que esta diferença de nível ocorresse devido a problemas construtivos nos poços. Além do mais, outros poços da região apresentavam níveis próximos ao do piezômetro, como o do edifício Chambord cujo nível avaliado pelos dados do projeto ANPOREC (Cabral et al., 2000) em julho de 2003 era de 81,88 m. Como o nível medido em maio de 2004 era cerca de 84 m, supõe-se que em novembro de 2003 o nível no poço do edifício Chambord ficasse entre estes dois valores. Já os níveis do poço do Edifício Central Park apresentavam níveis próximos do poço injetor (Tabela 4), e o poço do edifício Regent's Park, localizado a 72 m do injetor e que tem 138 m de profundidade possui nível estático de 102 m (dado de 01/2004), indicando que os níveis no injetor também estão dentro da realidade local. 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. Observa-se por dados litológicos que o poço injetor possui o filtro instalado em uma camada inferior a do piezômetro, que por uma possível diferença entre as velocidades de fluxo entre as camadas superior e inferior ao mesmo poderiam causar a diferença entre os níveis. Outro fator de influência seria o bombeamentos de poços vizinhos nesta mesma camada inferior, o que diminuiria ainda mais os níveis do injetor.

Foi realizado um ensaio de recarga intermitente, conforme a Figura 4.a, onde os níveis foram monitorados tanto no poço injetor (poço do condomínio Le Grand Village), quanto no piezômetro e no poço do edifício Central Park. A Figura 4.b apresenta o gráfico de volumes acumulados com o tempo, registrados pelo hidrômetro da bomba e o volume acumulado com o tempo no tubo do poço

injetor. Com isso foi possível estimar o volume que infiltra no solo com o tempo, e estimar a taxa de recarga. Neste ensaio foi injetado um volume total de 2,701 m³.

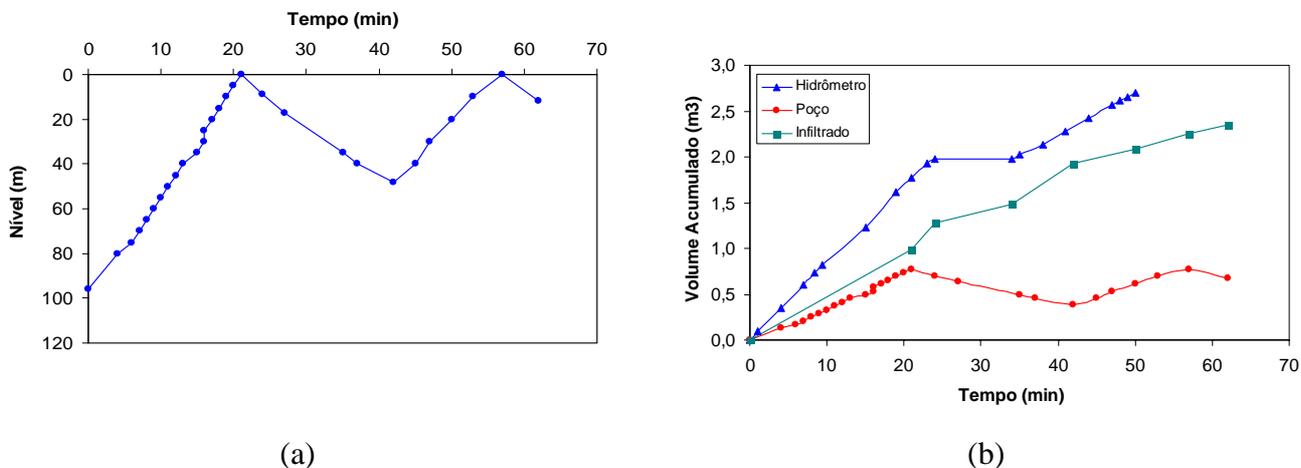


Figura 4 – (a) variação dos níveis no poço injetor durante o ensaio de recarga (b) Volumes acumulados com o tempo, dados pelo hidrômetro, acumulado no poço e infiltrado no aquífero.

Observando o gráfico da Figura 5.a, nota-se que o volume acumulado infiltrado no solo aumenta aproximadamente com uma taxa constante. Considerando então o volume acumulado como uma função linear, pode-se estimar a taxa média de infiltração no aquífero, que seria a taxa de recarga. Neste ensaio, a taxa ficou em torno de 2,490 m³/h.

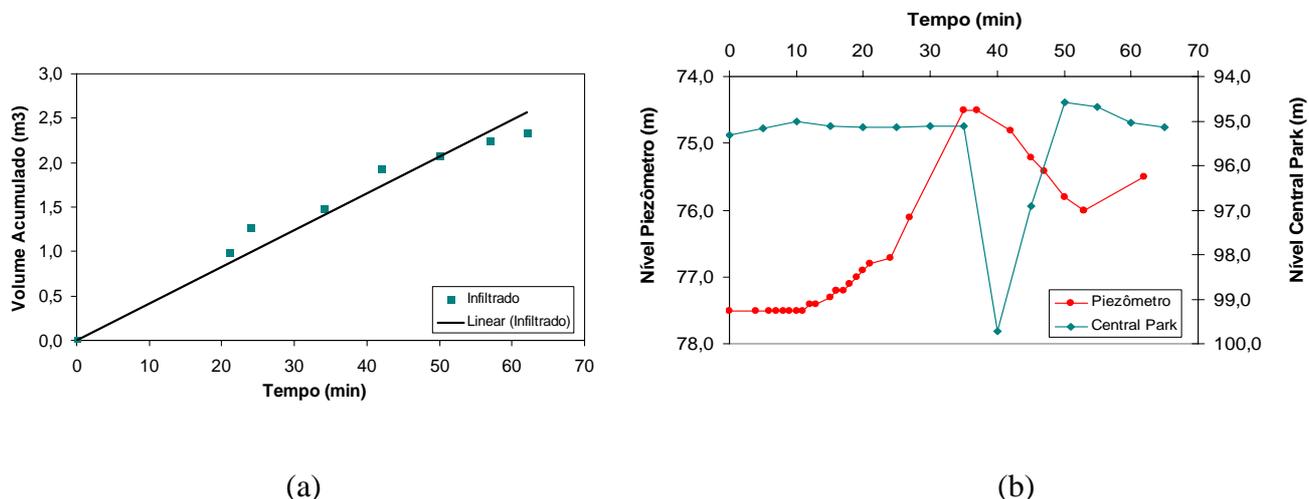


Figura 5 – (a) volume acumulado infiltrado no aquífero. (b) variação dos níveis piezométricos medidas nos poços piezômetro e do edif. Central Park.

Os poços de monitoramento de nível indicaram uma variação de nível relativamente pequena, tanto no piezômetro, que variou 3 m, quanto no poço do edifício Central Park, que se manteve estável em boa parte do ensaio, e apresentou queda do nível de 5 m devido ao acionamento da

bomba no mesmo, que é automático e não pode ser evitado durante o experimento. A Figura 5.b apresenta a variação da piezometria medida nos dois poços.

Ensaio de campo do dia 07/11/2003

Os níveis estáticos medidos no sítio antes do início dos ensaios mostraram que a diferença entre os níveis dos poços injetor (LGV) e piezômetro era de 8,9 m (Tabela 5), valor abaixo da diferença registrada no ensaio de recarga do dia 05/11/2003. Nota-se que tanto no piezômetro quanto no injetor os níveis subiram sensivelmente, principalmente no segundo. Essa variação entre os níveis, principalmente no injetor, deve ser causada pela influência dos bombeamentos que ocorrem no poço do edifício Central Park, já que foi observado durante os ensaios de campo que a influência do mesmo durante os bombeamentos no poço injetor é maior que a que ocorre no piezômetro. Essa maior influência deve-se principalmente ao fato dos filtros dos poços injetor e do Edf. Central Park estarem localizados numa mesma camada aquífera, o que não ocorre no piezômetro. Enquanto os níveis medidos no injetor e no piezômetro são estáticos, o nível do poço do edf. Central Park é dinâmico, devido ao mesmo estar bombeando durante os ensaios.

Tabela 5 – níveis estáticos medidos no dia 07/11/2003

Poço	Nível (m)	Nível Estático no ano de instalação (m)
Piezômetro	75,96	77,51
Le Grand Village	84,86	51
Central Park	100,70*	38

*Dinâmico

Foi realizado um ensaio de recarga intermitente, conforme a Figura 6.a, onde os níveis foram monitorados no poço injetor (LGV) e no poço do edifício Central Park. Como no ensaio anterior, as vazões registradas pelo hidrômetro e a variação dos níveis no injetor permitiram estimar os volumes acumulados dados pelo hidrômetro, acumulado no tubo do poço e infiltrado, e também ser verificada a taxa de recarga durante o ensaio.

Observa-se na Figura 6.b que no início do primeiro ciclo do ensaio o volume acumulado no poço foi maior que o volume infiltrado, evidenciando mais uma vez a baixa taxa de infiltração que o aquífero possui. Pode-se ainda observar que o volume infiltrado não acompanha o volume acumulado dado pelo hidrômetro. Neste ensaio foi injetado um volume total de 3,527 m³.

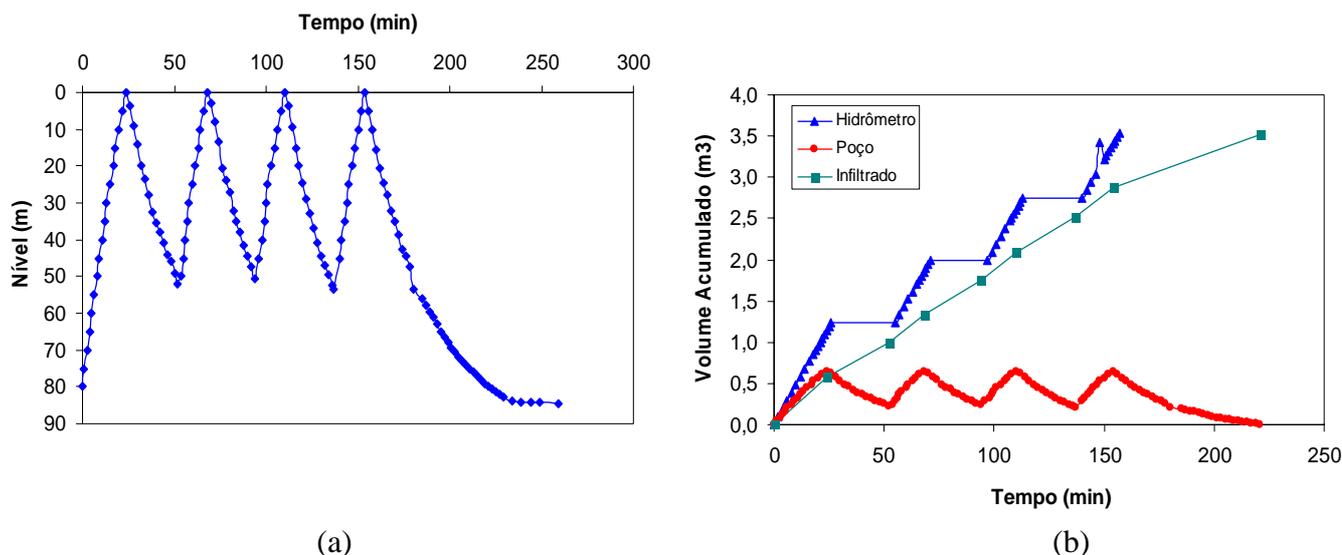


Figura 6 – (a) variação dos níveis no poço injetor durante o ensaio de recarga. (b) volumes acumulados com o tempo, dados pelo hidrômetro, acumulado no poço e infiltrado no aquífero.

No gráfico da Figura 7, pode-se observar que, conforme o que ocorreu no ensaio do dia 05/11/2003, o volume acumulado infiltrado no solo aumenta segundo uma taxa constante, porém de valor bastante inferior à obtida no ensaio anterior. A possível causa desta diferença entre as taxas seria a diferença entre os níveis estáticos medidos antes dos ensaios. Como os níveis estáticos eram maiores no dia 07/11/2003, houve uma maior resistência à percolação da água, pois a diferença de carga entre o nível estático no injetor e a carga hidráulica da injeção era menor. Semelhantemente ao ensaio anterior, pode-se considerar o volume acumulado varia segundo uma taxa constante, obtendo-se uma taxa de infiltração média $0,957 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo a máxima de $1,128 \text{ m}^3/\text{h}$.

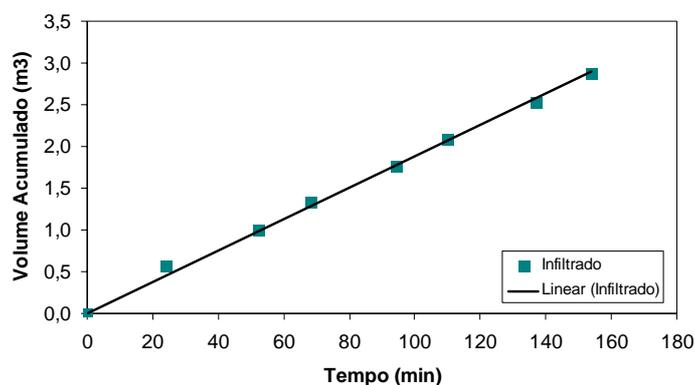


Figura 7 – Volume acumulado infiltrado no solo.

Instalação da estação telemétrica / redesenvolvimento do poço injetor

Entre os dias 10 a 21/11/2003, a CPRH (Agência de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco) instalou no poço do condomínio Le Grand Village uma estação telemétrica, de medição remota de níveis e condutividade elétrica da água, para medição da variação piezométrica e da concentração de sais. Durante a instalação da mesma foi efetuado um novo desenvolvimento do poço injetor.

Durante o período de instalação da estação foi observado que, quando ocorriam bombeamentos no poço do edifício Central Park, os níveis caíam no poço injetor (LGV), o que não ocorria no piezômetro. Comparando esse fato com os dados da perfilagem geofísica, executada na instalação do piezômetro, e com os dados litológicos do poço injetor, foi verificado que a presença de uma camada argilosa, situada entre as cotas 114 a 116 m, poderia ser a causa da diferença entre os níveis medidos entre estes dois poços. Como o piezômetro termina justamente no início da camada argilosa (114 m) e os poços injetor e do edf. Central Park atravessam essa camada, a diferença entre os níveis poderia ocorrer devido a uma diferença da velocidade do fluxo nas camadas superior e inferior a esta lente argilosa, que ocorreria, por exemplo, se a permeabilidade do arenito inferior à camada argilosa fosse maior que a do superior. Sendo as velocidades de fluxo maiores no poço injetor (LGV) do que no piezômetro, as pressões de LGV cairiam sensivelmente, o que explicaria a diferença entre os níveis medidos entre estes dois poços. Há de se destacar também que o poço do edifício Chambord, que possui níveis mais próximos dos medidos no piezômetro tem profundidade de 112 m, enquanto a profundidade do injetor e do poço do edf. Central Park são respectivamente 118 e 120 m, o que indicaria que a complexa hidrogeologia local seria a causa das diferenças de nível entre os poços monitorados.

Mesmo sendo realizado o redesenvolvimento do poço injetor (LGV), a diferença entre os níveis dos poços injetor e piezômetro não tiveram mudanças significativas, indicando mais uma vez que a diferença entre os níveis dos poços monitorados não se trataria de problemas construtivos, mas devido principalmente a efeitos de bombeamento em prédios vizinhos, da hidrogeologia, etc., que têm grande impacto na velocidade e a direção do fluxo subterrâneo.

Ensaio de campo do dia 10/12/2003

Após a instalação da estação telemétrica, foi realizado mais um ensaio de recarga, a fim de observar os resultados do redesenvolvimento do injetor. A Tabela 6 apresenta os níveis estáticos medidos antes do ensaio, sendo que a diferença entre os níveis no piezômetro e no injetor (LGV), continuava elevada, em torno de 8,6 m, muito próximo aos 8,9 m medidos no ensaio do dia 07/11/2003, indicando que esta diferença se deve realmente às condições de fluxo e à complexa hidrogeologia local.

Tabela 6 – níveis estáticos medidos no dia 10/12/2003.

Poço	Nível Estático (m)	Nível Estático no ano de instalação (m)
Piezômetro	80,55	77,51
Le Grand Village	89,13	51
Central Park	99,63	38

Foi realizado um ensaio de recarga intermitente, conforme a Figura 8.a, onde os níveis foram monitorados no poço injetor (LGV), no poço piezômetro e no poço do edifício Central Park. Como nos ensaios anteriores, as vazões do hidrômetro e variação dos níveis no injetor foram registradas, para que os volumes acumulados pelo hidrômetro, acumulado no tubo do poço e infiltrado pudesse ser estimados.

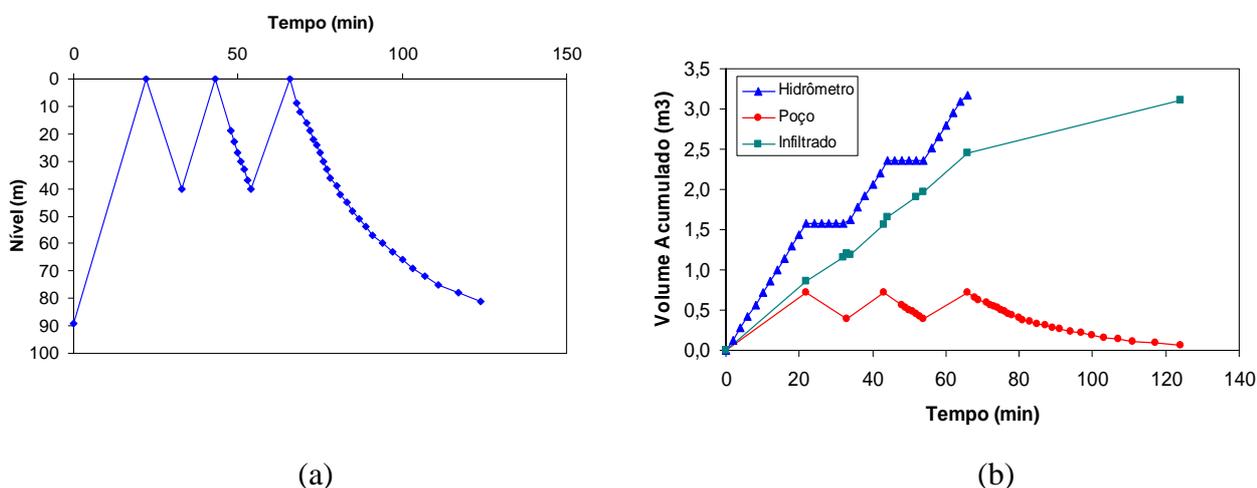


Figura 8- (a) variação dos níveis no poço injetor durante o ensaio de recarga. (b) Volumes acumulados com o tempo, dados pelo hidrômetro, acumulado no poço e infiltrado no aquífero.

Durante o ensaio, o volume total injetado foi de $3,174 \text{ m}^3$, sendo a vazão média estimada durante a operação de $2,202 \text{ m}^3/\text{h}$, chegando a $2,477 \text{ m}^3/\text{h}$. Como a dispersão dos pontos no gráfico é muito menor do que a que ocorreu no ensaio do dia 05/11/2003, onde a taxa média de injeção é mais próxima da atual, observa-se que a taxa de recarga foi favorecida pelo redesenvolvimento do poço. A Figura 9.a apresenta a variação destes volumes com o tempo. É possível observar que a vazão de injeção varia de acordo com a carga hidráulica, que durante o ensaio varia em torno de 40 m.

O monitoramento dos níveis nos poços indicou uma variação de nível maior que as obtidas durante os outros ensaios, tanto no piezômetro quanto no poço do edf. Central Park, devido principalmente ao aumento da taxa de infiltração. No piezômetro, enquanto os níveis no ensaio dia 05/11/2004 variaram cerca de 3 m, neste ensaio os níveis subiram cerca de 6,5 m. Já o poço do edf. Central Park também apresentou elevação dos níveis em até 0,8 m, que nos ensaios anteriores não havia sido detectado. É interessante observar também no gráfico da Figura 9.b que a resposta à recarga tanto do poço piezômetro quanto do poço do edf. Central Park possuem o mesmo comportamento, apesar de variação de níveis diferentes, já que à distância do piezômetro ao injetor é de 4,6 m enquanto à distância do poço do edf. Central Park é de 24 m. Isso é um indicativo de que, apesar da complexa hidrogeologia local, a resposta à recarga artificial no sítio é semelhante em diferentes pontos.

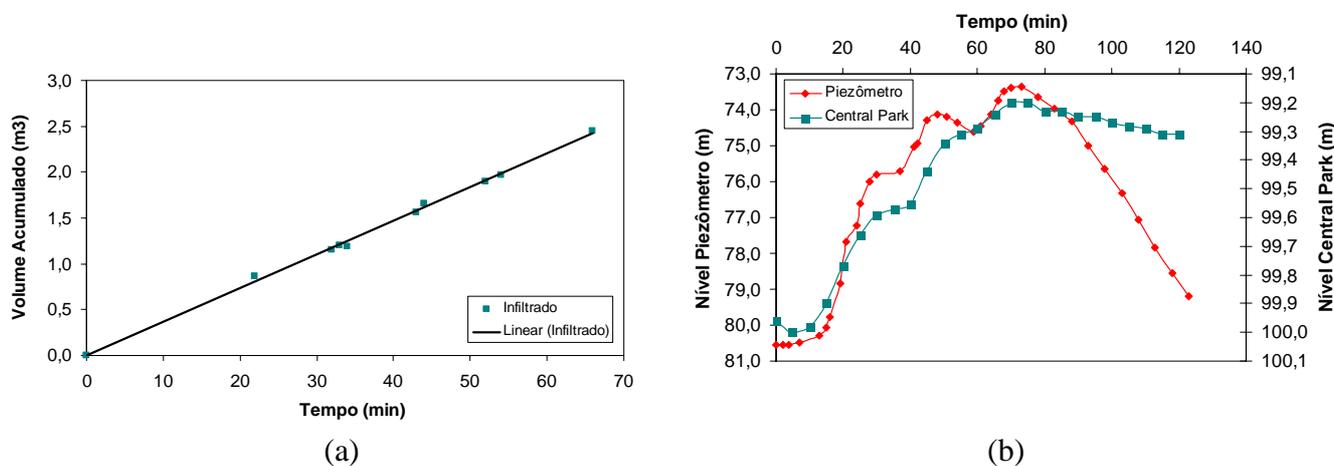


Figura 9 – (a) volume acumulado infiltrado no solo. (b) variação dos níveis piezométricos medidas nos poços piezômetro e do edf. Central Park.

Ensaio de campo do dia 28/05/2004

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 era de 8,9 m (ver Tabela 7).

Este ensaio foi realizado de modo a manter a vazão na bomba constante, sendo considerada a vazão dada como taxa de recarga. 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 10.a tem-se a variação da vazão durante o ensaio. A partir deste resultados

pode-se determinar aproximadamente a taxa de infiltração, que ficou em torno de 2,445 m³/h. O volume total injetado foi 7,045 m³, em 150 minutos de teste.

Tabela 7 – níveis estáticos medidos no dia 28/05/2004.

Poço	Nível Estático (m)	Nível Estático no ano de instalação (m)
Piezômetro	77,22	77,51
Le Grand Village	86,20	51
Central Park	92,36	38
Chambord	82,57	46

O monitoramento dos níveis nos poços indicou uma variação de nível menor que as obtidas durante o ensaio do dia 10/12/2003, no piezômetro. Isto se deve principalmente ao fato do ensaio não ter sido realizado em regime intermitente, que permitiria maiores vazões e, assim, maiores elevações. Durante os ensaios, a elevação dos níveis no piezômetro chegou a 4 m. Conforme o ensaio anterior, o poço do edf. Central Park apresentou elevação dos níveis em resposta a recarga, seu nível variando em até 0,9 m. A Figura 10.b mostra que o comportamento hidráulico dos níveis medidos no piezômetro e no poço do edf. Central Park é semelhante, conforme foi observado no ensaio anterior.

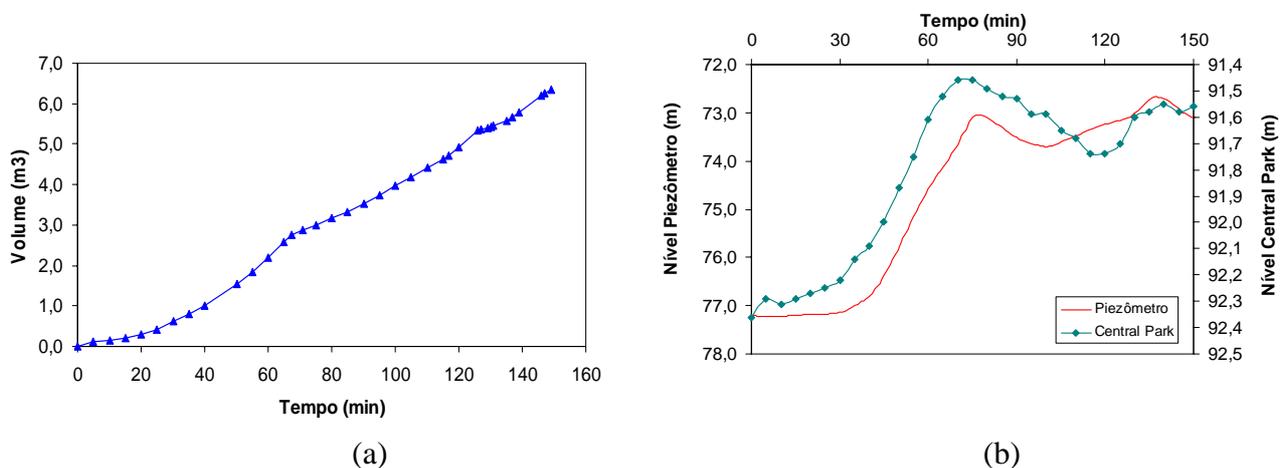


Figura 10 – (a) volumes acumulados dados pelo hidrômetro. (b) Variação dos níveis piezométricos medidas nos poços piezômetro e do edf. Central Park.

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 foi possível determinar parâmetros essenciais para análise de ensaios de recarga, além de observar a resposta do aquífero à recarga. Algumas observações importantes são:

- Os níveis estáticos influenciam decisivamente na taxa de infiltração do solo, devendo sua variação ser levada em conta num projeto de recarga artificial; como pode ser observado, a diferença entre os níveis do piezômetro e do injetor é constante, em torno de 8,9 m, sendo originada pela complexa hidrogeologia da região. Os dados obtidos através da estação telemétrica permitirão um conhecimento maior da variação dos níveis estáticos no sítio, além do estudo dos efeitos da recarga a longo prazo a ser feito em estudo posterior;
- A vazão de injeção estimada possível de ser injetada é de aproximadamente 2,380 m³/h.
- Apesar da complexa hidrogeologia local, as respostas à recarga nos poços monitorados são semelhantes, indicando que a variação piezométrica depende fundamentalmente da distância do ponto de injeção ao de monitoramento;
- A eficiência da recarga depende fundamentalmente da taxa de recarga obtida, que é função direta da carga hidráulica. Outro fator importante para se obter boas taxas de recarga é a manutenção periódica do poço injetor, pois o redensolvimento 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 modelar um modelo matemático que permite simular cenários diversos de recarga, que indicarão os próximos passos para as investigações a serem realizadas a fim de obter informações suficientes sobre o impacto da recarga artificial antes da proposição da prática de maneira disseminada.

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 BIBLIOGRÁFICAS

[1] Asano, T. (1985). Artificial Recharge of Groundwater. Butterworth Publishers, Califórnia, 767 p.

- [2] Cabral, J. J. da S. P., Santos, S. M. dos, Demétrio, J. G. A., Montenegro, S. M. G. L. (2000). A Groundwater Information System for Recife Metropolitan Region. In: MIS, 2000, Lisboa. MIS 2000.
- [3] 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.
- [4] 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. 1998.
- [5] Costa, W. D.; Santos, A. C.; Costa Filho, W. D. (1994). O Controle Estrutural na Formação dos Aquíferos na Planície do Recife. In: 8^o Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recife, ABAS. 38-43.
- [6] Kitu, N. Varadoraj; R. Chakkarapani (1999). Impact of urbanisation on groundwater in the Madras Coastal área, Tamil Nadu, Índia. Groundwater in the Urban Enviroment, Selected Profiles. Bakelma, Rotterdam.
- [7] Monteiro, A.B. (2000). Modelagem de Fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife seus encaixes, Dissertação de Mestrado UFPE.
- [8] Monteiro, A.B.; Costa, W. D.; França, A. E. (2001). Zona “A” – O Aquífero Cabo pede Socorro. In : IV Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. Olinda, PE. 595 – 605.
- [9] O’Shea, M. J.(1994). Drought management using artificial aquifer recharge in north London. In: Reeve & Watts (eds), Drought, Pollution & Management. Balkema, Rotterdam,.
- [10] P. Dillon, P. Pavelic, X. Sibenbaler, N. Gerges, R. Clark. (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).
- [11] Pyne, R. D. G. (1995), Groundwater Recharge and Wells: a guide to aquifer storage and recovery. Lewis Publishers, Florida, 376p.