

SIMULAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE BARRAGEM SUBTERRÂNEA, IMPLANTADA NA MICROBACIA DO CÓRREGO FUNDO, SITUADA NA REGIÃO DOS LAGOS/RJ.

Iara Mello de Freitas¹ e Elson Antonio do Nascimento²

Resumo

No Estado do Rio, embora predominem precipitações relativamente altas, existem regiões que sofrem secas prolongadas. Como alternativa para a irrigação de lavouras nestas áreas, foi introduzida a técnica de construção de barragens subterrâneas. Os resultados preliminares mostram-se favoráveis, entretanto, evidenciou-se a necessidade de uma análise quantitativa para avaliar a efetiva aplicabilidade desta tecnologia e seus efeitos sobre o meio ambiente. Foram realizados levantamentos de campo e desenvolvidas simulações com o emprego do software MODFLOW integrado a um SIG. A barragem subterrânea comportou-se como um reservatório que pode armazenar simultaneamente água superficial e subterrânea. As conclusões indicam que a vazão do aquífero subterrâneo é baixa. A extração de equilíbrio, quando sob condições de aporte simultâneo de água superficial e subterrânea é de 32 m³/dia. Por outro lado, a vazão de 1,2 l/s que passa diariamente no vertedor, na maioria dos meses do ano, representa um volume muito grande de água em relação à capacidade de armazenamento da porção subterrânea. Portanto, fica descartado o risco de impacto ambiental à jusante da barragem. Em período de seca prolongada, cessado o escoamento superficial, o agricultor contará com 5 m³ de água/dia, por um período de 30 dias, segundo os resultados da simulação.

Abstract

Although the precipitation in most of the Rio de Janeiro State is relatively high, in some regions drought happens. In order to make it possible to develop irrigated agriculture in that areas the technology of groundwater dam was applied. For evaluation of this methodology a field data was collected followed by computational simulation of the basin. The MODFLOW software was applied to simulate the groundwater flow under SIG environment. Based on the dam influence both groundwater and superficial water has been accumulated. The accumulated groundwater seems to be very low when compared to the superficial water flow which means that no environmental hazard is expected downstream. The discharge of 32 m³ per day from well was achieved when

¹ Engenheira Agrônoma da EMATER-RIO, mestranda do Curso de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – UFF. Rua José Martins de Souza,, 104, bairro Estação – São Pedro da Aldeia/RJ – CEP: 28.940-000. Telefone (22) 2621 3500 E-mail: biologica@aldeia.psi.br

² Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil/UFF, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFF. Rua Passos da Pátria, 156 – Niterói/RJ – CEP: 24.130-240. – Tel:(21) 2629 5442 E-mail: elsonn@vm.uff.br

simultaneous water come from both groundwater and the superficial water. The simulation has showed that when the available water comes only from the aquifer the well discharge is around 5 m³ per day.

Palavra chave: barragem subterrânea, simulação, hidrogeologia

1. INTRODUÇÃO

O estado do Rio de Janeiro, situado na costa sudeste do Brasil, tem clima fortemente influenciado por fatores locais e dinâmicos, apresentando grande diversidade. Embora predominem precipitações relativamente altas, existem regiões do estado que suportam secas prolongadas com precipitações irregulares [1]. Entre elas esta incluída parte da Região dos Lagos, situada próxima à brusca inflexão da linha de costa que ocorre em Arraial do Cabo. Essa área abrange parte ou integralmente os municípios de Cabo Frio, São Pedro da Aldeia, Iguaba Grande, Armação dos Búzios, Arraial do Cabo e Araruama.

Objetivando a criação de alternativas para a irrigação de lavouras em regiões frequentemente atingidas por secas, foi introduzida experimentalmente no estado do Rio de Janeiro a técnica de construção de barragens subterrâneas. Isto aconteceu em 2002 através de um trabalho desenvolvido pela EMATER-RIO, PESAGRO-RIO e Secretaria Municipal de Agricultura, Pesca e Meio Ambiente de Iguaba Grande, com recursos financeiros do PRONAF. Este projeto, denominado Projeto Águas da Terra, teve como objetivo o desenvolvimento de técnicas e meios para aumentar a captação e o armazenamento de água, para uso em agricultura familiar.

Os resultados preliminares do projeto, com água jorrando frequentemente pelo vertedor das barragens, geraram grande interesse na tecnologia entre técnicos e produtores rurais de todas as regiões secas do estado do Rio de Janeiro. Por outro lado, existe por parte das instituições públicas ligadas ao setor rural, a necessidade de desenvolver formas rápidas e eficientes para a realização de avaliações técnicas de sistemas hidrológicos, de modo a minimizar possíveis prejuízos ambientais do uso agrícola inadequado do recurso hídrico.

O presente trabalho foi realizado visando avaliar a aplicabilidade de barragens subterrâneas para atender a demanda hídrica da agricultura familiar, na Região dos Lagos. Esse aquífero afetado pela barragem subterrânea apresentou peculiaridades, devido ao seu fluxo misto, que permitiu a análise da integração dos corpos de água superficial e subterrâneo. Para a determinação do potencial hidrológico dessas barragens de forma rápida e eficiente, empregou-se técnicas de geoprocessamento e de simulação computacional para a modelagem de fluxo subterrâneo.

2. METODOLOGIA

Foram realizados levantamentos de campo e a utilizados multimeios digitais, compostos de ferramentas de geoprocessamento aliadas a mapas digitais. Para simulação do fluxo subterrâneo foi empregado o software MODFLOW integrado ao Sistema de Informação Geográfica - SIG. Na última década, diversos pesquisadores têm utilizado SIG para auxiliar nas atividades de modelagem matemática de fluxos regionais. Essa ferramenta possibilita a sistematização dos parâmetros a serem utilizados no modelo e a visualização espacial das informações, facilitando o processo de calibração do modelo, assim como a análise dos resultados. O MODFLOW foi escolhido para modelagem da barragem devido a sua extensa aplicação neste tipo de análise, não somente no Brasil mas, sobretudo, no exterior, notadamente Canadá e Estados Unidos.

Buscando ferramentas que permitissem reproduzir o meio aquífero e os processos envolvidos no mesmo, foram desenvolvidos os primeiros estudos de modelagem subterrânea, resultantes da instalação de reservatórios. Os primeiros trabalhos sobre simulação matemática de fluxo subterrâneo no Brasil foram realizados em São Paulo, em 1970 [2]. No final da década de 80 foi lançado o modelo numérico digital modular tridimensional, MODFLOW, criado por McDonald e Harbaugh [3]. Este modelo utiliza o método das diferenças finitas para a representação algébrica das equações governantes do fluxo subterrâneo. Ele é composto por uma série de módulos com recursos que permitem a representação dos diferentes componentes do sistema como: drenos, recarga do lençol freático, taxa de extração e evapotranspiração, para a caracterização hidrogeológica do aquífero. A discretização do domínio é feita em malha regular representada por blocos. Estes blocos têm uma única dimensão ou podem sofrer variações, através da subdivisão em frações menores, caracterizando o processo de refinamento da malha [4]. Este software permite atualização de dados e retro análises possibilitando a simulação em diferentes períodos de tempo e cenários. Segundo Nascimento [5], uma das maiores dificuldades para o desenvolvimento da simulação computacional é a calibração do modelo de fluxo, considerando-se a realidade de cada bacia hidrográfica.

A modelagem baseou-se em expressões infinitesimais resultantes da solução das equações governantes do fluxo subterrâneo, dada pela combinação da equação de continuidade com a lei de Darcy [6]. Para a análise matemática dos dados dos testes utilizou-se o método de Hvorslev [7], largamente usado para o cálculo da condutividade hidráulica, sendo a condutividade expressa pela fórmula:

$$K = A/F(t_2 - t_1) \ln (h_1/h_2). \quad (1)$$

Onde K é a condutividade hidráulica saturada da região testada (LT-1); A à área transversal do furo de sondagem (L²); F o fator de forma (L), que depende da geometria e das condições de contorno do teste; h₁ a carga medida no tempo t₁ após o início do teste(L) e h₂ a carga medida no tempo t₂ após o início do teste (L).

Para o cálculo da vazão superficial utilizou-se a fórmula de Ballofett [8] muito empregada para estimar a vazão em vertedores, expressa pela fórmula:

$$Q = 1,71 * L * H^{3/2} \quad (2)$$

Onde Q é a vazão no sangradouro (m³/s); L é a largura da soleira (m) e H é a altura da lâmina de água vertente (m).

Essa fórmula foi aplicada aos dados de vazão coletados diariamente no vertedor. A largura da soleira por onde verte a água da chuva foi estimada com base na média entre valores medidos em várias ocasiões do ano 2005.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Descrição da Área

3.1.1 Caracterização da bacia hidrográfica

A área estudada localiza-se na costa leste do estado do Rio de Janeiro, na Região dos Lagos, na bacia hidrográfica do rio Una, na divisa dos municípios de Iguaba Grande e São Pedro da Aldeia. Essa bacia tem 480 km² de área, abrangendo boa parte dos municípios de São Pedro da Aldeia, Cabo Frio e Iguaba Grande, e uma parcela menor dos municípios de Araruama e de Armação dos Búzios. É constituída de uma grande baixada circundada por colinas, tendo a Serra da Sapeatiba e da Sapeatiba Mirim como principais elementos notáveis da paisagem [9].

A bacia do rio Una tem uma formação geológica bem antiga, principalmente em sua porção mais alta, onde aflora a Unidade Região dos Lagos, formada no período pré-cambriano, representada por gnaisses graníticos a granodioríticos e migmatitos, de coloração branca a cinza e granulação média a grossa. Nas baixadas predominam formações recentes, do quaternário, compostas por areias quartzosas, localmente misturadas a argila e matéria orgânica, às vezes situadas acima de sedimentos pré-cambrianos [10].

Os solos da bacia do rio Una são constituídos de Gleissolos, Planossolos e Argissolos. Os Planossolos ocupam uma fração expressiva dos solos da bacia, sendo constituídos de Planossolos Hidromórficos Eutróficos arenico e de Planossolos Hidromórficos Eutróficos flúvico solódico. Os

solos da área de estudo classificam-se como Planossolos Hidromórficos Eutróficos arenico [11]. Esse tipo de solo apresenta textura arenosa a argilosa, horizonte A moderado, argila de atividade alta, presença de camadas adensadas em subsuperfície e baixa vulnerabilidade.

Os aquíferos subterrâneos dessa bacia hidrográfica estão relacionados tanto a rochas pré cambrianas quanto a sequências quaternárias, sendo classificados como aquíferos fraturados e intergranulares. No local da barragem subterrânea pesquisada predominam os aquíferos fissurais, intensamente fraturados e baixo potencial hídrico [12]. Ela foi implantada na microbacia do córrego Fundo, afluente do rio Papicu, em linhas de drenagem secundária.

3.1.2 *Caracterização Climática*

Golfari [13], utilizando a classificação de Thornthwaite e Mather [14], classificou o clima da região com tropical sub-úmido seco. Freitas [1]) realizou um estudo detalhado da pluviometria e das temperaturas, ocorridas na Estação Meteorológica de Iguaba Grande de um período de 30 anos. Constatou que as temperaturas variam de 21°C a 27°C, sendo 23,7°C a temperatura média, que a precipitação média mensal é de 76,7 mm, totalizando 920 mm anuais, alcançando o valor médio mínimo em agosto, de 39,3 mm e o médio máximo em novembro, de 111,1 mm. Ao analisar os dados de chuvas de cada ano da série histórica, verificou forte irregularidade na precipitação, afetando não só os totais anuais, que apresentaram anomalias positivas e negativas de até 50%, como também em relação a época e duração do período seco, em cada ano analisado. Ao avaliar esses dados pelo critério de Gausen verificou a predominância de anos com 60 dias secos consecutivos e uma frequência relativamente alta de anos com 90 dias consecutivos de seca.

Essa pesquisadora também constatou que a evapotranspiração potencial (ETP) é de 1244,0 mm/ano, situando-se em valor muito acima do encontrado para a precipitação média anual. O elevado déficit hídrico desse local pode ser melhor visualizado através da representação gráfica do balanço hídrico [14], ilustrado na figura 1, elaborada com os dados climáticos normais da citada estação meteorológica e aplicada a planilha em Excel desenvolvida por Rolim e Sentelhas [15].

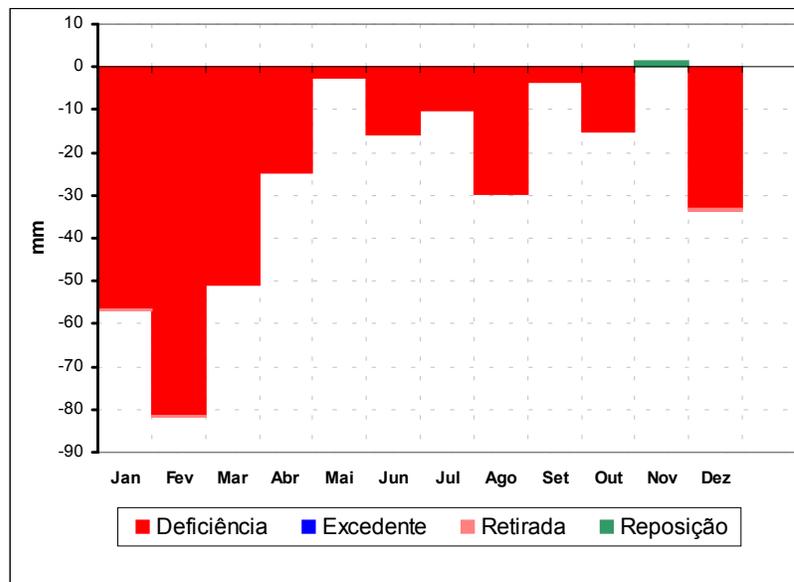


Figura 1 – Balanço hídrico da estação meteorológica de Iguaba Grande (1970-1999).

3.2 Caracterização do Projeto

A característica da bacia de contribuição da barragem, com área pequena, e o funcionamento da mesma, permitiram o desenvolvimento de uma visão integrada do processo de captação e utilização de água superficial, subsuperficial e subterrânea, nas condições edafoclimáticas e fisiográficas locais.

O uso de Sistema de Informação Geográfica-SIG para tratamento dos dados geodésicos, adquiridos com auxílio de GPS, permitiu uma visualização ampla da área afetada pela barragem subterrânea, a definição precisa da área da bacia de contribuição e a caracterização detalhada da mesma em mapeamento topográfico digital do IBGE. A partir da avaliação dos dados dos poços de observação e pontos de sondagem no mapa topográfico digital localizou-se hidrograficamente a barragem, ajustou-se melhor os contornos do aquífero barrado, calcularam-se as áreas da bacia hidráulica e de contribuição, definiu-se o perímetro com água superficial e determinou-se a declividade da bacia de contribuição. A visualização espacial da área em SIG possibilitou a realização de ajustes no projeto, com a inclusão de alguns novos poços/pontos de observação.

A barragem pesquisada localiza-se na microbacia hidrográfica do córrego/rio Fundo que é integrante da parte alta da bacia do rio Una, situando-se nas coordenadas UTM 7476338 W e 784795 S. Essa microbacia tem aproximadamente 147 hectares, apresenta em média 1,6 % de declividade, sendo o córrego Fundo de 4ª ordem e o rio Fundo um rio de 1ª ordem. O projeto da barragem subterrânea está instalado em linhas de drenagem de fluxo secundário em relação ao principal, constituído da nascente do rio Fundo.

A barragem subterrânea tem 95 metros de comprimento, 1,5 metros de profundidade e é de modelo desenvolvido pela EMBRAPA-CPTSA [16]). Esse modelo é de fácil construção e de baixo custo por ser composto por septo impermeável constituído de lona de polietileno e vertedor de concreto [17]. Apresenta vertedor com 2,5 metros de largura por 7,5 metros de comprimento, com vertedor livre, soleira espessa e 50 cm de altura. O aproveitamento da água armazenada na barragem é feito através de bombeamento em poço tipo cacimba, situado 30 m a montante do vertedor, utilizado para a irrigação em agricultura familiar. Nele foi avaliada a vazão de bombeamento, a de reposição de água e o potencial hidráulico.

Essa barragem subterrânea, ilustrada na Figura 2, foi construída em solo pouco profundo, com 1,0 a 1,5 metros de profundidade até a camada de impedimento, onde está afixada a lona de contenção de água da barragem. A topografia é levemente ondulada, com declividade variando de 1,2% na lateral direita, 1,7% na lateral esquerda, 0,5% no talvegue para a direção a montante e 1,6% na direção do vertedor para as laterais, direita e esquerda da barragem.



Figura 2 - Vista da barragem subterrânea destacando-se o vertedor.

Devido às condições fisiográficas locais a barragem apresentou características de barragem mista, com escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo, visualizado na foto da Figura 2. O acúmulo de água superficial próximo ao vertedor e ao longo de parte do talvegue, mantendo uma lâmina de água rasa em boa parte do ano, definiu características de brejo a esta região da bacia hidráulica. Nela houve o desenvolvimento de vegetação típica de ecossistemas aquáticos, com a presença constante de plantas dos gêneros *Typha* e *Nymphaea*, vulgarmente conhecidas como taboa e nenúfar, respectivamente. A parte do solo não saturado da bacia hidráulica bem como algumas

áreas da bacia de contribuição passaram a ser aproveitadas com lavouras de subsistência, após a implantação da barragem subterrânea, visualizado na figura 3.

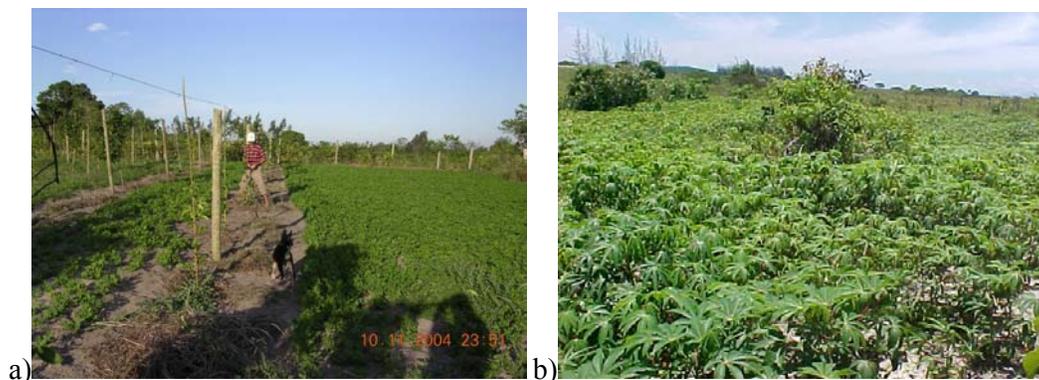


Figura 3 - Lavouras sob influência da barragem subterrânea: (a) maracujá irrigado, consorciado com amendoim; (b) aipim não irrigado plantado na área da bacia hidráulica.

3.3 Caracterização das Vazões

3.3.1 Escoamento Superficial

A vazão média mensal no vertedor foi calculada a partir dos dados obtidos em medições linimétricas feitas diariamente na região de acúmulo superficial de água, a montante, próximo ao vertedor (Fig. 4c). Aos valores de altura de água no vertedor, foi aplicada a fórmula de Barlofetti [9], calculadas as vazões e montados gráficos. Estes dados de vazão serviram para avaliar a ordem de grandeza das vazões que verteram no vertedor durante o ano 2005. Na Figura 4a e 4b visualiza-se o vertedor e a lâmina de água vertente em duas datas, uma em período seco (14/09/2005) e outra em período chuvoso (19/12/2005). A partir de medições periódicas de largura da soleira no ano 2005, estimou-se a mesma em 1 metro de largura.

No gráfico da figura 5 verifica-se a vazão real ocorrida em cada dia do ano 2005. Nota-se que existem períodos sem água vertendo no vertedor e outras fases de vazão considerável. Os períodos mais longos de ausência de água vertendo no vertedor corresponderam a 24 e 25 dias nos meses de junho e outubro. O gráfico da figura 6 expõe o comportamento das vazões médias mensais no vertedor, ao longo do citado ano. Verifica-se que as mesmas atingem valores mínimos no mês de junho, correspondente a 0,3 l/s e máxima em julho, com quase 1,7 l/s.



Figura 4 - Vertedor e lâmina d'água em duas datas: período seco (a), período chuvoso (b) e detalhe do linímetro (c).

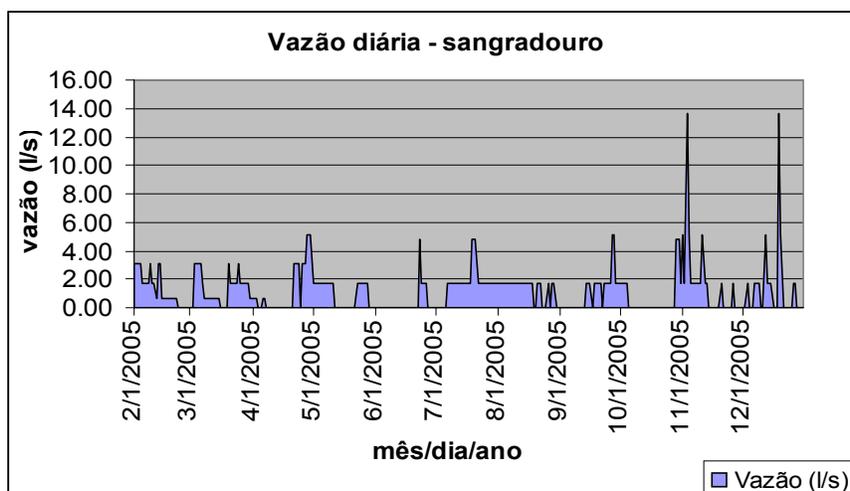


Figura 5 – Vazões medidas diariamente no vertedor.

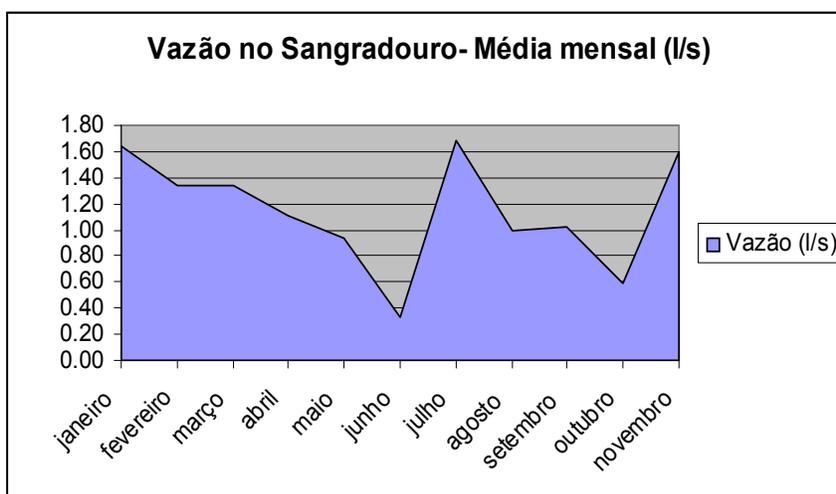


Figura 6 - Vazão média mensal no vertedor, no ano 2005.

3.3.2 Armazenamento Subterrâneo

A avaliação da água armazenada no aquífero barrado foi feita em pontos de amostragem determinados de acordo com as condições locais. Os pontos de amostragem foram marcados em locais situados no talvegue e em paralelas a este, traçados a partir das extremidades da barragem e do vertedor. Ao todo foram coletadas amostras em 11 pontos representativos, localizados na região da bacia hidráulica da barragem subterrânea. A determinação do número de pontos de sondagem de solo baseou-se no valor recomendado para amostragem de solo e também nas condições do solo da bacia hidráulica no momento da coleta.

Os parâmetros físicos do solo foram determinados em análises laboratoriais feitas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em amostras deformadas de solo, coletadas em camadas de 20 cm, com trado tipo holandês, iniciando a amostragem na camada superficial do solo e indo até o atingir a camada de 1,20 m de profundidade. Ao alcançar a camada de solo saturado, a consistência do solo não permitiu a continuidade da amostragem, pois o mesmo escorregava do trado. Nestas amostras foram feitas análises granulométricas pelo método da dispersão total e a determinação da densidade das partículas pelo método do balão volumétrico. Com esses valores determinou-se a porosidade total e estimou-se o coeficiente de armazenamento do solo.

Os valores médios das propriedades físicas do solo, na região da bacia hidráulica, estão discriminados na tabela 5. Verifica-se granulometria predominantemente arenosa, contendo 83,47% de areia, classificando-se o solo como areia franca. Apresenta em média, porosidade total de 41,00 %, densidade do solo de 1.518 g/cm³ e das partículas de 2.57 g/cm³.

Tabela 1 – Características físicas do solo na bacia hidráulica da barragem subterrânea.

Profundidade (cm)	Dens. solo g/cm ³	Dens. part. g/cm ³	Por. Total %	Granulometria média (%)		
				Areia	Argila	Silte
0 – 20	1.473	2.60	43.33	83.20	8.66	8.08
20 – 40	1.523	2.59	41.18	82.42	9.53	8.05
40 – 60	1.477	2.59	42.99	81.45	11.65	6.90
60 – 80	1.593	2.52	36.77	83.16	11.34	5.51
80 - 100	1.500	2.57	41.63	84.38	9.57	6.05
100 -120	1.540	2.57	40.08	86.19	9.15	4.66
Média	1.518	2.57	41.00	83.47	9.98	6.54

O teste de bombeamento feito no poço tipo cacimba apresentou vazão de extração média de equilíbrio de 0,37 litros/segundo ou 32m³/dia. O teste de vazão feito com base no tempo de reposição de água no poço teve resultado de 0,36 l/s, atingindo valor bem próximo ao obtido no teste de extração. Esses valores de vazão no poço cacimba sofreram influência da água superficial

acumulada no talvegue, local onde o poço está situado, visualizado na foto da figura 7. O processo de entrada de água superficial para dentro do poço foi verificado durante as medições de vazão, parecendo bicas de entrada de água, situadas entre os tijolos do revestimento. Por essa razão avalia-se que os valores de vazão no poço cacimba provavelmente estão exacerbados pela existência de fluxo superficial para dentro do poço.



Figura 7 - Região à montante da barragem destacando-se o poço cacimba e o vertedor.

Os valores de condutividade hidráulica do solo da bacia hidráulica foram estimados em slug tests realizados em 7 poços de observação construídos na bacia hidráulica da barragem subterrânea, com filtro situado na camada saturada do solo, em profundidades variáveis.

Um dos poços de observação foi construído com o objetivo de determinação da condutividade hidráulica da camada impermeável. Esse poço, identificado como poço 8, foi perfurado até a profundidade de 1,50 metros, ponto onde a camada do solo de permeabilidade próxima ao impedimento foi atingida.

A condutividade hidráulica do solo da bacia hidráulica foi estimada nos poços de observação, pelo método de Hvorslev e estão detalhados na tabela 10. Os resultados, típicos de solos arenosos [18]), com condutividade hidráulica média da ordem de grandeza de 10^{-3} cm/seg, apresentaram valores compatíveis com a granulometria da camada de solo encontrada nesses poços.

O poço 0, situado no talvegue próximo ao centro da área da bacia hidráulica, foi o único em que a condutividade hidráulica não correspondeu exatamente a granulometria esperada, já que apresentou percentuais de areias inferiores a 70% e de argila superiores a 15%, classificando-se como de textura média. Ressalta-se que sua condutividade hidráulica é típica de solo arenoso. Acredita-se que esse dado, aparentemente incoerente com a granulometria, tenha acontecido devido

à dificuldade de amostragem de solo nas regiões saturadas. Por outro lado, verifica-se que no poço 7, também situado no talvegue, há redução nos valores de condutividade, caracterizando redução do fluxo de água subterrânea nessa camada do solo.

Tabela 2 – Condutividade hidráulica e granulometria nos poços de observação.

Descrição	Profundidade slug test (cm)	Granulometria (%)			Condutividade Hidráulica (cm/s)
		Areia	Silte	Argila	
Poço 0	25 - 35	68	12	20	1.53E-02
Poço 1	35-45	92	8	0	5.15E-03
Poço 3	65 -75	87	9	4	1.14E-03
Poço 5	75 – 85	78	9	13	2.00E-03
Poço 6	80 – 90	88	5	7	1.55E-03
Poço 7	35 – 45	58	13	29	1.72E-04
Poço 8	148	66	2	32	3.07E-05
Média*	Poços 0,1,3,5,6,7	79	9	12	4.21E-03

* Valores médios calculados com base nos poços 0, 1, 3, 5, 6 e 7. O poço 8 foi excluído por referir-se a condutividade hidráulica da camada impermeável.

No poço 8, construído para avaliar a condutividade hidráulica da camada de impedimento, a condutividade alcançou valores da ordem de 10^{-5} cm/s, sendo compatível com siltes e loes [6]. Segundo Smodema & Ricroft [19] solos com valor de condutividade hidráulica iguais a este, que equivalem a 0,026 metros/dia, são considerados de muito baixa permeabilidade e característicos de argilas de estrutura deficiente. Esses dados sugerem estar a 1,5 metros de profundidade a camada de solo impermeável. Essa hipótese é confirmada pelos resultados das sondagens do solo e os dados técnicos da barragem, que foi afixada na camada de impedimento situada a 1,5 metros de profundidade, onde verificou-se a presença de lençol freático antes da construção da barragem.

3.4 Modelagem do Aquífero Subterrâneo Barrado

Devido a irregularidade da precipitação na região pesquisada, discutida no item 3.1.2 e os dados de vazão medidos no vertedor, apresentados no item 3.3.1, optou-se por fazer a modelagem considerando aquífero transiente, com recarga igual a 0, para simular as condições encontradas em períodos de seca. Considerando que o consumo da água armazenada no lençol freático barrado só ocorre quando não existe escoamento superficial, elaborou-se a modelagem de fluxo subterrâneo apenas para os períodos sem água vertendo no vertedor. Foi escolhido o período de 30 dias por corresponder aproximadamente ao tempo máximo sem água no vertedor no ano 2005 e ser igual a 1 mês, considerado como módulo mínimo para justificar a implantação de uma barragem subterrânea.

Desprezou-se o caráter superficial da água existente próxima ao vertedor e em parte do talvegue (Fig. 2), caracterizando-a como parte do aquífero subterrâneo. Optou-se por agir dessa forma devida a pequena área ocupada por essa água frente ao total da área da bacia hidráulica, de 1,2 hectares e também por estar sendo dado tratamento específico ao escoamento superficial no item 3.3.1.

A bacia hidráulica da barragem subterrânea foi detalhadamente analisada através da interpolação de dados relativos às dimensões da bacia hidráulica, localização geográfica dos poços de observação e associação ao nível da água nos poços e a profundidade da camada de impedimento. A conformação do modelo obedeceu às condições superficiais do solo e do lençol freático avaliadas nas visitas, no levantamento planialtimétrico dos poços de observação e em sondagens de campo. Para fins de simulação com o MODFLOW, o solo predominantemente arenoso foi considerado homogêneo, de pouca profundidade, com no máximo 1,5 metros de profundidade e uma única layer. A entrada de dados do MODFLOW foi feita através do uso das coordenadas UTM de pontos de sondagens, distribuídos no domínio do aquífero estudado. A partir desses dados foram estimados os potenciais iniciais em cada célula do domínio e também estabelecidos os potenciais de fluxo controlado nas células do contorno, através da interpolação com os valores calculados nos poços de observação.

Na barragem subterrânea o potencial total de água no solo ou carga hidráulica é igual ao potencial gravitacional, que corresponde às cotas da superfície freática em cada ponto do solo. A superfície móvel formada pelas cotas do nível estático da água do solo, em várias épocas do ano, descreve o potencial total da água no solo, ao longo do ano, sendo também o contorno físico superior do aquífero barrado [20]. Na face superior do aquífero definiu-se condição de contorno de carga específica, de acordo com as cargas hidráulicas medidas nos poços de monitoramento. As cotas foram medidas no dia 14/11/2005, data em que o nível da água no vertedor correspondia ao nível 0, sem água vertendo e com máxima carga de água armazenada na barragem subterrânea.

Os dados de entrada para a modelagem foram obtidos na planta planialtimétrica da área georeferenciada, nas condições de contorno estabelecidas, nas características da recarga e da extração do poço tipo cacimba e na discretização do domínio, feito inicialmente em malha regular de 5 em 5 metros, a fim de caracterizar um domínio com 100 x 100 metros. Para a criação do GRID final foram utilizados os valores extremos das coordenadas geográficas X e Y, medidas com GPS em UTM e das cotas da superfície do terreno e da camada de impedimento discriminados, tendo 26 colunas e 20 linhas. As condições de contorno foram definidas como fluxo zero na parede da barragem e na face inferior da bacia hidráulica (camada de impedimento).

As elevações da superfície do solo, da camada de impedimento e do lençol freático foram medidas em metros, a partir de um único datum, escolhido como referência, o datum de 25 metros,

correspondente ao nível 0 de água no vertedor. Os pontos de controle e a definição das condições de contorno da bacia hidráulica estão especificadas no quadro 1.

Quadro 1 – Contornos da bacia hidráulica da barragem subterrânea.

Poço/Ponto	Coordenadas UTM (m)		Cota (metros)		
	X	Y	Solo	Impermeável	Freático
0	784668	7476373	25.23	24.53	24.96
1	784748	7476374	25.27	24.27	25.04
2	784716	7476385	26.09	24.79	25.48
3	784686	7476398	26.21	24.74	25.56
4	784659	7476344	25.66	24.56	25.12
5	784667	7476326	25.83	24.78	25.22
6	784627	7476342	26.68	25.38	25.96
7	784650	7476361	25.32	24.72	25.11
8	784698	7476393	25.69	24.22	25.64
9	784736	7476400	26.62	25.32	25.83
10	784662	7476410	26.50	25.20	25.87
Cacimba	784695	7476368	24.62	23.57	25.01
NA Bar.	784705	7476338	25.00	23.50	25.00

As cargas hidráulicas medidas nos poços foram irradiadas para as células em volta, obedecendo a fisionomia geral da superfície do terreno estabelecendo-se os potenciais iniciais e de contorno em cada célula do domínio. No quadro 2 estão discriminados os valores adotados para os parâmetros físicos do solo da bacia hidráulica, para fins de modelagem do aquífero.

Quadro 2 – Parâmetros físicos do solo adotados na simulação.

Discriminação	Unidade	Valor adotado
• Porosidade total	%	40
• Porosidade efetiva	%	23
• Coeficiente de armazenamento	%	20
• Condutividade hidráulica	cm/s	4.21E-03

Para avaliar a qualidade do modelo numérico foi verificada a consistência, a convergência e a estabilidade dos resultados, fornecidos pelo programa através de gráficos, tabelas, mapas e animações. A partir dos resultados de saída do programa foi feito um ajuste na vazão de extração do poço, iniciando-se com o valor calculado no item 3.3.2, de 32 m³/dia, correspondente a vazão de equilíbrio mista, isto é, subterrânea e superficial. Os valores de vazão foram reduzidos até que o poço não seque mais, de acordo com a simulação do programa. A vazão máxima de extração

sustentável desse aquífero subterrâneo, simulada em ponto de extração único, no poço tipo cacimba, foi de 5 m³/dia, em um período de estresse de 30 dias, sem recarga (Tabela 3).

O resultado da modelagem do aquífero barrado, com baixa vazão de extração de água subterrânea e por curto período, indica a limitação da capacidade de suporte da obra, que não apresenta grande potencial hídrico subterrâneo. Para melhorar a capacidade hidráulica da barragem poderiam ser estudadas modificações no tempo, nos pontos de extração e nos valores de vazão. Entretanto, os valores obtidos no balanço IN-OUT do MODFLOW são muito baixos, concluindo-se que essas alterações não trariam modificações expressivas na vazão máxima de extração sustentável do lençol subterrâneo, calculada pelo programa.

A figura 8 ilustra o funcionamento da barragem quando submetida à vazão de extração de 5m³ diariamente, por 30 dias. Nessa figura visualiza-se a barragem, as linhas equipotenciais, variando de 24,8 a 25,8 m e as linhas de fluxo de água, convergindo para o vertedor, demonstrando que o modelo foi bem calibrado. Esse fato foi confirmado pelo baixo valor de discrepância apresentado nos dados de saída do programa, de 0% cumulativamente e de 0,01% diariamente.

Tabela 3 – Balanço de massa do MODFLOW

Descrição	Cumulativo		Diário	
	IN	OUT	IN	OUT
• Armazenamento (m ³)	306,12	205,72	2,61	0,81
• Potencial hidráulico (m)	257,99	208,38	8,60	5,41
• Poços (m ³ /dia)	0,00	150,00	0,00	5,00
• Total	564,1100	564,1051	11,2139	11,2134
• BALANÇO IN-OUT	0,004883		0,000580	
• Discrepância (%)	0,000000		0,010000	

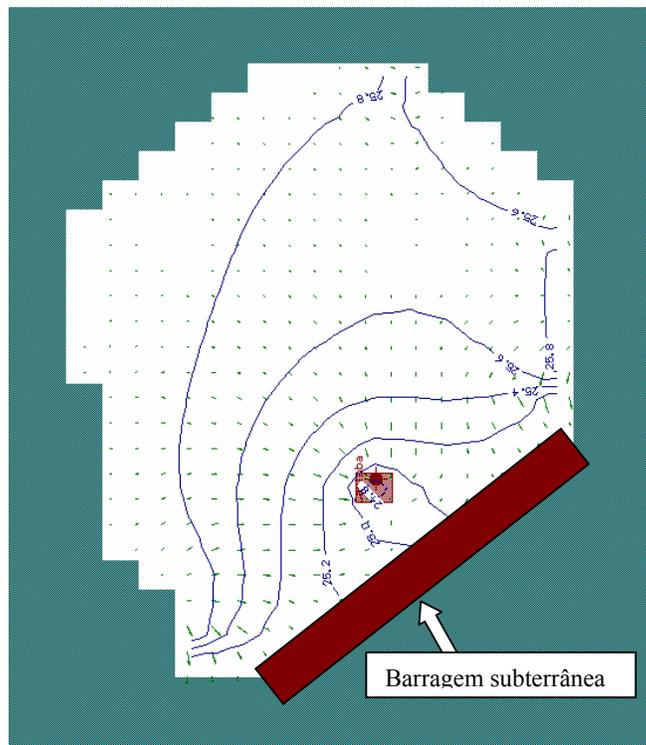


FIGURA 8 - Poço, linhas de fluxo e equipotencias (MOFLOW).

4. CONCLUSÕES

Quando o fluxo natural de água na superfície e sub superfície do solo é interceptado pela instalação da barragem subterrânea, a água da chuva passa primeiro a acumular-se a montante da barragem, para posteriormente verter no vertedor, após o enchimento da bacia hidráulica. A redução da velocidade de escoamento da água proporcionado pelo barramento subterrâneo possibilita o armazenamento da água da chuva proveniente de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Essa água, normalmente escoaria rapidamente para regiões mais baixas da bacia hidrográfica, logo após a chuva.

A vazão do aquífero subterrâneo encontrada é baixa mostrando que essa tecnologia, nas condições do local onde foi implantada, não fornece grande volume de água oriunda de aquífero subterrâneo. A vazão de extração de equilíbrio do poço tipo cacimba, quando sob condições de aporte de água superficial e subterrânea, é de 32 m³/dia, alcançando valor seis vezes superior aquele obtido de fluxo unicamente subterrâneo, ampliando bastante o potencial hidráulico da barragem subterrânea pesquisada. Por outro lado a vazão que passa diariamente no vertedor em grande parte do ano, em média 1,2 litros/segundo, alcança valores significativos em relação a capacidade de armazenamento da barragem subterrânea.

A barragem subterrânea comportou-se como um reservatório que pode armazenar água superficial e subterrânea. Pode fornecer água para irrigação das lavouras durante grande parte do ano, promovendo também um aumento da região úmida do solo na área da bacia hidráulica da barragem. Enquanto existir escoamento superficial no vertedor podem ser extraídos cerca de 32 m³ de água diariamente no poço cacimba. Em período de seca prolongada, após cessar o escoamento no vertedor, o agricultor contará com 5 m³ de água/dia, por um período de 30 dias, segundo os resultados da simulação. Para a agricultor familiar, que convive com as irregularidades climáticas, deixando de produzir e de investir em tecnologia agrícola, a barragem subterrânea pode representar uma modificação expressiva, exercendo um importante papel como moderadora dos efeitos da falta de chuvas.

O programa MODFLOW mostrou ser uma ferramenta adequada a modelagem do aquífero subterrâneo contido pela barragem, permitindo uma visão clara das potencialidades e limitações do uso desta tecnologia. Sua associação ao uso de Sistema de Posicionamento Global (GPS) e ao Sistema de Informação Geográfica, representou um grande avanço em relação ao entendimento dos sistemas hidrológicos, viabilizando avaliações mais precisas sobre a interligação dos corpos hídricos integrantes de uma bacia hidrográfica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FREITAS, I. M.; BOHRER, C. B. A. & OLIVEIRA, J. L. F. O clima do município de Iguaba Grande (RJ): características, vegetação natural e agricultura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA E APLICADA, 11., 2005. São Paulo. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física e Aplicada. São Paulo: USP, 2005.
- [2] CAVALCANTI, M. A. M. P. A modelagem matemática associada ao sistema de informação geográfica como instrumento de previsão no estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios. 2002. 188 f. Tese (doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. São Paulo.
- [3] MAC DONALD, M. G. & HARBAUGH, A. W. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. Washington: U. S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, 1988. 586 p.
- [4] MELIANDE, P. Gestão de Recursos Hídricos – Modelagem computacional para análise do potencial hídrico subterrâneo com o emprego do software modflow. Dissertação (mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2003. 116 f.
- [5] NASCIMENTO, E. A. modelagem matemática do fluxo subterrâneo. 1998. 125 f. Tese (doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.
- [6] FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A.; Groundwater Prentice-Hall International. New Jersey: Englewood Cliffs, 1979. 604 p.

- [7] MONTENEGRO, S. M. G. L. & MONTENEGRO, A. A. A. Aproveitamento Sustentável de Aquíferos Aluviais no Semi-Árido. In: CABRAL, J. J. S. P.; FERREIRA, J. P. C. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L. & COSTA, W. D. (Orgs.) Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. Recife: UFPE, 2004. cap. 2, p.61-126.
- [8] BALLOFFET, A.;GOTELLI, L. M. & MEOLI, G. A. Hidráulica. Buenos Aires: Ediar S.A., 1952. 2 v.
- [9] CONSÓRCIO LAGOS SÃO JOÃO (banco de dados). Regiões e Bacias Hidrográficas. Região hidrográfica da bacia do Rio Una e do Cabo de Búzios. Rio de Janeiro: CISJL, 2004. Disponível em: <<http://www.riolagos.com.br/cilsj/>>. Acesso em: 26 jun. 2004.
- [10] REDE DE GEOTECNOLOGIA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Caracterização Hidrogeológica Básica dos Municípios de São Pedro da Aldeia e Iguaba Grande. In: PROJETO ReSuB LAGOS. Rio de Janeiro: UFF, 2001. 50 p.
- [11] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Mapa de Solos e de Vulnerabilidade da Região dos Lagos. [S.1.], 1 mapa, col. Escala 1:100.000. Disponível em: <http://mapserver.cnps.embrapa.br/website/pub/Regiao_Lagos/viewer.htm>. Acesso em: 20 jun. 2004.
- [12] REDE DE GEOTECNOLOGIA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Carta de Unidades Hidrogeológicas de São Pedro da Aldeia e Iguaba Grande. Rio de Janeiro. UFF, 2000. 1 mapa, col. Escala 1 : 50.000. 1 CD-ROM.
- [13] GOLFARI, L. Zoneamento Bioclimático do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, BD – RIO: 1980. 1 mapa, color., 114 cm x 82 cm. Escala 1 : 400.000.
- [14] THORNRHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The Water Balance. Publications in Climatology. New Jersey: Certeton, 1955.
- [15] ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCELTM para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, n.1,p. 133-137, 1998.
- [16] SILVA, M.S.P. da; LOPES, P.R.C.; ANJOS, J.B. dos; SILVA, A. de S.; BRITO, L.T. de L.; PORTO, E.R. Exploração agrícola em barragem subterrânea. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.33, n.6, p.975-980, jun.1998.
- [17] BRITO, L.T.L.; SILVA, D.A.; CAVALCANTI, N.B.; ANJOS, J.B. & REGO, M.M. Alternativa Tecnológica para Aumentar a Disponibilidade de Água no Semi-Árido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.1, p. 111-115, 1999.
- [18] CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1972. v. 1, cap. 8, 215 p., p. 69-83.
- [19] SMEDEMA, L. K. & RYCROFT, D. W. Introduction - Water in the soil. In: SMODEMA, L. K. & RYCROFT, D. W. Land Drainage - Planning and design of agriculture drainage systems. London: BT Batsford Ltd, 1983. cap. 1, p. 15-44.

[20] CLEARY, R. Águas Subterrâneas. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; NOVA, N. A. V.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C. & CLEARY, R. Engenharia Hidrológica. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. cap. 5, p. 293-404. (Coleção ABRH de recursos hídricos, 2)