



BALANÇO HÍDRICO DO SISTEMA AQUIFERO BARREIRAS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PITIMBU-RN

WATER BALANCE OF BARREIRAS AQUIFER SYSTEM IN PITIMBU
RIVER WATERSHED - RN

Antonio Marozzi Righetto¹; Duany Fernandes Dias²

Artigo recebido em: 07/04/2016 e aceito para publicação em: 02/09/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i3.28620>

Resumo: Este trabalho objetiva avaliar o balanço hídrico nos compartimentos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu, RN (BHRP), de importância para o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos disponíveis. A BHRP possui superfície de 131,67 Km², composta por parcelas dos municípios de Macaíba, Natal e Parnamirim, integrantes da Região Metropolitana de Natal (RMN). Para a modelagem hidrogeológica foi utilizado o aplicativo MODFLOW com cinco camadas e com domínio envolvendo toda a BHRP, considerando os cursos de água, reservatórios e poços de exploração. São apresentados detalhes da modelagem e descritos os principais dados levantados, resultados do balanço hídrico assim como simulações da resposta do aquífero frente às explorações atuais e futuras. Com o balanço hídrico por compartimento, tornou-se possível reconhecer áreas de transferência de água entre compartimentos, do aquífero para o rio e vice-versa e regiões críticas quanto às explorações e decaimento da superfície potenciométrica.

Palavras-chave: Modelagem Hidrogeológica. MODFLOW. Explorações. Domínio tridimensional.

Abstract: This study aims to carry out the water balance in the aquifer compartment of the Pitimbu Watershed (BHRP) of great importance to the sustainable use of available water resources.. The BHRP has surface of 131.67 square kilometers, consisting of parts of Macaíba, Natal and Parnamirim municipalities - Natal Metropolitan Region (NMR). For hydrogeological modeling, MODFLOW software with five layers was applied to BHRP domain, including watercourse, superficial reservoirs and exploitation wells. Main data and details of modeling are presented as well as described water balance results and aquifer response simulation to current and future exploitation. The water balance by compartment permitted to recognize areas of aquifer water transfer to the river and vice versa and critical regions of exploitations and depletion of potentiometric surface.

Keywords: Hydrogeological Modeling. MODFLOW. Exploitations. Tridimensional domain.

1 INTRODUÇÃO

Na região metropolitana de Natal, a Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP) assume importância estratégica, pois, água é captada diretamente da calha do rio para abastecer cerca de 30% da população, com vazão de 2600 m³/h. Ademais, toda a região da BHRP é abastecida por poços de exploração. No entanto, essa importância contrasta com a realidade local no que se refere ao uso e ocu-

pação do solo, potencializando os riscos de degradação da qualidade do ecossistema e da água (RIGHETTO & ROCHA, 2005).

Desde os anos 70, uma extensa rede de poços profundos vem sendo utilizada para o abastecimento local, com retorno da água servida para o próprio aquífero. Nos últimos anos, a contaminação da água bombeada por nitrato gerou aumento na demanda pela água superficial proveniente do rio Pitimbu, com o objetivo de melhorar o nível de potabilidade

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária (UFRN) - E-mail: righetto@ct.ufrn.br

2 Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Físico, especialista em modelos computacionais e aplicativos computacionais. (UFRN). E-mail: duferdias@facebook.com

da água de consumo. Um sistema hídrico de excelente qualidade se tornou vulnerável tanto pela crescente demanda quanto pela redução da qualidade das águas.

Estudos regulares vêm sendo desenvolvidos na BHRP que passou a ser considerada como bacia representativa periurbana. Dentre os estudos realizados destacam-se trabalhos ambientais (BORGES, 2002), hidrológicos (SENA, 2008); hidrogeológicos (ALVES et al., 2016), de uso e ocupação da bacia (RIGHETTO & VANÂNCIO, 2016).

Recentemente, com a efetivação do projeto de coleta do esgoto da cidade, o reuso das águas servidas através das fossas e sumidouros tende a se extinguir, melhorando de um lado a qualidade das águas subterrâneas e de outro, levando ao rebaixamento do nível potenciométrico do aquífero, com comprometimento de consumo no aspecto de disponibilidade hídrica. Evidentemente, recuperar a qualidade da água subterrânea de Natal é o objetivo desejado, dentro de limites de utilização dessas águas.

Assim, a BHRP torna-se um importante sistema hídrico a ser cada vez mais estudado, com levantamentos em campo aprimorados e o desenvolvimento de modelagem que permita sintetizar as informações observadas e simular situações previsíveis dentro das incertezas naturais da hidrologia, da hidrogeologia e do uso e ocupação da bacia.

Estudos hidrogeológicos na BHRP vem sendo desenvolvidos desde a década de 1990, porém sempre através de investigação em campo e avaliações pontuais das principais variáveis e parâmetros. Pelo fato de grande parte do abastecimento da região ocorrer através de poços de exploração, há um número expressivo de informações hidrogeológicas que permite desenvolver estudos regionais e locais. Mais recentemente, a Agência Nacional de Águas elaborou um estudo de modelagem para toda a região metropolitana de Natal, com informações extremamente úteis para a gestão hidrogeológica (ANA, 2012).

Pela importância da BHRP para o abastecimento de água da região e por considerá-

la uma bacia representativa periurbana da região litorânea nordestina, este trabalho foi desenvolvido no sentido de aprimorar as informações hidrogeológicas da bacia, com a modelagem suficientemente detalhada para se conseguir informações confiáveis com relação à disponibilidade hídrica, as interações entre os compartimentos superficiais e subterrâneos e permitir simular situações diversas de explorações em diferentes áreas da BHRP.

2 ÁREA DE ESTUDO

A BHRP é uma das três sub-bacias pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi, RN. Conforme a distribuição territorial das sub-bacias, com base em seus divisores topográficos, a BHRP apresenta uma superfície de 131,67 km² formada por parcelas dos municípios de Macaíba, Natal e Parnamirim, integrantes da Região Metropolitana de Natal (RMN), cujo rio em sua extensão, percorre 33 km e desagua no Rio Taborda, a jusante da Lagoa do Jiquí, importante manancial superficial da cidade de Natal, RN (Figura 1).

Segundo a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SERHID, 2006), a geologia da BHRP apresenta estratigrafia da base para o topo, constituída por rochas cristalinas pré-cambrianas, sobrepostas por sedimentos areníticos do Cretáceo, seguindo da Formação Barreiras, Dunas e Aluviões.

O Sistema Aquífero Barreiras (SAB) comporta-se em geral como livre. Todavia, localmente desenvolve condições de semiconfinamento. Segundo Melo & Figueiredo (1990), a espessura do SAB atinge 90 m e 40 m de espessura saturada média efetiva. Nesse mesmo estudo foram obtidos os seguintes parâmetros para o sistema na porção sul de Natal: condutividade hidráulica (K) variando de 7,34 m/dia a 11,23 m/dia, transmissividade (T) de 267,84 m²/dia a 1036,80 m²/dia e porosidade efetiva (η_e) de 10%.

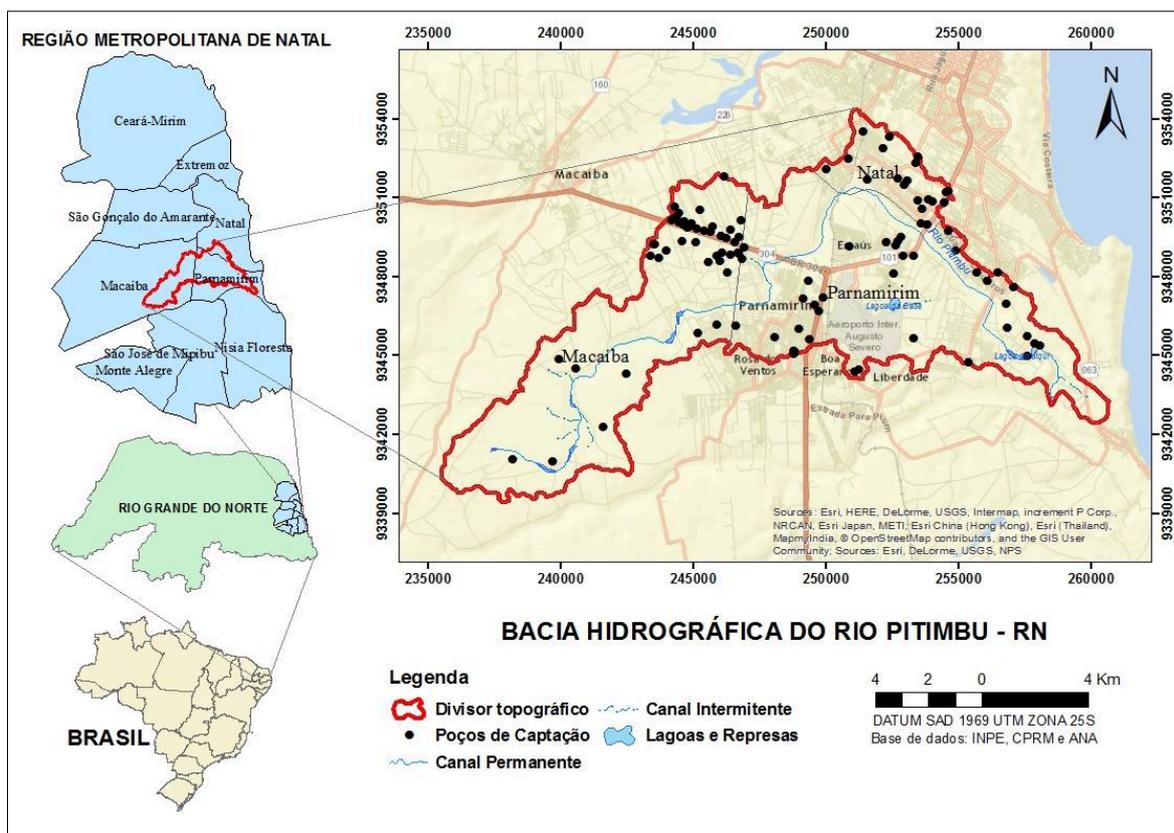


Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográica do Rio Pitimbu (BHRP), RN

Figure 1- Location map of Pitimbu River Watershed (BHRP), RN

A principal zona de recarga do SAB na BHRP localiza-se na região da cidade de Parnamirim. Esta zona inclui o “binômio” Rio Pitimbu –Taborda/Pirangi, a lagoa do Jiquí e a região do Baixo Pitimbu. Estudo recente sobre valores de recarga e explorações nessa região é apresentado em Alves *et al.* (2016). Nesse estudo, obtiveram para a espessura saturada do Sistema Aquífero Barreiras valores entre 15,47 a 56,5 m (com média de 32,45 m), transmissividade média de 510 m²/dia, condutividade hidráulica média de 24,4 m/dia e porosidade efetiva média de 15%. A recarga foi estimada em 253 mm/ano.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

O modelo numérico para a BHRP segue as equações que regem o fluxo subterrâneo, mais especificamente a equação fundamental de fluxo, a qual é obtida combinando a equação de conservação de energia com a equação da Lei de Darcy (FREEZE & CHERRY, 1979). O SAB na BHRP foi considerado como

um meio heterogêneo e anisotrópico.

As condições iniciais e de contorno atribuídas à equação fundamental representa a percolação da água em meio poroso saturado, são os valores numéricos dos contornos naturais que possuem relação com o sistema aquífero, tais como: rios, lagos, represas, níveis da água nos poços de observação (FEITOSA & FILHO 1997).

Neste trabalho, o sistema aquífero é representado pelo código modular tridimensional MODFLOW que resolve a equação diferencial através do método das Diferenças Finitas. Este método consiste na discretização do meio físico contínuo e na discretização temporal da equação fundamental em células ou blocos finitos representados por pontos discretos denominados nós. A quantidade e a posição dos pontos são escolhidas de forma que cada nó representará uma porção do aquífero a ser modelada. Foi utilizado o software Visual MODFLOW® Classic Interface versão 2012.1 como pré e pós-processador.

O modelo numérico do SAB na BHRP

foi processado em regime permanente e não permanente. Em regime permanente foi executada duas etapas: na primeira etapa, simulou-se a hidrodinâmica do aquífero sem a adição de poços de bombeamento, considerando apenas a recarga natural por precipitação pluviométrica com o objetivo de avaliar a disponibilidade hídrica em um caso ideal, ou seja, sem extrações, com esgotamento sanitário total e desprezando as perdas pela rede de distribuição. Na segunda etapa, simulou-se a situação atual real, considerando as recargas totais e as explorações.

Em regime dinâmico considerou-se a recarga anual desmembrada em recargas mensais. A priori, como partida, o modelo foi utilizado para simular o regime permanente com as condições climáticas para o mês de dezembro, tomado como condição inicial para a simulação em regime dinâmico.

Na segunda etapa da simulação, ainda em regime permanente, mas para o caso real atual, foram adicionados 10 poços de observação da carga hidráulica. Dentre os 10 poços, alguns estavam paralisados e outros desativados os quais tiveram seus níveis estáticos medidos em campanhas de monitoramento no ano de 2012. A correlação entre as cargas observadas e calculadas desses poços foi satisfatória, pois, a porcentagem residual (*Normalized RMS*) ficou pouco abaixo de 3%. Segundo Anderson & Woessner (1992), o erro residual máximo tolerado é de 10%.

4 CONFIGURAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico para o SAB na BHRP foi elaborado tendo como base a situação atual de fluxo, sob influência do uso e ocupação do solo: considerando as recargas naturais, recargas induzidas e extração de água do sistema através de poços de bombeamento. O modelo foi otimizado agregando dados da base do INPE, CAERN, CPRM e ANA.

Da base de dados da CAERN e CPRM/SIAGAS foram utilizados 100 poços, com os quais foi definida a litoestratigrafia do

modelo através da interpretação e posterior correlação dos perfis litológicos. A CAERN dispunha de 71 poços com relatórios detalhados sobre o perfil construtivo e geológico e a CPRM de 29 poços. Com as condutividades hidráulicas obtidas a partir da interpretação dos testes de bombeamento, foi gerada uma imagem digital de relevo através de interpolação. Com essa imagem foi possível adicionar (estimar) valores de condutividades aos pontos (poços) sem informação. Na interpretação dos testes em 25 poços, foi possível obter valores do armazenamento específico (S_s) e em 4 poços, o rendimento específico (S_y) pois, nestes, os rebaixamentos foram observados a partir de poços de monitoramento.

Da base de dados da ANA e do relatório de Estudo Hidrogeológico para a Região Metropolitana de Natal (ANA, 2012), foram utilizados valores calibrados de recarga adotados ao modelo elaborado pela ANA e incluídos os poços da base de dados da CAERN (2006) e da CPRM (2013); 458 poços definiram a espessura e a base do SAB para o domínio escolhido (retângulo recortado da folha STRM/TODADATA n° 05S36_ZN) na BHRP. Dos 458 poços, apenas 105 poços estão dentro da área de estudo (área ativa do modelo numérico). Dos 105 poços, 10 foram utilizados como poços de monitoramento na segunda simulação, em regime permanente (caso real atual) e o restante, como poços de bombeamento. Na simulação em regime dinâmico, todos os 105 poços foram utilizados como poço de exploração no modelo numérico.

4.1 Definição da área modelada e discretização

A área considerada para a aplicação do modelo foi a área interna do domínio retangular definido no MODFLOW, com superfície de 131,67 km² delimitada pelo divisor topográfico da Bacia Hidrográfica do Rio PitimbuRN. As áreas externas ao divisor topográfico foram consideradas com regiões de fluxo nulo, deixando ativa apenas a área de interesse.

Na discretização horizontal, que contém

as áreas externas e internas do modelo, o domínio foi dividido horizontalmente em 500 linhas e 840 colunas, totalizando 420.000 células com resolução de 30m.

Apesar de o modelo numérico do SAB elaborado pela ANA para a RMN apresentar apenas 3 camadas, para a BHRP, com base na interpretação da litologia dos 100 poços mencionados, foi possível visualizar uma possível correlação entre as contínuas lentes horizontais de argilas, argilitos e compostos argilosos intercalados aos sedimentos areníticos. Portanto, no que se refere às dimensões e geometria do grid, formando um sistema único, conforme o modelo conceitual previamente estabelecido, foram definidas 5 camadas para o modelo numérico.

Em seguida, foram importados para o modelo numérico os dados da topografia e das elevações das camadas. As informações da topografia do topo do modelo e suas drenagens foram extraídas da imagem TOPODATA (2013) com o auxílio do software ArcGIS 10.2.

Conforme supracitado, a base do modelo, considerando as áreas externas e internas da bacia, foi definida a partir da informação de 458 poços sobre a espessura do SAB na BHRP.

Com um modelo digital de terreno, foi possível extrair uma malha de pontos com as informações altimétricas e, posteriormente, importá-la com o Visual MODFLOW para o modelo numérico. Para as demais 4 camadas, foram gerados mapas de isópacas com base nas informações dos perfis litológicos dos 100 poços da base de dados da CAERN e CPRM e seu grid de pontos importados para o modelo numérico.

Pelo método das diferenças finitas da equação de fluxo não se pode considerar espessura de célula igual a zero; assim, foi adotada a espessura mínima de 1m (padrão do MODFLOW) para as demais camadas onde ocorreram descontinuidades.

A subdivisão que definiu a litoestratigrafia do modelo foi interpretada da seguinte forma: (i) A primeira camada é formada por aluviões nas partes mais baixas, areia da For-

mação Dunas e pelo arenito aflorante da Formação Barreiras; (ii) A segunda e a quarta camadas são formadas por argila, argilito e compostos argilosos intercalados com arenito muito fino; (iii) A terceira e quinta camadas são formadas por arenitos que vão de fino a médio, siltes e siltitos na direção da base do modelo.

4.2 Condições de contorno

No Visual MODFLOW, o módulo “*River*” foi utilizado para representar os canais e corpos d’água permanentes e o módulo “*Drain*” representou os canais intermitentes. Ambos os módulos calculam a condutância hidráulica para as células onde os contornos foram assinalados.

O processo para obtenção das variáveis que se integram à tabela de atributos se deu da seguinte forma:

Rio Pitimbu – Canal principal. A linha que o representa foi dividida em 16 segmentos tendo como critério de divisão o gradiente topográfico. Os segmentos com maior comprimento representam as extensões do rio onde a topografia possui baixa ou nenhuma variação na superfície. Os 16 segmentos foram subdivididos em comprimentos de 30m, 60m, 120m e 300m. O nível de superfície d’água foi considerado como o valor da cota altimétrica da imagem TOPODATA na linha subdividida e, de acordo com a fotointerpretação das imagens de satélite do Google Earth foram estimadas larguras que variam de 2m a montante a 6 metros a jusante. Regiões do segmento que vai da área sul de Natal até próximo da lagoa do Jiquí apresentam largura de aproximadamente 12 m. A profundidade da calha do rio em relação ao nível de superfície do mesmo foi estimada com base nos trabalhos desenvolvidos por BORGES (2002) e pela SERHID (2006). Os valores de profundidade da calha variam entre 1,5m a 2,5m somado à estimativa da espessura de 1m do material litológico que compõe o leito do rio. Nesse caso, a profundidade do rio varia de 50 cm em seus primeiros quilômetros a montante das represas e de 1m a 1,5 a jusante das represas.

Drenos – Canais intermitentes. Foi utilizado o mesmo critério na obtenção das informações para o cálculo da condutância. Exceto pelo fato de o dreno se comportar como um sumidouro e em seu caminhamento o nível freático estar no mesmo nível da superfície do solo ou abaixo dele dependendo das condições climáticas do local. *Represas e Lagoas.*- Devido à inexistência de dados acerca da evapotranspiração, escoamento superficial e taxa de infiltração horizontal simuladas pelo módulo “Lake”, o módulo *River* também foi utilizado para simular esses corpos d’água por fazerem parte do sistema físico do rio Pitimbu, exceto a Lagoa da Base. Com a fotointerpretação foi possível identificar 7 represas e as lagoas da base e do Jiquí assim com estimar suas dimensões. A geometria foi estimada seguindo o mesmo critério utilizado para a obtenção das informações para o cálculo da condutância hidráulica.

Salienta-se que o limite hidráulico da condição de contorno tipo 2 (fluxo especificado) para a primeira camada do modelo foi obtida do recorte das diferentes zonas de recarga do modelo numérico do SAB da RMN elaborado pela ANA.

4.3 Parâmetros hidrogeológicos

Os parâmetros K e S_s foram obtidos a

Tabela 1 -Valores de parâmetros de armazenamento
Table 1 – Values of storage parameters

Litologia	S_s	$S_y = \eta_e$	η_t
Argilas		0.02	
Compostos Argilosos	6.80×10^{-5}	0.04	0.22
Arenitos		0.125	

4.4 Condutividades hidráulicas das camadas

Pelo fato de que a maioria dos poços atravessam o SAB e atinge o calcífero, o parâmetro K foi obtido da divisão da transmissividade (T) pela espessura saturada do SAB. Isso significa que o valor de K , por definição, é a condutividade hidráulica média de todas as

partir de dados da transmissividade T , do Coeficiente de Armazenamento (S), da espessura do aquífero quando confinado ou da espessura saturada quando livre e totalmente penetrante, ou, ainda, da espessura da seção filtrante quando o poço é parcialmente penetrante.

Com base nos testes de aquífero, de informações obtidas do relatório da ANA (2012) e na interpretação da litologia, foram estimados valores de S_s (armazenamento específico), S_y (o rendimento específico), η_e (porosidade efetiva) e η_t (porosidade) para cada ponto (poço).

Para todos os perfis litológicos dos poços analisados foram estimadas as porosidades efetivas médias com base em quadro disponível em FEITOSA & FILHO (1997) e comparadas com os resultados dos testes de aquífero e, também, com relatórios da ANA (2012). Os valores estimados apresentados na Tabela 1, foram utilizados para a obtenção de K para cada uma das cinco camadas consideradas para o aquífero. Adotou-se valores constantes para S_s , η_t e S_y igual a η_e para todas as camadas do modelo.

Na interpretação da litologia foi possível constatar a existência de anisotropia vertical nas camadas. Admitiu-se, segundo a sugestão de Anderson & Woessner (1992), que as condutividades hidráulicas verticais têm magnitudes iguais a 10% dos valores das condutividades horizontais correspondentes.

condutividades das camadas saturadas do SAB.

Assumindo que as variações da viscosidade e a compressibilidade da água são desprezíveis, as condutividades hidráulicas para as 5 camadas (Figura 2) podem ser estimadas considerando a porosidade efetiva (η_e) como fator de ponderação através da equação (1):

$$K_i = \frac{h_i \eta_{e_i}}{\sum_{i=1}^n h_i \eta_{e_i}} \bar{K} \quad (1)$$

A distribuição de K estimada para a primeira célula saturada, tomada a partir da superfície, foi extrapolada para a zona não saturada, definindo assim as zonas de conduti-

dade para a primeira camada do modelo numérico. Assim como as variáveis de armazenamento, os valores das condutividades hidráulicas foram interpolados com o inverso do quadrado da distância para as 5 camadas, com resolução de 60m de acordo com a média das distâncias entre os poços de, aproximadamente, 60m.

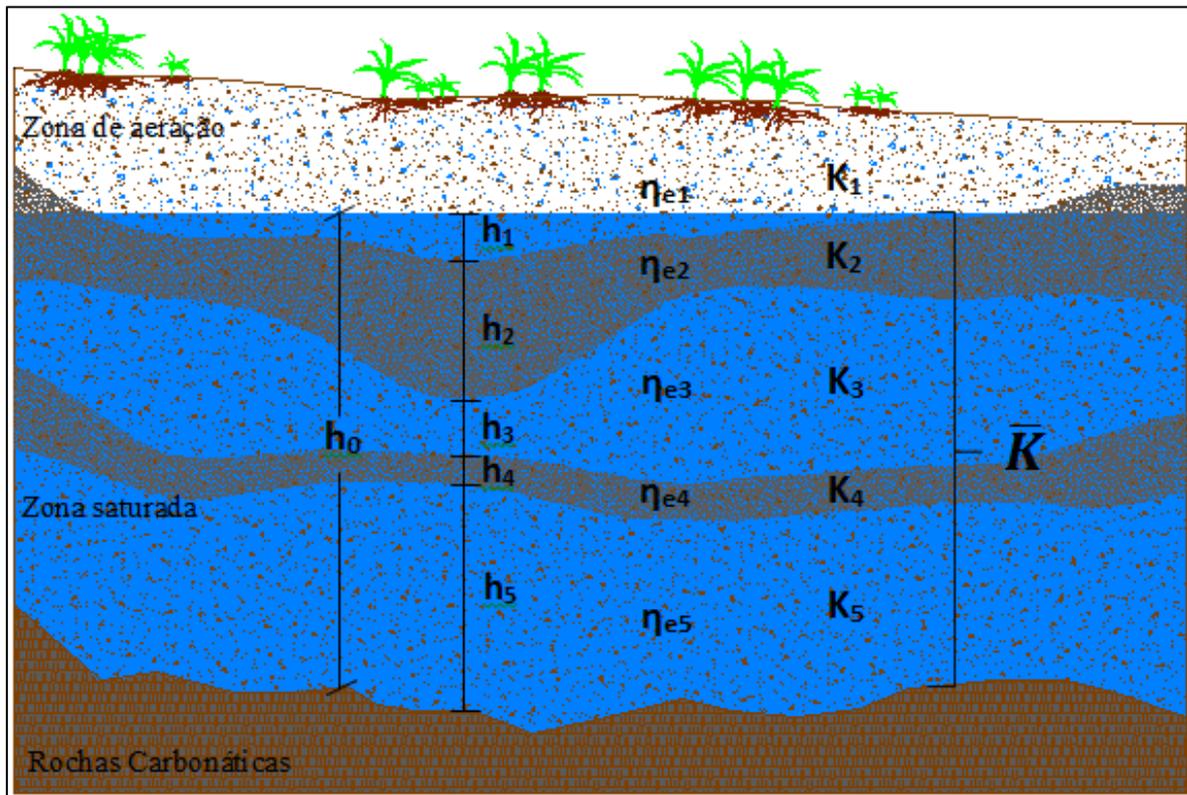


Figura 2 - Aquífero representado por 5 camadas para a obtenção de K
 Figure 2 – K determination in five layers aquifer representation

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados a seguir mostram 3 simulações processadas através do Visual MODFLOW com as configurações apresentadas anteriormente para o modelo numérico.

Embora o modelo tenha sido subdividido em 5 camadas, o mesmo representa o SAB na BHRP como um sistema único na distribuição das cargas hidráulicas, tendo valores de velocidade de fluxo mais elevados nas zonas e/ou camadas com maior valor de condutividade hidráulica. O aparecimento de células secas não resultou em problemas de convergência nas simulações, sendo que o processamento computacional convergia com menos de 50 iterações numéricas.

Embora não se tenha efetuado a calibração com o rigor desejado, todas as simulações tiveram em seus resultados discrepâncias menores que o máximo tolerado de 1% (FILHO & COTA, 2003). E, na simulação em regime permanente, a correlação de resíduos de carga calculados com base nas diferenças entre as cargas observadas e calculadas para as regiões onde existem poços de monitoramento foi 7% menor que o máximo tolerado.

Simulação 1 - regime permanente para as condições atuais de uso e ocupação do solo, com recarga natural, recarga urbana (induzida) e extração por bombeamento.

Os resultados apresentados, a seguir, são da distribuição da carga hidráulica e dos

fluxos de entrada e saída do SAB na BHRP, nas condições atuais de recarga e exploração dos recursos hídricos subterrâneos em condição estacionária ou permanente. Para as áreas ocupadas, foram somadas às recargas naturais as recargas induzidas urbanas, definidas no relatório da ANA (2012) como sendo a soma das recargas oriundas da perda de água pela rede de distribuição, infiltração por lagoas e infiltração por esgotos de fossas e sumidouros, amplamente espalhados na região urbanizada. Comparando as informações utilizadas

com dados recentes divulgados por Melo *et al.* (2014) verifica-se a compatibilidade das informações e potenciometria similar entre os valores simulados neste trabalho com os obtidos por Lucena *et al.* (2004).

A Tabela 2 mostra o resultado do balanço de massas. Como esperado, observa-se que a entrada de água no sistema se dá quase que totalmente pelas recargas naturais e urbana. As descargas se dão em sua maioria para o rio e lagoas e, em segundo lugar, pelas explorações por poços de bombeamento.

Tabela 2 - Balanço hídrico anual para o SAB na BHRP – simulação 1
Table 2 - Annual water balance of SAB in BHRP – simulation 1

Balanço Hídrico	Entrada (m ³)	Saída (m ³)
Poços de bombeamento	0	24,876x10 ⁶
Drenos	0	0,883x10 ⁶
Rio, Represas e Lagoas	1,58x10 ⁶	29,66x10 ⁶
Recarga	53,83x10 ⁶	0
Total	5,541x10 ⁷	5,541x10 ⁷

Pela análise da Tabela 2, do total de água que entra no sistema 97% é proveniente da recarga e o restante, 3%, da infiltração pelos corpos d'água superficiais cujos dados foram introduzidos no modelo numérico. Deve ser lembrando que nos 97% estão incluídos os valores de recarga calculados pela ANA (2012), da infiltração pelas lagoas. Do total de água que sai do sistema, 54% alimentam os corpos d'água superficiais, 45% são extraídos pelos poços e 2% saem pelas drenagens intermitentes. Melo *et al.* (2014) estimaram a recarga média na bacia do rio Pirangi em 277 mm/ano, correspondendo a uma taxa de infiltração 18% em relação ao total precipitado. Neste trabalho, para a BHRP, a recarga média efetiva anual foi avaliada em 390 mm/ano.

Na situação atual de recarga e exploração dos recursos hídricos subterrâneos, o modelo numérico fornece rebaixamentos da ordem de 7m a jusante da Lagoa do Jiquí, 8m no Centro Industrial Avançado de Macaíba e rebaixamentos de aproximadamente 5 metros na Zona sul de Natal. As simulações obtidas neste trabalho detalham as zonas de rebaixamento da potenciometria.

Com a interrupção da exploração, há aumento da recarga e diminuição de células secas (zonas com a cor verde), aumento do nível freático nas regiões urbanizadas e consequentemente o aumento das células secas na região do Centro Industrial Avançado por ocorrer nesta região maior exploração por poços de bombeamento, chegando o nível potenciométrico a atingir o topo da 5ª. camada. Na primeira camada, a maioria dos poços de bombeamento fica oculta pela presença das células secas.

Em relação à simulação que ignora o lançamento de água por fossas e sumidouros, verifica-se que a quantidade explorada pelos poços ultrapassa o valor da recarga média natural anual, estimada em 1,49x10⁷ m³. Esses resultados sinalizam inviabilidade de produção futura do aquífero para atender à crescente demanda populacional.

Através do módulo *ZoneBudget* (HARBAUGH, 1990) acoplado ao MODFLOW, obtiveram-se as vazões de entrada e de saída entre as subáreas delimitadas, da mesma forma como foram definidas as zonas de recarga.

Além do critério das diferenças entre as recargas na determinação das zonas de balanço hídrico, estas foram também divididas para a obtenção dos resultados referentes à contribuição dos corpos d'água superficiais ao aquífero, da contribuição deste para aqueles, das vazões dos poços de exploração e, também, para a obtenção dos volumes referentes às vazões de entrada e saída entre as subáreas.

As zonas 1, 2 e 3 correspondem às zonas não urbanizadas no sentido Oeste-Leste da bacia e as zonas 4, 5 e 6 correspondem, respectivamente, ao Centro Industrial Avançado de Macaíba, à área urbana de Parnamirim e à Zona Sul do Município de Natal.

A Figura 3 mostra as zonas de recarga definidas e utilizadas no modelo numérico. As zonas 1, 2 e 3 são áreas não urbanizadas.

As discrepâncias nos resultados da diferença entre os valores de entrada e saída variaram entre 0 e 0.05 %. A seguir, são mostrados os principais resultados da simulação obtidos através do módulo ZoneBudget.

ZONA 1 (Zona com recarga de 50mm/ano)

– Da vazão total de 3352,8 m³/dia que entra nesta zona, em termos percentuais, 59% é proveniente da recarga e 41% provém da contribuição do Rio Pitimbu. Segundo os resultados figurados nos mapas das equipotenciais, o fluxo ocorre na direção do rio Pitimbu; e, no sentido Oeste-Leste não ocorre vazão de entrada da zona 2 para zona 1. Do total que sai da zona 1, 74% fluem para a Zona 2, 19% alimentam o Rio Pitimbu e apenas 7% (240 m³/dia) são extraídos pelos poços de captação.

ZONA 2 (Zona com recarga de 100mm/ano)

– Nesta zona, a vazão total de entrada corresponde a 11135m³/dia, sendo que 63% provém da recarga e 22% é proveniente da zona 1. Nesta zona, o rio Pitimbu contribui com 13% da vazão total de entrada. Da vazão total de 11,130m³/dia que sai da zona 2, 66% alimentam o curso do Rio Pitimbu, 15% fluem para a Zona 3, 11% para os drenos e 8% (854.75m³/dia) são extraídos pelos poços de captação.

ZONA 3 (Zona com recarga de 220mm/ano)

– Apesar de receber a recarga natural expressiva proveniente da precipitação pluviométrica, o nível freático e o rio Pitimbu são influenciados positivamente pelo fluxo proveniente das Zonas 2, 4, 5 e 6. A maior contribuição dessas zonas para a Zona 3 é proveniente da zona 6 (34% do total 71814m³/dia), seguida da zona 5 (24%), zona 2 (2%) e Zona 4 (1%). Do total de água que entra na a Zona 3, a recarga natural contribui com 37% e os corpos d'água superficiais com 2%. Da vazão total de saída (71,803m³/dia) a maior parte alimenta o rio Pitimbu, a Lagoa da Base e a Lagoa do Jiquí (67%), seguida das vazões extraídas pelos poços de captação (12%). Ainda 11% da vazão total de saída vão para a Zona 6, 9% fluem para Zona 4, 2% para Zona 4 e 0.2% para a Zona 2.

ZONA 4 (Zona com recarga de 215mm/ano)

– Nesta zona, a vazão de entrada provém em sua maior parte da Zona 3, isto é, 62% do total de 9958m³/dia. A direção, velocidade do fluxo para a zona 4 é diretamente influenciada pelas vazões de exploração dos poços. Estes representam 83% da vazão de saída da Zona 4. Os drenos e a Zona 3 recebem 12% e 5% da vazão total de saída da Zona 4. A soma das recargas natural e urbana contribuem com o restante de 38% da vazão total que entra nesta zona.

ZONA 5 (Zona com recarga de 623mm/ano)

– Nesta zona, a recarga, a Zona 3, a Zona 6 e os poços fecham o balanço entre as taxas de fluxo. Da vazão total de entrada correspondente a 30013m³/dia, 95% é proveniente da recarga, 4% provém da Zona 3 e 1% da Zona 6. Da vazão total de saída da Zona 5, 57% fluem para a Zona 3, 41% são extraídos pelos poços de captação e 2% fluem para Zona 6.

ZONA 6 (Zona com recarga de 1189mm/ano)

– Essa área está sob parte da zona Sul do município de Natal. Conforme mencionado anteriormente, o alto valor de recarga anual se dá pela soma das recargas natural e urbana com valores de 44mm/ano e

1145mm/ano, respectivamente. Os resultados da simulação mostram a vazão total de entrada nesta zona que corresponde a 87863m³/dia, 91% provenientes da recarga, 9% da Zona 3 e 1% da Zona 5. Na saída de água, com vazão total de 87866m³/dia, 43% correspondem à vazão dos poços, 29% alimenta o curso do rio Pitimbu no trecho pertencente a Zona 6, 28% fluem para a zona 3 e, aproximadamente, 0.5% fluem para a Zona 5.

A Tabela 3 mostra os valores numéricos do balanço hídrico entre as subáreas resultantes da simulação, que se considera importante para o manejo das águas subterrâneas frente ao desenvolvimento urbano da BHRP e, conseqüentemente, na tomada de decisão com relação ao atendimento das demandas através de explorações locais e transposição de vazões entre bacias.

Simulação 2 - regime dinâmico para as condições atuais de uso e ocupação do solo com recarga natural, recarga urbana (induzida) e extração por bombeamento.

O modelo foi submetido às variações mensais de recarga durante 12 meses.

As recargas totais anuais, tanto naturais quanto urbanas, foram divididas em meses e na inserção dos dados no Visual MODFLOW os meses foram subdivididos em dias, a quantidade de dias para seu respectivo mês. Conforme trabalhos anteriores relativos à pluviometria da região de estudo e com base no relatório da ANA (2012), a recarga efetiva natural inicia-se no final de maio e seu ciclo termina em setembro.

A Tabela 4 mostra a distribuição mensal da recarga natural e urbana utilizada na simulação em regime dinâmico.

Conforme mencionado anteriormente foi tomada como condição inicial a simulação em estado permanente para o mês de dezembro, antes de iniciar o período chuvoso. Os resultados são considerados satisfatórios para células distantes dos cursos de água, de fontes e sumidouros como de células com poços de exploração. Para tais locais, modelagem mais sofisticada é requerida, destacando-se a aplicação do método dos elementos finitos, como o utilizado por Nogueira & Kiang (2015).

O resultado do balanço de massas apresentou de forma consistente o regime dinâmico. Os valores obtidos indicam que a soma algébrica os volumes totais de entrada e saída se anula em decorrência do bombeamento dos poços, do escoamento superficial, do armazenamento e da recarga. A influência desses componentes varia temporalmente, sendo que das águas superficiais da BHRP, mais de 95% são do rio Pitimbu e, juntamente com a recarga e o armazenamento são os principais contribuintes para a entrada de água no sistema. Os poços de exploração e o rios atuam como os principais captadores de água

Ao término do período chuvoso dá-se a continuidade da percolação do volume precipitado somado à recarga urbana até o final do mês de outubro, sendo que a recarga urbana permanece até o mês dezembro. A infiltração e percolação do volume acumulado na calha do rio Pitimbu cresce linearmente após o mês de julho a um volume de 1,0x10⁶ m³ até o mês de dezembro. Este processo de transferência de água torna o rio Pitimbu intermitente em várias extensões até aproximadamente o centro da BHRP. A partir daí a perenidade é mantida em decorrência da contínua recarga urbana e do volume armazenado.

Esses resultados são coerentes quando comparados com a fotointerpretação das variações anuais dos níveis das águas superficiais na observação das imagens de satélites do Google Earth e também quando comparados com os trabalhos realizados pela SERHID (2005) e ANA (2012). Com relação aos resultados, confirma-se a importância do aplicativo MODFLOW para realizar a compartimentalização do balanço hídrico da bacia, como verificado em Carvalho (2013) e sua importância na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Considerando a área total da BHRP, o processo de recarga se dá a partir no início do período chuvoso, primeiramente pela percolação do volume acumulado na calha do rio Pitimbu e em seguida, pelo processo de infiltração do volume precipitado.

Os resultados também mostram certo equilíbrio entre a captação de água pelos poços e o volume armazenado no primeiro semestre. Todavia, mantendo-se a vazão constante dos

poços até o final do ano, o volume explorado supera o volume armazenado na entrada de água no sistema.

Assim, constata-se que sem a diminuição da vazão, pode haver rebaixamento da produção pelos poços, ou seja, vazões de exploração insuficientes para suprir a demanda nos três últimos meses do ano. Vale ressaltar que, com o aumento da vazão dos poços localizados próximos à calha do rio Pitimbu, resulta, também, na diminuição do nível de água e vazão superficial. Esses fatores corroboram a afirmativa de que a maior parte da recarga que mantém o aquífero em condições satisfatórias de exploração decorre do retorno das águas servidas - fossas e sumidouros.

Simulação 3 - regime permanente para as condições de exploração extrema

Esta simulação é uma variação da simulação 1 considerando o aumento das vazões de exploração dos poços de captação com o objetivo de verificar o comportamento do lençol freático diante de uma possível exploração extrema.

A priori, na elaboração do modelo conceitual, procurou-se idealizar a localização de novos poços de captação. Todavia para não se incorrer no risco de gerar dados e resultados forçados, procurou-se, apenas, aumentar as

vazões de exploração dos poços já existentes.

Alguns dos relatórios da CAERN utilizados neste estudo continham valores de vazão máxima permitida e esses valores foram utilizados como vazão de exploração no modelo numérico. Vale ressaltar que segundo a CAERN, muitos poços têm sido operados com vazões acima da máxima permitida. Nesta simulação, os poços que possuem vazão de exploração abaixo de 1000m³/dia tiveram suas vazões triplicadas e os poços que possuem vazões acima de 1000m³/dia, duplicadas. Evidentemente, no caso real, o aumento significativo das vazões de exploração pode ser conseguido com a introdução de novos poços em operação.

Os resultados do balanço de massas (Tabela 5) mostram que da entrada de água no sistema, 94% provém da recarga e 6% da contribuição dos corpos d'água superficiais. Com o aumento da vazão de exploração, do total de água que sai do sistema, houve aumento de 10% na vazão total dos poços em relação à simulação 1. Consequentemente, houve a diminuição de 13% em relação à simulação 1 de saída de água do sistema para alimentar os corpos d'água superficiais. A diferença total entre as entradas e saídas é de 5268m³ e a discrepância igual a 0.01%.

Tabela 3 - Vazões de entrada e de saída nas seis zonas da BHRP – simulação 2**Table 3** - Inlet and outlet discharges in six zones of BHRP – simulation 2

Transferência de água	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		ZONA 5		ZONA 6	
	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)
Poços		240		854.75		8500.8		8300		12310		38067
Drenos		0		1214.3		0		1189.6		0		0
Água Superficial	1378.3	640.23	1500.4	7336.4	1465.6	48007	0	0	0	0	0	25163
Recarga	1974.4		7014.7		26460		3828.7		28594		79620	
Zona 1 para Zona 2		2472.5	2472.5									
Zona 2 para Zona 1	0			0								
Zona 2 para Zona 3				1724.3	1724.3							
Zona 3 para Zona 2			147.18			147.18						
Zona 3 para Zona 4						6129.3	6129.3					
Zona 3 para Zona 5						1250.3			1250.3			
Zona 3 para Zona 6						7768.9					7768.9	
Zona 4 para Zona 3					467.39			467.39				
Zona 5 para Zona 3					17229					17229		
Zona 5 para Zona 6										474.1	474.1	
Zona 6 para Zona 3					24467							24467
Zona 6 para Zona 5									168.32			168.32
Total	3352.7	3352.73	11134.78	11129.75	71813.29	71803.48	9958	9956.99	30012.62	30013.1	87863	87865.32
Diferença	-0.03		5.03		9.81		1.01		-0.48		-2.32	
Discrepância %	0		0.05		0.01		0.01		0		0	

Tabela 4 - Recargas mensais para simulaço dinâmica
Table 4 - Monthly recharges for dynamic simulation

Mês	Dias/mês	Dias	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
Janeiro	31	31	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Fevereiro	28	59	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Março	31	90	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Abril	30	120	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Mai	31	151	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Junho	30	181	12.5	25	55	22.92	59.25	106.42
Julho	31	212	12.5	25	55	22.92	59.25	106.42
Agosto	31	243	12.5	25	55	22.92	59.25	106.42
Setembro	30	273	12.5	25	55	22.92	59.25	106.42
Outubro	31	304	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Novembro	30	334	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Dezembro	31	365	0	0	0	15.42	48.25	95.42
Recarga Total			50	100	220	215	623	1189

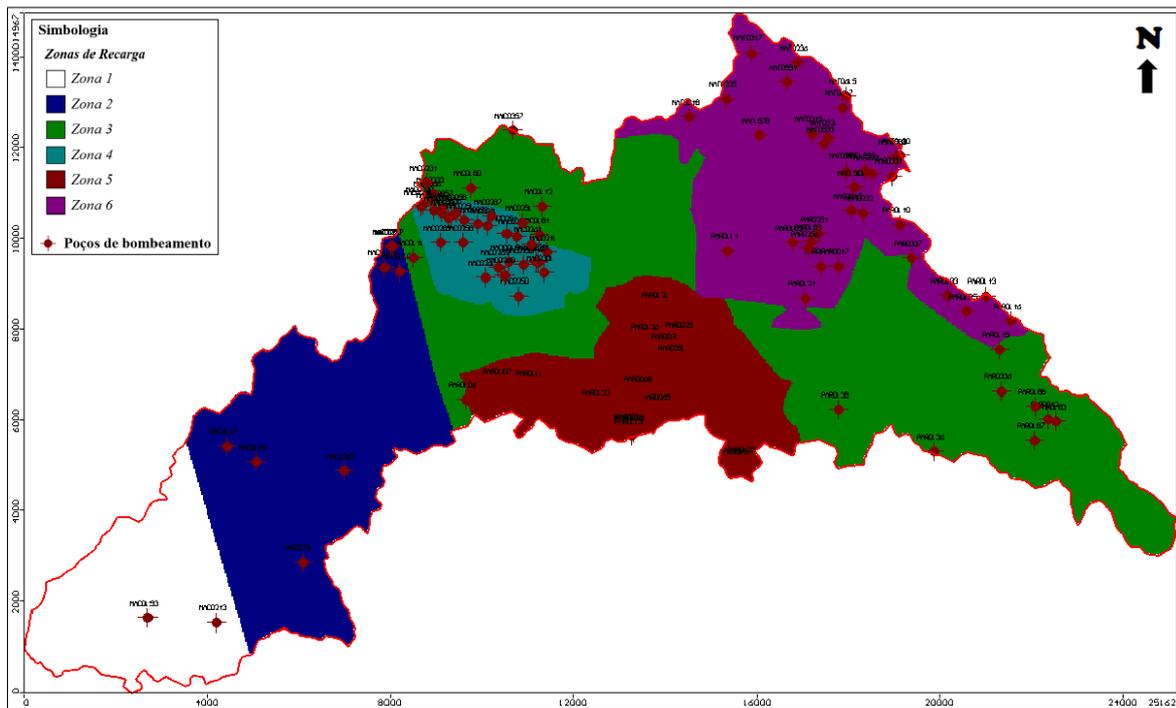


Figura 3 - Identificação por zonas das recargas natural e urbana
Figure 3 – Identification of natural and urban recharges

Os resultados mostram rebaixamento acentuando nos locais em que há maior concentração de poços e com vazões que ultrapassam os 3000m³/dia. Verifica-se que há aumento considerável de células secas (áreas em

verde) nas áreas urbanizadas, chegando a atingir a base da 5^a. camada (base do aquífero) na porção noroeste (Centro Industrial Avançado de Macaíba) e em pequenas áreas ao nordeste (Zona Sul do Município de Natal) da BHRP.

Tabela 5 - Resultados do balanço hídrico para a condição de exploração extrema
Table 5 – Water balance results for extreme exploitation condition

Balanço de Massas	Entrada (m ³)	Saída (m ³)
Poços de bombeamento	0	30,05x10 ⁶
Drenos	0	0,745x10 ⁶
Rio, Represas e Lagoas	3,025x10 ⁶	22,68x10 ⁶
Recarga	50,46x10 ⁶	0
Total	5,348 10⁷	5,348 10⁷

6 CONCLUSÃO

A modelagem do aquífero na BHRP mostrou que, pela recarga induzida da área urbana, o rio Pitimbu contribui de forma significativa para a entrada de água no sistema aquífero Barreiras. Em metade de sua extensão, o rio Pitimbu é intermitente no período seco

O aumento da exploração pode tornar o aquífero improdutivo nas áreas onde há maior demanda populacional. Na simulação em regime dinâmico, observou-se rebaixamento bastante acentuado nas regiões sul de Natal, no Centro Industrial Avançado do município de Macaíba no período seco, chegando o nível freático a alcançar o topo da 5^a. camada do modelo numérico. As velocidades máximas alcançadas pelo fluxo subterrâneo variaram entre 1 e 2,5 m/dia e a espessura saturada nas regiões com maior captação de água chegaram a aproximadamente 8m.

Pela análise do balanço hídrico entre compartimentos (Tabela 2), do total de água que entra no sistema, 97% é proveniente da recarga e o restante de 3% da infiltração pelos corpos d'água superficiais cujos dados foram assinalados no modelo numérico do SAB da BHRP. Observa-se que nos 97% estão também incluídos valores de recarga da infiltração por lagoas. Do total de água que sai do

sistema 54% alimentam os corpos d'água superficiais, 45% são extraídos pelos poços e 2% saem pela drenagem intermitente.

A modelagem numérica aplicada a fluxo subterrâneo do SAB da BHRP se mostrou uma ferramenta útil para o gerenciamento dos recursos hídricos. A interface amigável do software que carrega o código MODFLOW e suas sub-rotinas que resolvem as equações de balanço hídrico e de massas assim como das interações entre as águas superficiais e subterrâneas, facilitam a realização de simulações cujos resultados permitem melhorar a confiabilidade na tomada de decisões

Neste trabalho, a divisão do aquífero em cinco camadas e variações espaciais dessas camadas com variações espaciais da condutividade hidráulica podem ser consideradas como avanço nas previsões hidrogeológicas e abertura para novas pesquisas do sistema Barreiras na BHRP.

A implantação de bacias hidrogeológicas representativas nas várias regiões do país é bastante recomendável e desejável, pois, tratando-se de sistemas complexos, a integração de grupos de pesquisa pode promover o avanço significativo de práticas de manejo sustentável das águas subterrâneas, principalmente, em meio urbano ou peri urbano.

REFERENCIAS

ALVES, R. S.; MELO, J. G.; SILVA, C. T. X. L.; OLIVEIRA C. C. C. Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Parnamirim, RN: Uso Das Águas e Potencialidades. **Revista Águas Subterrâneas**, 30, n.1, p. 37-52, 2016.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. Academic Press Inc., 1992. 381p.

- AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal (RMN)**. v. 4: *Apêndices*. 2012.
- BORGES, A. N. **Implicações Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (RN) decorrentes das diversas formas de uso e ocupação do solo**. 2002. 175p. Tese (Mestrado em Engenharia Sanitária e Recursos Hídricos) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, 2002.
- CARVALHO A. M. **Modelagem Numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto, SP**; 2013. 171p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) Universidade de São Paulo, 2013.
- COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTOS DO RIO GRANDE DO NORTE- CAERN. **Relatórios técnicos dos poços ativos localizados na região metropolitana de Natal/RN**. Abril, 2006.
- CPRM/SGB - SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS). **Cadastro Nacional de Poços: acervo digital**. Endereço Eletrônico: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em dezembro de 2013.
- FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações**. Coordenação: Manoel Filho, J. & Feitosa, F. A. C., Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE. 1997.
- FILHO, C. A. C.; COTA, S. D. S. (2003). Análise de Sensibilidade para o Parâmetro Condutância na Condição de Contorno de Tipo 3 do Modelo MODFLOW. **Revista Águas Subterrâneas**, n. 17, maio, 2003.
- FREEZE, R. A.; CHERRY J. A. 1979, **Groundwater**, Prentice-Hall Inc., N.J., 1979: 604p.
- HARBAUGH, A.W. **A computer program for calculating sub-regional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional groundwater flow model**; U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392, 1990: 46p.
- LUCENA, R. F. L.; ROSA FILHO, E. F.; BITTEN-COURT, A. V. L. A potenciometria do aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi-RN e considerações sobre a relação com os mananciais superficiais. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 18, 2004.
- MELO Jr.; G. FIGUEREDO, E. M. Comportamento hidráulico e vulnerabilidade do sistema aquífero Dunas/Barreiras à poluição na área de Natal (RN). **Revista Águas Subterrâneas**, n. 13, p. 97-110, ago. 1990.
- MELO J. G., ALVES R. S., SILVA J. G. Estimativa da recarga das águas subterrâneas do sistema aquífero Barreiras na bacia do rio Pirangi, RN. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 2, p. 68-81, 2014.
- NOGUEIRA G. E. H., KIANG C. H. Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas do aquífero Rio Claro, porção nordeste do município de Rio Claro, SP. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 2, p.175-190, 2015.
- RIGHETTO A. M.; VENÂNCIO S. R. Modelagem da ocupação da bacia do rio Pitimbu – RN. **Revista REGA**, v. 13, n. 1, p. 69-86, 2016.
- RIGHETTO A. M.; ROCHA M. Exploração Sustentada do Aquífero Dunas / Barreiras na Cidade de Natal, RN, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 27-38, 2005.
- SECRETÁRIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS – SERHID/RN **Cadastramento e nivelamento de poços do Aquífero Barreiras no Município de Natal/RN**. Relatório final. Volume 01. 2006.
- SECRETÁRIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS – SERHID/RN. **Elaboração do plano de gestão integrada na bacia do Rio Pitimbu**. R7 – Relatório Final. Consórcio VBA-Tecnosolo. Outubro de 2005.
- SENA, D. S. **Avaliação da qualidade da água do Rio Pitimbu-RN**. 2008.129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil, (UFRN), Natal, 2008.
- TOPODATA. Banco de dados **Geomorfométricos do Brasil**. Disponível no site: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em dezembro de 2013.

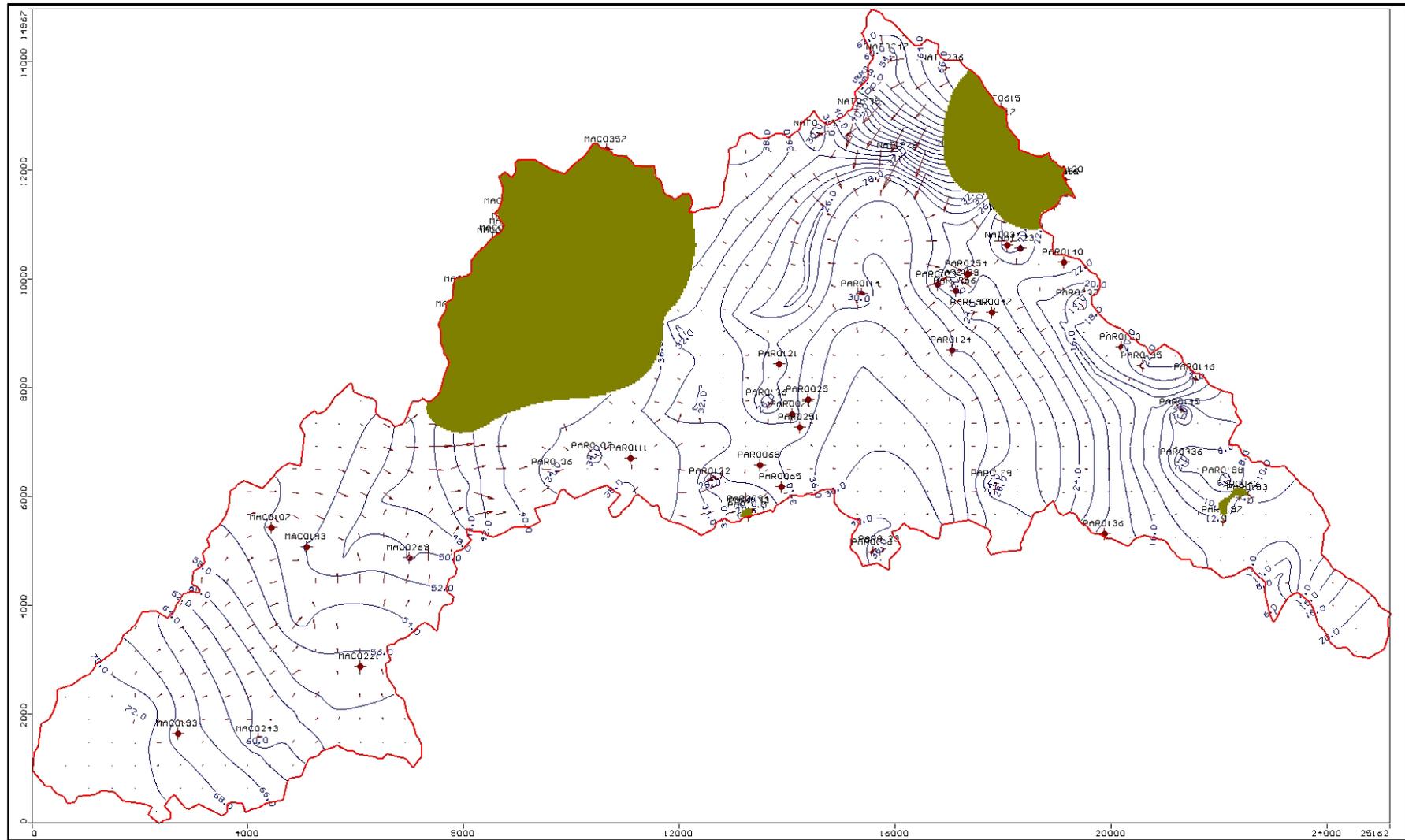


Figura 5 - Percolação subterrânea na terceira camada. Velocidade máxima igual 1.7m/dia. Simulação 2
Figure 5 - Groundwater flow in the third layer. Maximum velocity equal to 1.7 m/day. Simulation 2