



RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DA REGIÃO DE
PARNAMIRIM, RN: USO DAS ÁGUAS E POTENCIALIDADES

GROUNDWATER RESOURCES OF PARNAMIRIM REGION, RN: WATER
USE AND POTENCIAL

Rafaela da Silva Alves¹ ; José Geraldo de Melo² ;
Cleidejane Teles Xavier Lopes da Silva³; Christiane Clementino Câmara de Oliveira⁴

Artigo recebido em: 23/07/2015 e aceito para publicação em: 11/03/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i1.28486>

Resumo: A área de estudo está inserida na Bacia do Rio Pirangi, RN, ocupando superfície de 370 km², onde situa-se a cidade de Parnamirim. A expansão urbana no município de Parnamirim dá-se de forma acelerada e sem uma estrutura adequada, notadamente pela ausência de rede esgotos, com riscos de contaminação das águas subterrâneas, que constituem a principal fonte de suprimento hídrico das demandas urbanas e rurais. O presente estudo foi elaborado com o objetivo de quantificar o uso e avaliar as potencialidades das águas subterrâneas, considerando-se a necessidade do aumento da oferta de água de boa qualidade e menores riscos de serem afetadas por atividades antrópicas. Foi realizado um cadastro atualizado de poços e a caracterização do arcabouço hidrogeológico, seguido da avaliação dos parâmetros hidráulicos do aquífero e do comportamento do fluxo subterrâneo. A espessura saturada do Sistema Aquífero Barreiras aumenta de oeste para leste, variando de 15,47 a 56,5 m (com média de 32,45 m). Os parâmetros hidrodinâmicos foram estimados a partir da interpretação de ensaios de bombeamento, que forneceu transmissividade média de $5,9 \times 10^{-3}$ m²/s, condutividade hidráulica média de $2,82 \times 10^{-4}$ m/s e porosidade efetiva média de 15%. O sentido do fluxo subterrâneo é em geral de oeste para leste, sendo possível identificar as correspondentes zonas de recarga e de descarga das águas subterrâneas. A Recarga foi estimada em 253 mm/ano, que corresponde à uma taxa de infiltração de 16,4% da precipitação.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Barreiras. Desenvolvimento urbano. Potencialidades Hidrogeológicas.

Abstract: The study area is within the Pirangi River Basin, situated in the state of Rio Grande do Norte, Brazil, covering about 370 km², where is located Parnamirim city. Urban expansion in the municipality of Parnamirim occurs under accelerated rates, and it takes place under no proper infra structure, notably by the lack of sewage networks, presenting high risks for groundwater contamination. Groundwater consists on the main source of water to supply urban and rural demands. The main purposes of this study were to quantify the use and evaluate the potential of groundwater in the area, considering the requirements of good quality water supply preventing the possibility of risks against human activities. During this study an updated register of wells and a characterization of the hydrogeological framework of the area were carried out, followed by the assessment of hydraulic parameters of the aquifer and the groundwater flow behavior. The saturated thickness of the Barreiras Aquifer System increases from West to East, presenting values ranging from 15.47 to 56.5 m (average of 32.45 m). The hydrodynamic parameters were estimated based on the interpretation of pumping tests, which provided transmissivity average 5.9×10^{-3} m²/s, hydraulic conductivity average is 2.82×10^{-4} m/s and specific porosity average of 15%. Groundwater flow direction is generally from West to East, allowing the recognition of recharge and discharge areas. Recharge was estimated to be about 253 mm/year, which corresponds to an infiltration rate of 16.4% of the precipitation.

Keywords: Barreiras Aquifer System. Urban Development. Hydrogeological Potential.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo foi elaborado com base em resultados obtidos no projeto de pesquisa “Po-

tencialidades e definição de estratégias de manejo das águas subterrâneas da região de Parnamirim, RN”, em execução, o qual faz parte de uma Rede Cooperativa de Pesquisa do

¹⁻⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Geologia da UFRN-Hidrogeologia (alves.rafaela-silva@gmail.com ; jgmelo2@gmail.com ; cleidejane_teles@hotmail.com ; christiane_camara2@hotmail.com)

do FINEP-CNPq-CT-Hidro.

No domínio da área de estudo está localizada a cidade de Parnamirim, com população residente, estimada pelo IBGE em 2014, de 235.983 habitantes. O desenvolvimento urbano acelerado é comprovado pela taxa de crescimento, estimada em 7,9%, para o período de 1991 a 2000, superior a todas as cidades dos municípios da Região Metropolitana de Natal. A taxa de urbanização na cidade é bastante elevada.

A rápida urbanização observada em diversas regiões do mundo pode afetar, consideravelmente, o ambiente, notadamente os recursos hídricos. Nesse contexto, a água subterrânea fica sujeita a danos acentuados, caso não seja devidamente protegida da ação antropogênica (FOSTER, 1999; ISRAFILOV, 2006).

Ressalta-se que em ambientes urbanos a ausência de uma estrutura adequada de abastecimento de água, saneamento (rede de esgotos) e drenagem, faz com que os recursos hídricos sejam mais afetados, com influência inclusive na saúde pública (MELO e QUEIROZ, 2001).

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras (SAB) constituem a principal fonte de suprimento hídrico das populações urbanas e rurais da região de Parnamirim. Estas são captadas em grande parte na área urbana, por meio de um grande número de poços. A ausência de um sistema coletor de esgotos eficiente na cidade, constituído por fossas e sumidouros, propicia grandes riscos potenciais para as águas subterrâneas. Na zona rural, nos perímetros irrigados, o uso das águas também se faz com riscos já que não existe um controle do uso de defensivos agrícolas, que podem impactar as águas subterrâneas (MELO et al., 2014).

Em termos potenciais, os recursos hídricos do SAB na Bacia hidrográfica do Rio Pirangi, onde está situada a “Região de Parna-

mirim” são elevados, conforme avaliação feita por Melo et al. (2014).

A estrutura geológica do terreno tem uma influência marcante sobre as espessuras saturadas do Sistema Aquífero Barreiras, e por conseguinte, sobre as suas potencialidades, refletindo na produtividade dos poços. As maiores vazões exploráveis são observadas em poços que apresentam as maiores espessuras saturadas (LUCENA e QUEIROZ, 1996; BEZERRA, 2001; LUCENA et al., 2006).

Foi efetuado, neste trabalho, uma avaliação atualizada do uso das águas e das potencialidades hidrogeológicas do SAB como subsídio a indicação de áreas produtoras, fora dos domínios urbanos e com menores riscos potenciais de contaminação, tendo em vista o suprimento hídrico da cidade de Parnamirim e o desenvolvimento regional.

2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte, compreendendo a maior parte do município de Parnamirim e parcialmente os municípios de Macaíba, São José de Mipibu, Vera Cruz e Nísia Floresta. Situa-se no domínio da região dos “vales úmidos”, cuja atribuição se deve a elevada precipitação pluviométrica e ocorrência de rios e lagoas perenes (Figura 1). A precipitação média na Região de Parnamirim é de 1539 mm/ano, segundo dados referentes à série histórica (1995-2010), fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). Segundo a classificação de Köppen (Azevedo e Moreira, 1981 *apud* Lucena, 2005), a área está inserida no domínio do clima As’- quente e úmido, caracterizado por presença de clima tropical chuvoso com verão seco e estação chuvosa se adiantando para o outono (SERRHID, 2006).

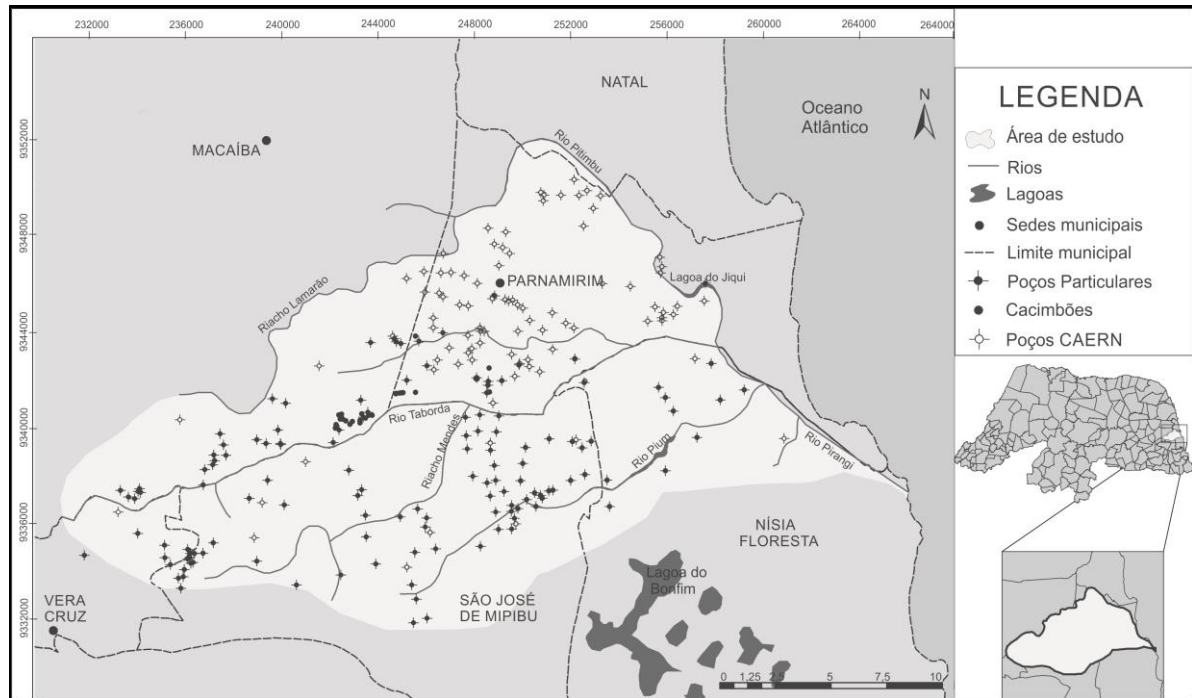


Figura 1 - Mapa de localização com todos os poços cadastrados em campo, operados pelo sistema público de abastecimento (CAERN) e de particulares

Figure 1 - Location map with all the wells registered in the field, operated by the public supply system (CAERN) and individuals

A área de estudo é drenada pelos rios Pitimbu, Taborda e Pium, além dos Riachos dos Mendes, Água Vermelha e Lamarão, afluentes do Rio Pirangi ocupando uma superfície total de 370 km². Observam-se também as Lagoas do Jiqui e do Pium (Figura 1). São rios e lagoas perenes, que se desenvolvem sobre sedimentos Tercio-Quartenários do Grupo Barreiras, e cuja perenidade é atribuída a ressurgências de águas subterrâneas do SAB.

O SAB é formado na sua parte superior de arenitos finos e argilosos e na sua parte inferior de sedimentos de granulometria mais grossa (arenitos médios a grossos).

O Rio Pitimbu é o manancial mais estudado do ponto de vista ambiental e hidrológico (DUARTE et al., 2004; BORGES, 2002; KOBAYASHI et al., 2010), uma vez que o mesmo flui para a Lagoa de Jiqui, cujas águas são utilizadas no abastecimento da Zona Sul da cidade de Natal. Convém ressaltar que apenas a margem direita do Rio Pitimbu faz parte da área de estudo.

Existe uma ampla relação entre os mananciais superficiais e subterrâneos, sendo o Aquífero Barreiras nitidamente de regime influente nos canais fluviais e lagoas, conforme

evidenciado em estudos anteriores (LUCENA et al., 2004).

No contexto geomorfológico, dominam os Tabuleiros costeiros e as planícies fluviais, correspondentes aos vales dos rios.

3 METODOLOGIA

Os trabalhos foram desenvolvidos com base na interpretação de resultados do cadastramento de poços realizado em campo (Maio-Junho de 2014); e, utilizando os arquivos de dados de poços da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) e do Departamento de Geologia da UFRN (DG-UFRN). Por ocasião do cadastro de poços foram obtidos dados sobre parâmetros hidráulicos, incluindo nível estático, nível dinâmico, vazão e vazão específica e informações sobre regime de bombeamento e uso das águas. Foram utilizados também, sempre que necessário, dados hidrogeológicos de trabalhos desenvolvidos anteriormente na região para efeito de comparação de resultados e utilização nas avaliações hidrogeológicas.

Foi definida uma rede de monitoramento com 46 pontos de água, incluindo po-

ços tubulares, cacimbões e fontes, tendo em vista as medições de nível d'água e outras finalidades inerentes ao projeto de pesquisa referido e em desenvolvimento.

3.1 Estrutura hidrogeológica e dimensões do SAB

A estrutura hidrogeológica do SAB foi definida mediante a correlação de 34 perfis litológicos e construtivos de poços, que fazem parte dos arquivos de dados de poços da CAERN e do DG-UFRN, e que incluem poços perfurados pela CAERN e de empresas privadas de perfuração. Os perfis utilizados, em sua maioria, são de poços totalmente penetrantes (24 poços) no SAB, até atingir o topo das rochas carbonáticas Cretáceas da Formação Gramame – Maria Farinha. Foram elaboradas seções individuais com a indicação de camadas possíveis de constituírem aquíferos e aquitardes e as discontinuidades com possível influência nas potencialidades hidrogeológicas. Durante o desenvolvimento dos trabalhos ocorreram algumas dúvidas quanto à natureza litológica dos sedimentos, tendo sido dada prioridade aos perfis de poços da CAERN, os quais em geral são descritos cuidadosamente por técnicos experientes do setor de perfuração.

A análise individual dos perfis litológicos proporcionou a obtenção de dados da espessura total e espessura saturada do SAB que permitiram a elaboração de mapas de isópacas e de isovalores da espessura saturada.

3.2 Parâmetros Hidrodinâmicos

Os parâmetros hidrodinâmicos do SAB foram avaliados com base nos resultados de 34 testes de bombeamento de poços tubulares, que permitiram estimar vazão específica (q), transmissividade (T), condutividade hidráulica (K), e porosidade efetiva (μ).

A vazão específica ou capacidade específica de poços (q) foi estimada a partir da razão entre a vazão de bombeamento (Q) e a variação de rebaixamento (Δs), conforme a seguir:

$$q = \frac{Q}{\Delta s} \quad (1)$$

Onde q é dado em m³/h/m.

Os parâmetros T e K foram obtidos com a utilização do software *Aquifer Test Pro-Schlumberger Water Service* 2015, com a aplicação do Método de Cooper-Jacob (Rebaixamento-Tempo), conforme equação a seguir:

$$\Delta s = \frac{0,183Q}{T} \text{Log} \frac{t_2}{t_1} \quad (2)$$

$$e \quad T=K.h_0 \quad (3)$$

Onde,

Δs é a variação do rebaixamento em m de acordo com um ciclo logarítmico;

Q é a vazão bombeada (constante) em m³/s;

T é a transmissividade do aquífero em m²/s;

t₁ é o tempo correspondente ao rebaixamento s₁;

t₂ é o tempo correspondente ao rebaixamento s₂;

K é a condutividade hidráulica em m/s;

h₀ é a espessura saturada do aquífero em m, no caso de aquífero livre.

O método selecionado representa uma simplificação do Método de Theis para valores maiores de tempo de bombeamento e pequenas distâncias ao poço bombeado, ou seja, valores menores de u . Sendo u um parâmetro analítico de Theis e igual a $r^2S/4Tt$ ($u < 0,01$).

Quando o aquífero é livre, os rebaixamentos, sempre que necessários, devem ser corrigidos, utilizando a “correção de Jacob” expressa pela equação a seguir:

$$s' = s - \frac{s^2}{2h_0} \quad (4)$$

Onde,

s' é o rebaixamento corrigido em m;

s é o rebaixamento observado em m;

h₀ é a espessura saturada do aquífero em m.

Seguindo os procedimentos metodológicos, foram construídas as curvas de evolução dos rebaixamentos ao longo do tempo em escala semi-logarítmica, em cada um dos testes, tendo em vista a caracterização de uma reta representativa, que permitisse a aplicação

do método. Para atender essas condições, dentro do possível foi selecionado um trecho intermediário, haja vista que no início dos bombeamentos os rebaixamentos são muito rápidos, e, portanto, susceptíveis de erros por métodos manuais de medição. No caso do trecho final, os rebaixamentos poderão estar afetados por fronteiras de recarga (rios ou lagoas que venham ser interceptados pelo cone de rebaixamento) ou fronteiras de descarga (como é o caso de falhas envolvendo descontinuidades geológicas).

A porosidade efetiva (μ) foi estimada a partir da equação de Biecinski (Pazdro, 1983, In: Alvares e Niedzielski, 1996), em que se relaciona o valor do rendimento específico (ou porosidade efetiva) com o valor da condutividade hidráulica, de acordo com a expressão a seguir:

$$\mu = 0,117 \cdot \sqrt[3]{K} \quad (5)$$

Sendo μ adimensional e K em m/d.

3.3 Potenciometria e Direção do Fluxo Subterrâneo

O mapa potenciométrico, fundamental para a caracterização das linhas de fluxo subterrâneo, foi elaborado mediante o conhecimento das cargas hidráulicas dos poços da rede de monitoramento e das cotas potenciométricas de fontes e lagoas. Foram coletados dados de 46 pontos de monitoramento em maio de 2015 (nível estático e cotas topográficas). Por tratar-se de aquífero livre, para o traçado das equipotenciais, procurou-se observar a configuração do relevo e a disposição da rede de drenagem superficial. As cargas potenciométricas de cada ponto foram obtidas a partir dos valores de suas cotas topográficas menos as correspondentes profundidades do nível das águas dos mesmos em condições de equilíbrio (níveis estáticos). A interpolação foi realizada com a aplicação do método de Krigagem com o uso do software ArcGis 10.1.

A vazão de fluxo subterrâneo natural foi obtida com a aplicação da Lei de Darcy, conforme a seguir:

$$Q = T \cdot i \cdot L \quad (6)$$

Onde,

Q é a vazão do fluxo subterrâneo em m³/s;
T é a transmissividade do aquífero em m²/s;
I é o gradiente hidráulico em %;
L é a frente de escoamento em km.

3.4 Estimativa de Recarga

A recarga foi estimada pelos métodos de Variação de Carga (“*Water-Table Fluctuation Method*”) e Lei de Darcy aplicada ao meio poroso saturado. Na estimativa da recarga foi necessário estabelecer condições de equilíbrio hidrodinâmico mediante balanço hidrogeológico, considerando as retiradas de água por bombeamento e a recarga urbana. As retiradas de água correspondem ao volume de água bombeado obtido a partir dos resultados do cadastro de poços.

3.5 Avaliação da Recarga pelo Método de Variação de Carga

A recarga corresponde às reservas reguladoras do aquífero em condições de equilíbrio hidrodinâmico, ou seja, é o volume de água compreendido entre os níveis potenciométricos máximos e mínimos, em um determinado período, referido em geral a um ano hidrológico.

As reservas reguladoras podem ser avaliadas pela equação a seguir:

$$RR = A \cdot dh \cdot \mu \quad (7)$$

Onde,

A é área de ocorrência do aquífero livre sujeito a variação sazonal do nível d’água em m²;
dh é o pico de elevação do nível d’água atribuído a recarga; obtido pela diferença entre o pico de subida do nível d’água e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente, extrapolada no tempo de pico (Healy e Cook, 2002);
 μ é a porosidade efetiva ou rendimento específico (specific yield) do aquífero (adimensional).

A avaliação mais precisa da variação de carga dh requer o monitoramento do nível d'água de poços, o que não foi realizado deste trabalho. Na estimativa das reservas reguladoras (RR) pelo método da variação de carga foi utilizado para dh o valor de 1,6 m obtidos em estudos regionais (IPT, 1982).

A recarga urbana foi estimada pela seguinte equação:

$$R_u = q_e + q_v \quad (8)$$

Onde,

q_e é a descarga de esgotos em m^3 /ano ou mm/ano;

q_v são as perdas de água na rede em m^3 /ano ou mm/ano

O volume de efluentes que é descarregado nas águas subterrâneas (q_e) é de 90% do volume faturado (V_f), desde que 10% é efetivamente consumido. Assim sendo, $q_e = 0,90 V_f$. Onde, o volume faturado (V_f) corresponde a 60% do volume de suprimento (V_s), desde que as perdas de água na rede (q_v) são de 40% do volume de suprimento (Melo et al., 2012 e Melo et al., 2014), ou seja, $q_v = 0,40 V_s$. Assim sendo, a equação da recarga urbana (unidades em m^3 /ano ou mm/ano) toma a seguinte forma:

$$R_u = 0,90 V_f + 0,40 V_s \quad (9)$$

O volume de suprimento ou as retiradas de água na cidade de Parnamirim foi obtido com base no cadastro atualizado de poços realizado em Maio-Junho de 2014.

A recarga, satisfazendo as condições equilíbrio, são obtidas pela equação:

$$R = RR + W - R_U \quad (10)$$

Onde,

R é a recarga em m^3 /ano ou mm/ano;

RR é a reserva reguladora em m^3 /ano ou mm/ano;

W é a retirada de água ou volume bombeado na área de estudo;

R_U é a recarga urbana atribuída à descarga dos esgotos domésticos em direção as águas subterrâneas e às perdas de água na rede de supri-

mento.

O volume de suprimento ou as retiradas de água na cidade de Parnamirim foi obtido com base no cadastro atualizado de poços realizado em Maio-Junho 2014.

3.6 Avaliação da Recarga com a Aplicação da Lei de Darcy ao Meio Poroso saturado

Em condições de equilíbrio hidrodinâmico e sem a retirada de águas subterrâneas, o fluxo subterrâneo através de uma seção vertical do aquífero é equivalente à recarga vezes a área superficial que contribui para o fluxo (SCANLON et al., 2002).

Para a aplicação deste método é necessário conhecer a descarga natural de fluxo subterrâneo que é estimada a partir do mapa potenciométrico da área, conforme apresentado anteriormente. A Recarga efetiva (R) corresponde ao somatório da vazão do fluxo subterrâneo (Q) e das retiradas por bombeamento (W) subtraindo a Recarga urbana (R_u), conforme equação a seguir:

$$R = Q + W - R_U \quad (11)$$

Onde,

Q é a descarga do fluxo subterrâneo em m^3 /ano ou mm/ano;

W é a retirada de água ou volume bombeado em m^3 ;

R_U é a recarga urbana.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram cadastrados, na área de estudo, 268 poços penetrando o SAB, dos quais 92 são poços tubulares do Sistema Público de Abastecimento e 176 poços são de particulares. Dentre estes, 36 são poços cacimba.

Os poços do Sistema Público de Abastecimento são perfurados em diâmetro de 12 e 14 polegadas e revestidos em diâmetro de 6 e 8 polegadas, respectivamente. Todos são revestidos com tubos e filtros Geomecânico. Alguns deles são poços já desativados (18), na maioria por insuficiência de vazão, não foram utilizados dados para avaliação de parâmetros

ou avaliação de volume de água bombeado. As vazões bombeadas desses poços, em funcionamento, variam de 20 a 105 m³/h, e operam em regime 24/24 h. A vazão de produção dos 74 poços em operação é de 30,5x10⁶ m³/ano.

No caso dos poços tubulares de particulares, os mesmos são em geral perfurados em diâmetro de 10 e 12 polegadas e revestidos em 4 e 8 polegadas, respectivamente, também com revestimento e filtros principalmente do tipo Geomecânico, havendo casos da utilização de tubos branco; e como filtros, os tubos ranhurados (poços de 4 polegadas de diâmetro). As vazões dos poços tubulares de particulares variam de 5 a 20 m³/h, com média de

10 m³/h, operando em regime 6/24h, com produção total estimada em 3,0x10⁶ m³/ano. Com relação ao uso dessas águas, a maioria (58%) destina-se ao uso doméstico; 20% têm uso misto, ou seja, doméstico e irrigação, ou doméstico e industrial. Para o uso exclusivamente industrial o percentual é baixo, apenas de 10%, o mesmo número destina-se a irrigação; para dessedentação animal, o uso é de 2% (Figura 2). A captação d'água nos cacimbões ocorre de forma pouco expressiva, os mesmos não são bombeados e são utilizados para fins secundários; os cacimbões não foram considerados na avaliação da produção de água.

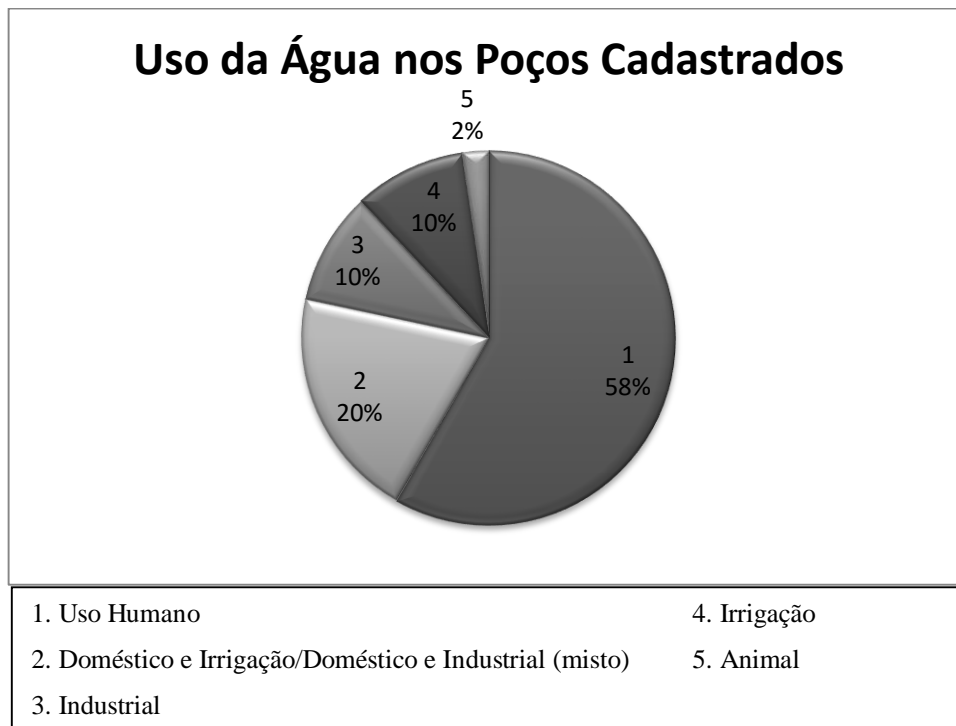


Figura 2 - Distribuição do uso da água nos poços cadastrados
Figure 2 - Distribution of water use in wells registered

O volume total de água bombeada do Sistema Aquífero Barreiras, incluindo os poços públicos e particulares é, portanto, de 33,5x10⁶ m³/ano.

A análise da correlação dos perfis de poços mostra a ocorrência de um pacote sedimentos do Grupo Barreiras sobre rochas carbonáticas Cretáceas. Trata-se do SAB com nível d'água variando de 4,0 a 26,89 m de profundidade, cujos sedimentos penetrados, são formados na sua parte superior por sedimentos

arenosos com variação lateral de fácies para níveis argilosos, e na sua parte inferior, são arenitos predominantemente finos a grossos, com níveis argilosos, que lhes confere o caráter de um sistema aquífero livre, com a ocorrência local de semi-confinamento (Figuras 3 e 4). A configuração dos perfis mostra também a presença de descontinuidades estruturais que podem limitar as potencialidades do SAB neste setor (Figura 3).

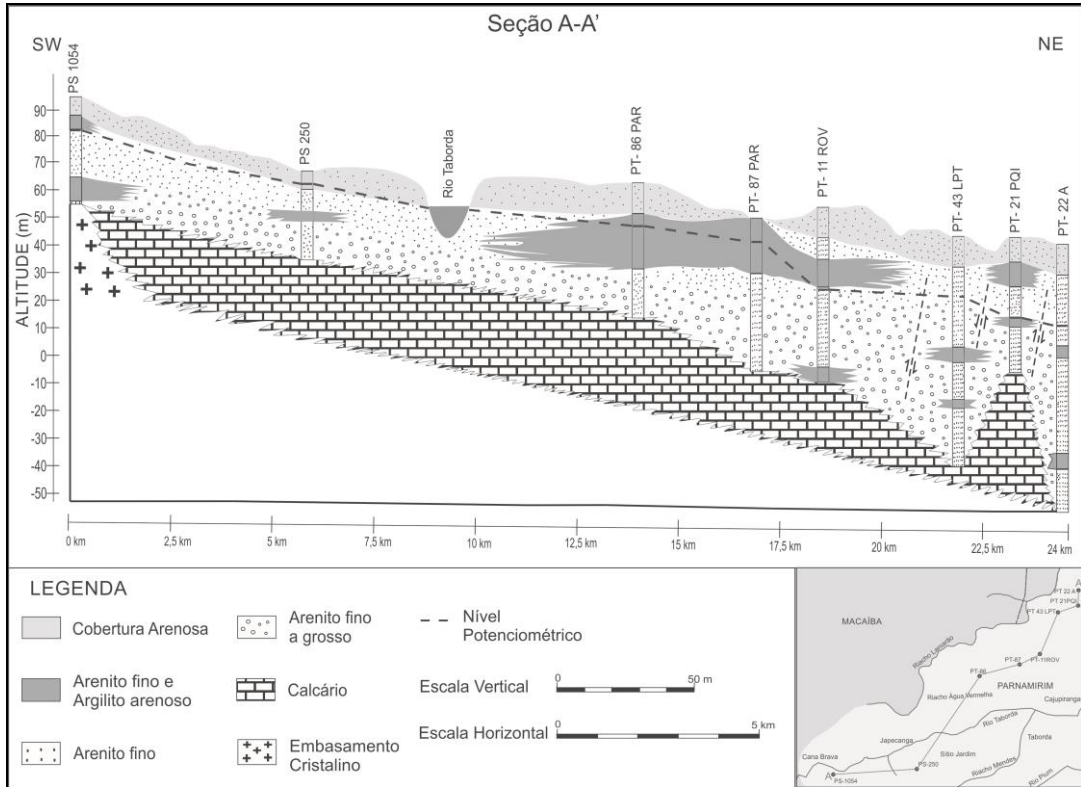


Figura 3 - Seção hidrogeológica A-A'
Figure 3 - Hydrogeological cross-section A-A'

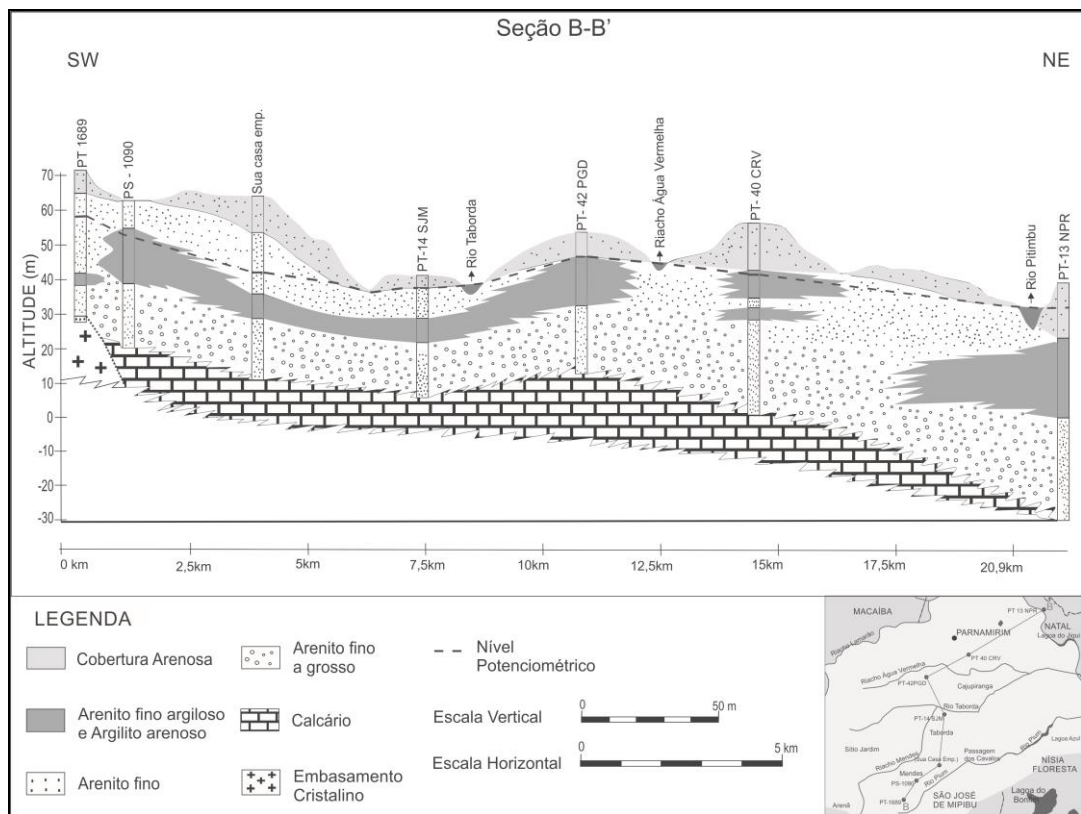


Figura 4 - Seção hidrogeológica B-B'
Figure 4 - Hydrogeological cross-section B-B'

A Figura 5 apresenta o mapa de isópacas (espessura) do SAB. Verifica-se que há um aumento das espessuras de montante para jusante com relação ao fluxo superficial. As menores espessuras ocorrem no alto curso da bacia do Rio Taborda, com menos de 35 m, che-

gando a 29 m, e as maiores espessuras se verificam no setor nordeste da área (cidade de Parnamirim) à margem direita do Rio Pitimbú, com valores superiores a 80 m (Figura 5) atingindo o máximo de 95 m (Tabela 1).

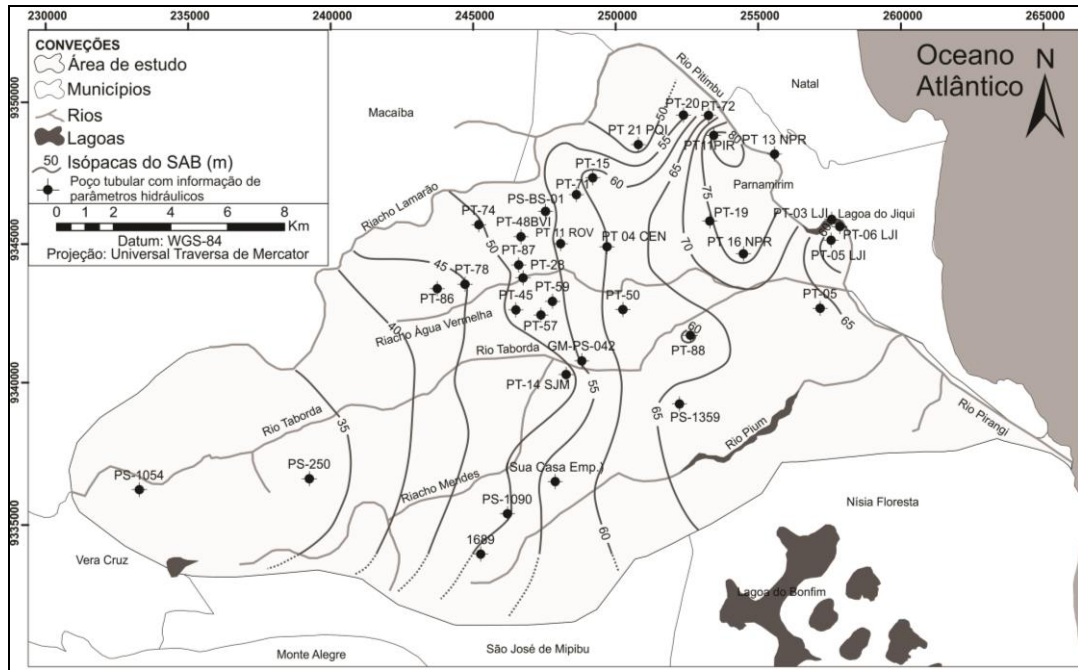


Figura 5 - Isópacas do Sistema Aquífero Barreiras na Região de Parnamirim
Figure 5 - Isopach of the Barreiras Aquifer System in Parnamirim Region

Tabela 1 - Espessura total e espessura saturada do Sistema Aquífero Barreiras
Table 1 - Total thickness and saturated thickness of the Barreiras Aquifer System (continua)

Poço	Coordenadas		e (m)	h ₀ (m)
	UTM-E	UTM-N		
PT-05	257193	9342594	69	38,55
PT-15	249200	9347162	69	50
PT-20	252390	9349370	50	23,5
PT-28	246755	9343656	50	28
PT-50	250267	9342550	64	18
PT-57	247390	9342368	52,6	24,6
PT-59	247791	9342840	53	22
PT-71	248638	9346582	56	30,46
PT-72	253274	9349358	60	25
PT-74	245205	9345520	49,5	17,2
PT-78	244722	9343442	43	22
PT-86	243744	9343290	44	22
PT-87	246610	9344122	50	32

Tabela 1 - Espessura total e espessura saturada do Sistema Aquífero Barreiras
Table 1 -Total thickness and saturated thickness of the Barreiras Aquifer System (conclusão)

Poço	Coordenadas		e	h ₀
PT-88	252636	9341658	56	23
PT11PIR	253459	9348662	95	50
PS-BS 01	247545	9345995	52	27
PT-45	246509	9342544	54	32,3
PT-48BVI	246680	9345111	57	24
PT-05 LJI	257580	9344984	47	45,43
PT-06 LJI	257605	9345719	76	50
PT-03 LJI	257884	9345453	59	53,6
PT-19	253315	9345657	75	56,5
PT 11 ROV	248073	9344869	56	23,11
PT 04 CEN	249707	9344760	60	33,61
PT 16 NPR	254500	9344500	80	40,3
PT 21 PQI	250803	9348344	41,5	18,68
PT 13 NPR	255600	9348000	76	38,85
PT 43 LPT	249356	9347855	74	41,31
PT 42 PGD	246937	9343013	44	19,82
PT 40 CRV	250051	9344674	60	29
PT 22 A	250830	9349430	86	44,42
PT-14 SJM	248271	9340270	39	15,47
GM-PS-042	248818	9340759	61	54
PS-250	239250	9336620	29	25
(Sua Casa Emp.)	247890	9336518	60	48
PS-1359	252254	9339238	70	37
PS-1090	246208	9335390	48	24
1689	245267	9333974	52	35
PS-1054	233279	9336236	35	23

e: espessura do Barreiras; h₀: espessura saturada.

A espessura saturada do SAB (Figura 6) apresenta um comportamento similar com relação à espessura do total, ou seja, a espessura saturada aumenta na direção geral do fluxo superficial (montante para jusante). A configuração das isolinhas de espessura saturada, entretanto, muda o que pode estar asso-

ciado ao bombeamento de poços e/ou a estrutura hidrogeológica. As espessuras saturadas no setor oeste da área são menores que 25 m, e, no setor leste, à margem direita do Rio Pitimbu, as espessuras saturadas chegam a ultrapassar 50 m.

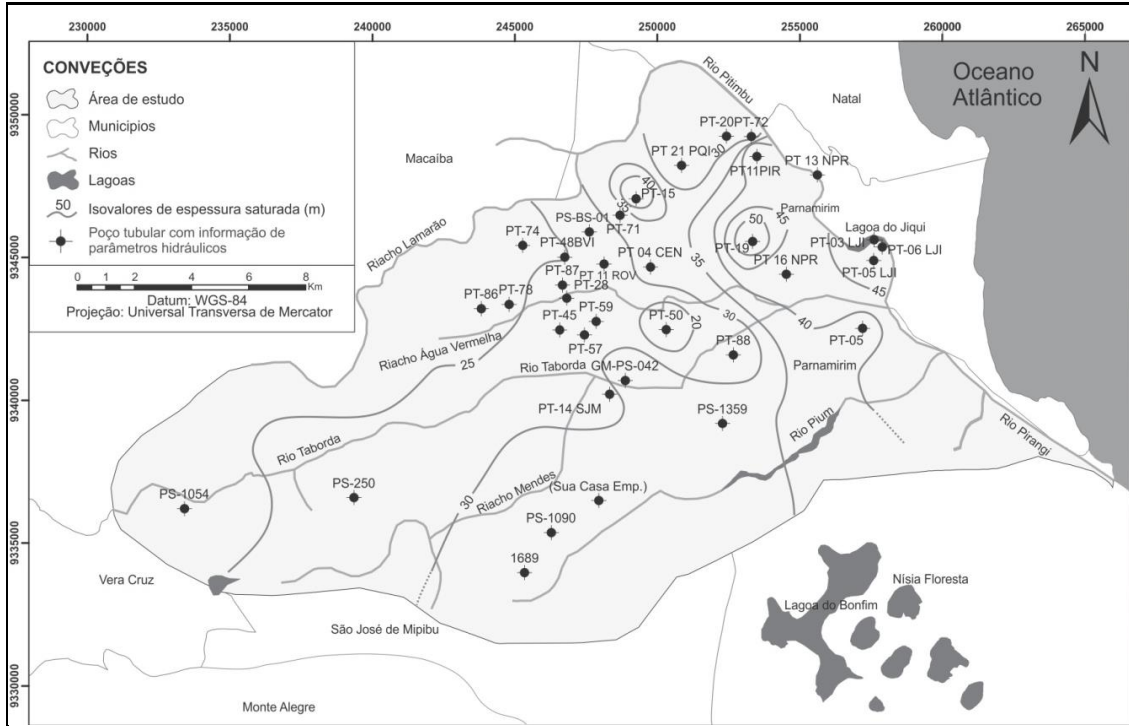


Figura 6 - Espessura saturada do Sistema Aquífero Barreiras na Região de Parnamirim
Figure 6 - Saturated thickness of the Barreiras Aquifer System in Parnamirim Region

Verifica-se que a capacidade de produção dos poços tendem a aumentar no sentido de oeste para leste com valores que vão de me-

nos de 2 m³/h/m a mais de 22 m³/h/m na região da cidade de Parnamirim (Figura 7).

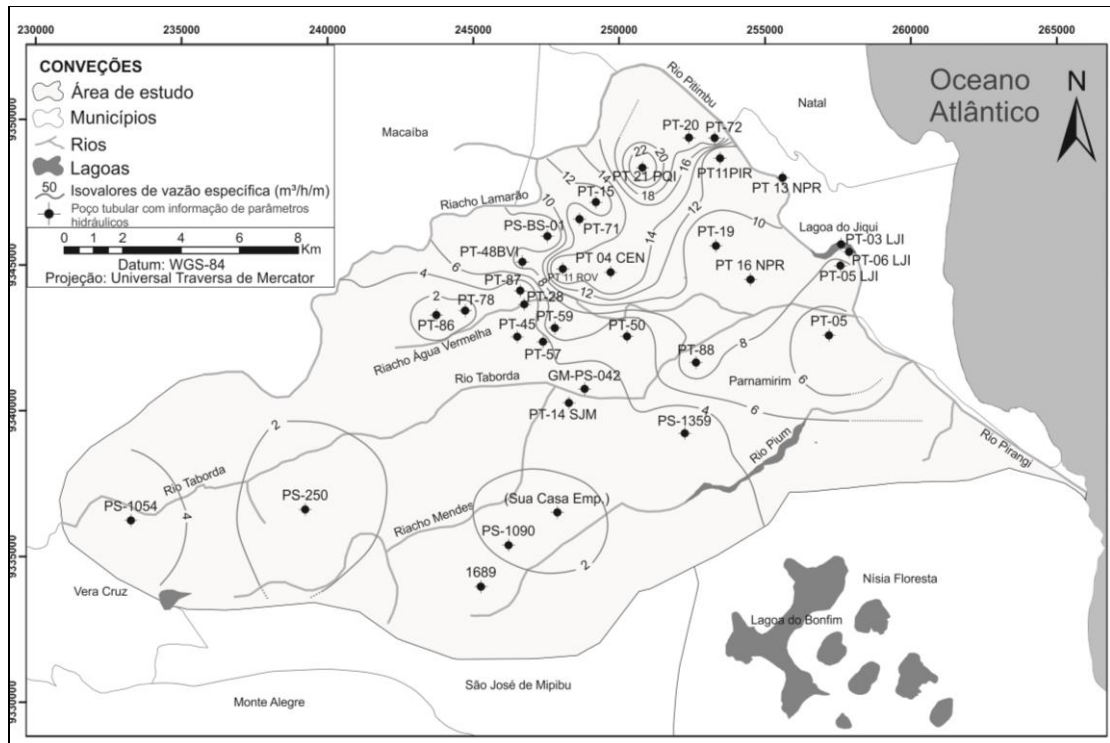


Figura 7 - Vazão Específica do Sistema Aquífero Barreiras na Região de Parnamirim
Figure 7 - Specific flow of the Barreiras Aquifer System in Parnamirim Region

Foram interpretados os resultados de 34 testes de bombeamento de poços penetrando totalmente o Sistema Aquífero Barreiras na região de Parnamirim, com a aplicação das equações (2), (3), (4), e (5), com a obtenção dos seguintes resultados (Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos
Table 2 - Summary of hydrodynamic parameters obtained

Poço	Coordenadas		T	T	K	K	μ
	UTM-E	UTM-N	m ² /s	m ² /dia	m/s	m/dia	
PT-05	257193	9342594	4,48x10 ⁻³	387,07	1,16x10 ⁻⁴	10,02	0,16
PT-15	249200	9347162	9,36x10 ⁻³	808,70	1,87x10 ⁻⁴	16,15	0,17
PT-20	252390	9349370	2,8x10 ⁻²	2419,20	1,19x10 ⁻³	102,81	0,22
PT-28	246755	9343656	3,02x10 ⁻³	260,93	1,08x10 ⁻⁴	9,33	0,16
PT-50	250267	9342550	1,8x10 ⁻³	155,52	1,03x10 ⁻⁴	8,89	0,15
PT-57	247390	9342368	8,18x10 ⁻⁴	70,7	3,32x10 ⁻⁵	2,86	0,13
PT-59	247791	9342840	4,56x10 ⁻³	393,9	2,07x10 ⁻⁴	17,88	0,17
PT-71	248638	9346582	1,01x10 ⁻²	872,64	3,31x10 ⁻⁴	28,59	0,18
PT-72	253274	9349358	2,09x10 ⁻²	1805,76	8,35x10 ⁻⁴	72,14	0,21
PT-78	244722	9343442	3,11x10 ⁻⁴	26,9	1,41x10 ⁻⁵	1,21	0,12
PT-86	243744	9343290	1,07x10 ⁻⁴	9,24	4,84x10 ⁻⁶	0,41	0,1
PT-87	246610	9344122	8,12x10 ⁻⁴	70,15	2,54x10 ⁻⁵	2,19	0,13
PT-88	252636	9341658	1,17x10 ⁻²	1010,88	5,09x10 ⁻⁴	43,97	0,2
PT11PIR	253459	9348662	3,07x10 ⁻³	26,52	6,14x10 ⁻⁵	5,30	0,14
PS-BS-01	247545	9345995	5,49x10 ⁻³	474,33	2,04x10 ⁻³	176,25	0,18
PT-45	246509	9342544	1,17x10 ⁻⁴	10,10	3,63x10 ⁻⁶	0,31	0,1
PT-48BVI	246680	9345111	6,43x10 ⁻³	555,55	2,68x10 ⁻⁴	23,15	0,18
PT-05 LJI	257580	9344984	3,85x10 ⁻³	332,64	8,47x10 ⁻⁵	7,31	0,15
PT-06 LJI	257605	9345719	9,71x10 ⁻³	838,94	1,94x10 ⁻⁴	16,76	0,17
PT-03 LJI	257884	9345453	9,71x10 ⁻³	838,94	1,81x10 ⁻⁴	15,63	0,17
PT-19	253315	9345657	3,45x10 ⁻³	298,08	6,1x10 ⁻⁵	5,27	0,15
PT 11 ROV	248073	9344869	1,2x10 ⁻²	1036,8	5,12x10 ⁻⁴	44,23	0,2
PT 04 CEN	249707	9344760	1,24x10 ⁻²	1071,36	3,7x10 ⁻⁴	31,96	0,19
PT 16 NPR	254500	9344500	2,87x10 ⁻³	247,97	6,49x10 ⁻⁵	5,60	0,15
PT 21 PQI	250803	9348344	1,67x10 ⁻²	1442,88	1,26x10 ⁻³	108,86	0,23
PT-14 SJM	248271	9340270	5,62x10 ⁻³	485,56	3,63x10 ⁻⁴	31,36	0,19
GM-PS-042	248818	9340759	1,79x10 ⁻⁴	15,46	3,32x10 ⁻⁶	0,28	0,09
PS-250	239250	9336620	4,55x10 ⁻⁴	39,31	1,82x10 ⁻⁵	1,5	0,12
(Sua Casa Emp.)	247890	9336518	3,24x10 ⁻⁴	27,99	6,76x10 ⁻⁶	0,58	0,1
PS-1359	252254	9339238	9,17x10 ⁻⁴	79,22	2,48x10 ⁻⁵	2,14	0,13
PS-1090	246208	9335390	2,18x10 ⁻⁴	18,83	9,08x10 ⁻⁶	0,78	0,11
1689	245267	9333974	1,23x10 ⁻³	106,27	3,5x10 ⁻⁶	3,02	0,13
PS-1054	233279	9336236	9,94x10 ⁻⁴	85,88	4,32x10 ⁻⁵	3,73	0,14
PT 13 NPR	255600	9348000	1,21x10 ⁻²	1045,44	3,12x10 ⁻⁴	26,95	0,19

T: Transmissividade; K: condutividade hidráulica; μ : porosidade efetiva

A transmissividade (T) variou de $1,07 \times 10^{-4}$ m²/s (ou 9,2 m²/dia) a $2,80 \times 10^{-2}$ m²/s (ou 2419,2 m²/dia), com média de $5,9 \times 10^{-3}$ m²/s (ou 510,87 m²/dia); condutividade hidráulica (K) variou de $3,2 \times 10^{-6}$ m/s (ou 0,28 m/dia) e o maior $2,04 \times 10^{-3}$ m/s (ou 176,2 m/dia), com média de $2,82 \times 10^{-4}$ m/s (ou 24,3 m/dia); e, a porosidade efetiva variou de 0,09 a 0,23, com média de 0,15 (ou 15%). Esses parâmetros hidrodinâmicos são aproximados e apenas indicativos de ordem de grandeza. A porosidade efetiva é o parâmetro de mais difícil avaliação, cujo tempo de bombeamento deverá ser suficientemente longo tendo em vista a caracterização da drenagem retardada, típica de aquíferos livres.

No âmbito deste trabalho, a porosidade efetiva foi estimada com a aplicação de um método pouco convencional conforme apresentado anteriormente. O valor médio obtido foi comparado com valores de referência na literatura (BATU, 1998), de conformidade

com o tipo de rocha. No caso de arenitos finos, a porosidade efetiva varia de 2% a 40%, com média de 21%; para arenitos médios, a porosidade efetiva varia de 12% a 41%, com média de 27%; para siltitos, a porosidade efetiva varia de 1% a 33%, com média de 12%. A partir dos perfis de poços avaliados, o SAB na Região de Parnamirim é constituído de arenitos finos a grossos com percentual argiloso, desse modo o valor obtido para μ (15%) mostra-se aceitável.

A Figura 8 apresenta o mapa com a distribuição dos valores da transmissividade, no qual se pode verificar que as mesmas crescem na direção oeste – leste. No setor oeste as mesmas crescem de valores inferiores a 100 m²/dia até 400 m²/dia; no setor leste, as transmissividades aumentam de 400 até 700 m²/dia e no setor nordeste, na cidade de Parnamirim, as transmissividades atingem mais de 1000 m²/dia.

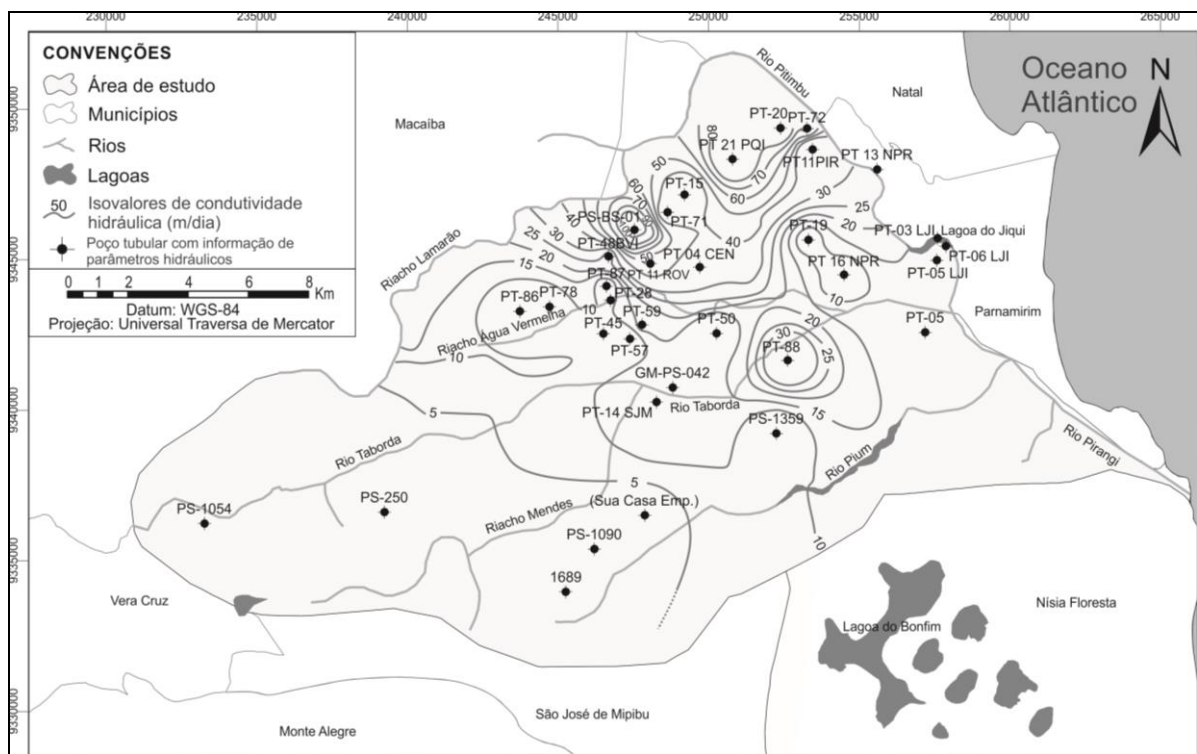


Figura 8 - Transmissividade do Sistema Aquífero Barreiras na Região de Parnamirim
Figure 8 - Transmissivity of the Barreiras Aquifer System in Parnamirim Region

A condutividade hidráulica apresenta em termos aproximados um comportamento similar à transmissividade. No setor oeste as condutividades hidráulicas crescem de valores inferiores a 5 m/dia até 20 m/dia; no setor leste as mesmas aumentam de 20 até 40 m/dia e no setor nordeste, na cidade de Parnamirim, as condutividade hidráulica atingem mais de 100 m/dia.

De conformidade com a configuração das equipotenciais (Figura 9), as linhas de escoamento estão orientadas na direção oeste - leste de forma similar à rede de drenagem superficial, sugerindo um comportamento típico de aquíferos livres. A região dos Tabuleiros corresponde às zonas de recarga, enquanto os

vales constituem as zonas de descarga de águas subterrâneas. Os gradientes hidráulicos são variáveis, com valores que mudam de pouco menos de 0,01% a mais de 1%. Os gradientes mais baixos ocorrem nas imediações de lagoas, o que se verifica devido ao aumento das cargas hidráulicas nesses domínios, apesar de que as condições de efluência das lagoas prevalecem. A vazão do fluxo subterrâneo (Q), obtida com a aplicação da Lei de Darcy, foi estimada tomando como referência a equipotencial de 30 m (frente de escoamento L de 24 km); gradiente hidráulico (I) de 1% e transmissividade média no setor correspondente de $8,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Aplicando esses valores na equação (6), resulta $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$.

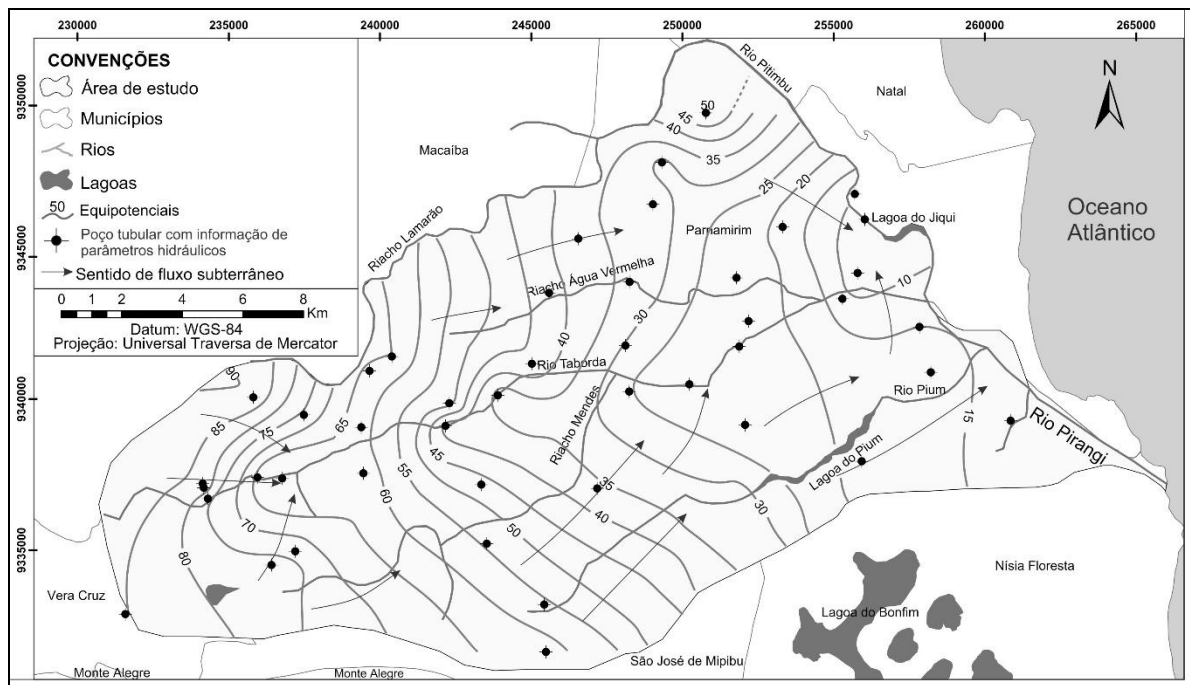


Figura 9 - Potenciometria do Sistema Aquífero Barreiras na Região de Parnamirim
Figure 9 - Potentiometry of the Barreiras Aquifer System in Parnamirim Region

A recarga das águas subterrâneas (R) foi estimada pelo método da variação de carga com a aplicação da equação que requer o conhecimento das reservas reguladoras (RR) do aquífero, das retiradas de água por bombeamentos (W) e da recarga urbana (R_u).

Sobre a área (A) de 370 km² de ocorrência do Sistema Aquífero Barreiras, com variação sazonal de carga de 1,6 m (dh) e porosidade efetiva de 15%, obteve-se as reservas reguladoras (RR) de $88,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (equação 7);

as retiradas de água do aquífero (W) foram avaliadas em $33,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. A recarga urbana foi avaliada com a aplicação das equações (8) e (9), conhecido o volume de água faturado (V_f) de $18,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e o volume de suprimento d'água da cidade de Parnamirim de $30,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, com a obtenção da R_u de $28,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. A aplicação desses resultados na equação (10) resulta na recarga (R) de $93,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou 253 mm/ano, que corresponde a uma recarga de 16,4% do total preci-

pitado de 1539 mm.

Para efeito de comparação a recarga das águas subterrâneas foi também estimada com a aplicação da Lei de Darcy mediante o conhecimento da vazão de fluxo subterrâneo ($Q = 60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$; Retiradas de água por bombeamento ($W = 33,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e recarga urbana ($R_u = 28,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, mediante a aplicação na equação (11), que forneceu a recarga (R) de $64,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou 175 mm/ano, correspondente a uma taxa de infiltração de 11,4%. Os dois métodos utilizados na avaliação da recarga apresentam incertezas, porém a aplicação da Lei de Darcy em geral fornece valores mais baixos que os outros métodos (MELO et al., 2013; MELO et al., 2014).

Nessas condições, foi tomado para recarga das águas subterrâneas no âmbito deste trabalho, o valor obtido pelo método da variação de carga, ou seja, 253 mm/ano e taxa de infiltração de 16,4%, bem mais próximo do valor de 18% obtido por Melo et al. (2014) para a Bacia do Rio Pirangi.

5 CONCLUSÕES

As águas subterrâneas da Região de Parnamirim estão armazenadas no SAB, de caráter predominantemente livre. As mesmas constituem a principal fonte de suprimento das populações urbanas e rurais. Cerca de 90% do volume de água bombeado de $30,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ destina-se ao suprimento hídrico da cidade de Parnamirim, que está situada no interior da área de estudo. A cidade desenvolve-se de forma expressiva e a mesma não dispõe de uma estrutura urbana adequada em termos de abastecimento, saneamento e drena-

gem, o que gera riscos em potencial para as águas subterrâneas, devido principalmente à recarga urbana atribuída aos esgotos.

Em caráter geral, as transmissividades do aquífero em todo o setor oeste da Região de Parnamirim são baixas com valores da ordem de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, e, poços com capacidade de produção da ordem de $10 \text{ m}^3/\text{h}$; no setor leste, as condições hidrogeológicas são bem mais favoráveis, principalmente na área da cidade de Parnamirim, cujas transmissividades do aquífero atingem valores superiores a $1000 \text{ m}^2/\text{dia}$ e poços produzem até $100 \text{ m}^3/\text{h}$; ao sul da cidade de Parnamirim, as transmissividades são mais modestas, da ordem de $400 \text{ m}^2/\text{dia}$ e poços com capacidade de produção de até $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Portanto, as potencialidades hidrogeológicas da região mudam nos seus diferentes compartimentos, sendo o aquífero Barreiras de maior potencial nas áreas urbanas e peri-urbanas, à nordeste da área estudada, onde está situada a cidade de Parnamirim. A recarga das águas subterrâneas na Região de Parnamirim foi avaliada em 253 mm/ano, o que corresponde a 16,4% do total precipitado.

Estes parâmetros hidrogeológicos, apesar de apresentarem incertezas, constituem subsídios para o desenvolvimento de estudos mais detalhados, como também servem de orientação quanto a utilização atual dos recursos hídricos por parte dos órgãos gestores e encarregados do uso das águas. Sugere-se, entretanto, que a exploração das águas subterrâneas seja realizada mediante monitoramento automatizado dos níveis da qualidade das águas subterrâneas, como forma de controlar a exploração, tendo em vista à utilização mais segura dos recursos disponíveis.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, L.M.P., E MOREIRA, R.C. Climatologia. In: Brasil, Ministério das Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, 1981. Folhas SB. 24-25 Jaguaribe-Natal. p. 706-728.

BATU, V. **Aquífer Hydraulics**: a comprehensive guide to hydrogeologic Data analyses. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 727p, 1998.

BEZERRA, F. H. R. Pliocene-quaternary fault control

of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. p. 61-75. 2001.

BORGES, A. N. **Implicações ambientais na bacia hidrográfica do Rio Pitimbú, RN, decorrentes das diversas formas de uso e ocupação do solo**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária da UFRN, 2002.

- DUARTE, C. R.; PETTA, E. A.; MEDEIROS, C. N.; ARAUJO, L. P. Mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia do rio Pitimbú, RN. **Anais II Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Aracaju, SE, 2004.**
- FOSTER, S. S. D; MORRIS, B.; LAWRENCE, A.; CHILTON, JOHN. Groundwater impacts and issues in developing cities – An Introductory review. In: **Groundwater in the Urban Environment**. Selected City Profiles. Volume 21 of the International Contributions to Hydrogeology. Rotterdam: A.A. Bakema, 1999.
- HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n.1, p. 91-109, 2002.
- IPT. **Estudo hidrogeológico detalhado do Estado do Rio Grande do Norte**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)/Secretaria de Planejamento do Estado do Rio Grande do Norte. Natal, v. 9, 1982.
- ISRAFILOV, R.G. Anthropogenic Changes to Hydrogeological Conditions in Urban Areas. Urban Groundwater Management and Sustainability. **NATO Science Series**. v. 74, p 11-28, 2006.
- KOBAYASHI, R. T.; MOREIRA, L. F. P.; ANDRADE, H. T. A. Pitimbu River low land portion water and sediment monitoring data, Natal, Brazil. **International Congress an Environment Modeling and software**, Ottawa, Canada, 2010.
- LUCENA, L.R.F.; QUEIROZ, M. A. Considerações sobre as influências de uma tectônica cenozoica na pesquisa e prospecção de recursos hídricos – o exemplo do litoral sul de Natal- RN, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas, ABAS**. v. 1, n. 15, p. 81-88, 1996.
- LUCENA, R. F. L.; ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, 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, ABAS**. v. 18, 2004.
- LUCENA, R. F. L.; BECEGATO, V. A.; CABRAL, J. B. P. Considerações sobre a potenciometria do aquífero Barreiras e a influência da estruturação regional nesse contexto – setor da bacia do rio Pirangi-RN. **Revista Eletrônica do Curso de Geografia do Campus Jatai – UFG**. N. 7, 2006.
- MELO, J.G.; QUEIROZ, M. A. The effects of urban development on the groundwater recharge and its quality in Natal, RN, Brasil. In: SEILER, K. P.; WOHNLICH, S. **New Approches Characterizing Groundwater Flow**. Netherland, v. 2, p. 1233 – 1236, 2001.
- MELO, J.G.; VASCONCELOS, M. B.; DE MORAIS, S. D.; ALVES, R. S.. Avaliação hidrogeológica da Zona Norte da cidade de Natal, RN, e os problemas associados ao desenvolvimento urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH**. v. 17, n. 1, p. 123-134, 2012.
- MELO, J.G.; DE MORAIS, S. D.; ALVES, R. S.; VASCONCELOS, M. B.. Avaliação dos recursos hídricos do Aquífero Barreiras na bacia do Rio Maxaranguape, RN. **Revista Agua Subterrânea, ABAS**, v. 27, n. 1, p. 53-64, 2013.
- MELO, J.G.; ALVES, R.S.; SILVA, J.G. Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Pirangi, RN. **Revista águas Subterrâneas**, n. 28, p. 68-81 ago. 2014.
- PAZDRO, Z. Hydrogeologia Ogólna, In: W.G. Warszawa. **Alvares e Niedzielski**, p.575, 1983.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 18-39, 2002.
- SERHID - Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos. **Quantificação da Oferta Hídrica, Elaboração do Plano de Gestão Integrada e Estudo de Alternativas de Reforço do Sistema Salto-Una-Timbo na Bacia do Rio Jacu no Rio Grande do Norte**. Dezembro, 2006.