



AVALIAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO AQUÍFERO BARREIRAS NA BACIA DO RIO MAXARANGUAPE-RN

GROUNDWATER RESOURCES EVALUATION OF THE BARREIRAS AQUIFER IN THE MAXARANGUAPE RIVER BASIN – RN

José Geraldo de Melo¹, Samara Danniele Oliveira de Morais², Rafaela Alves da Silva³,
Mickaelon Belchior de Vasconcelos⁴

Artigo recebido em: 07/05/2012 e aceito para publicação em: 26/01/2013

Abstract: The Barreiras aquifer in the inferior course of the Maxaranguape river hydrographic basin, RN, is the main source of water to supply the population, the demands for irrigation and industrial use. The use of groundwater is done, however, without adequate planning, resulting therefore in an inefficiency water use. The objective of this work is to search about the hydrogeologic potentialities of the Barreiras Aquifer and the exploitation condictions of the groundwater with sustainability in view of the water use maximization to supply specific demand that may contribute to the economic social development and life quality to the population. With this goal was performed the water infrastructure survey; evaluated the admeasurements and structure of the Barreiras Aquifer; recharge estimated; evaluated the quality groundwater and the condition to groundwater exploitation. The recharge was evaluated using different methodology: water balance, hydrologic method and Darcy low applied to the saturated porous media. The exploited resource were evaluated in 8 million m³/year which corresponds only 9,4% of the recharge estimated in 213 mm/year or 85 million m³/year. The groundwater is Na⁺ - Cl⁻ type, low salinity and good quality to human use and agricultural development.

Keywords: Groundwater flow. Recharge. Quality water. Exploitable resources.

Resumo: As águas do Aquífero Barreiras, no curso inferior da bacia hidrográfica do Rio Maxaranguape, constituem a principal fonte de suprimento hídrico das comunidades locais, dos projetos de irrigação e de demandas industriais. O uso das águas subterrâneas é feito, entretanto, sem um planejamento adequado, resultando, por conseguinte, na ineficiência do uso da água. O objetivo principal deste trabalho é a avaliação das potencialidades hidrogeológicas do Aquífero Barreiras e das condições de exploração das águas subterrâneas tendo em vista a maximização do uso das mesmas com sustentabilidade, no atendimento a demandas específicas que venham contribuir com o desenvolvimento sócio-econômico da região e a qualidade de vida da população. Neste sentido, foi efetuado um levantamento de toda infraestrutura hídrica; avaliada as dimensões, litologia e estrutura do aquífero Barreiras; estimada a recarga; avaliada a qualidade das águas e apresentadas estratégias de proteção das mesmas. A recarga foi estimada com a aplicação de diferentes metodologias: balanço hídrico; método hidrológico e lei de Darcy aplicada ao meio poroso saturado. Os recursos de águas subterrâneas explorados foram avaliados em 8,0 milhões de m³/ano, os quais correspondem apenas a 9,4 % da recarga, estimada em 213 mm/ano ou 85 milhões de m³/ano. As águas subterrâneas são em geral do tipo Na⁺ - Cl⁻, de baixa salinidade e boa qualidade para o uso humano e desenvolvimento agrícola.

Palavras-Chave: Fluxo subterrâneo. Recarga. Qualidade das águas. Recursos explotáveis.

INTRODUÇÃO

A área de estudo, com superfície efetiva de 400 km², situa-se no curso inferior da Bacia Hidrográfica do Rio Maxaranguape, na Costa Leste do Estado do Rio Grande do Norte, numa região conhecida como região dos “vales úmi-

dos” (Figura 1). Esta denominação é devido à ocorrência de rios e riachos perenes associados à elevada precipitação pluviométrica, e pela presença expressiva de águas subterrâneas freáticas, armazenadas no sistema Aquífero Barreiras.

¹ UFRN (jgmelo@ufrnet.br)

² samaradanielle.morais@yahoo.com.br

³ alves.rafaelasilva@yahoo.com.br

⁴ mickvascoceles@yahoo.com.br

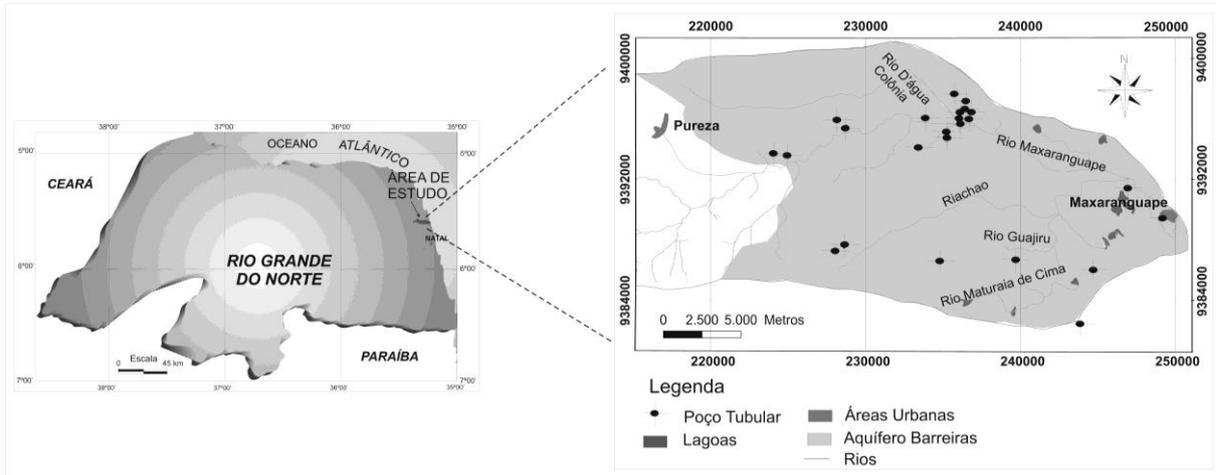


Figura 1 - Localização da área de estudo e situação dos poços e piezômetros utilizados nas avaliações hidrogeológicas.

Figure 1 - Study area and location of the wells and piezometers used in the hydrogeological assessments.

As águas subterrâneas do Aquífero Barreiras constituem a principal fonte de suprimento hídrico da região. Estima-se, entretanto, que o uso das águas subterrâneas deste aquífero não ultrapassa 10% dos recursos anuais exploráveis (PERHSERHID/RN, 1998). Apesar da elevada potencialidade atribuída regionalmente a esse aquífero, o mesmo é bastante heterogêneo e apresenta diferentes condições de exploração em diferentes setores de sua ocorrência (IDEMA, 2006 e SILVA, 2006). Devido a esse comportamento, o desenvolvimento de estudos em áreas localizadas tem sido em muitos casos, motivo de surpresas.

O presente trabalho foi elaborado com base nos Estudos Hidrogeológicos desenvolvidos na Bacia do Rio Maxaranguape para o Plano Diretor dessa bacia (IBI, 2010), o qual teve como objetivo principal o conhecimento das potencialidades hidrogeológicas e das condições para a exploração das águas subterrâneas, tendo em vista a maximização do uso das mesmas para o suprimento de demandas específicas que venham contribuir com o desenvolvimento sócio-econômico da região e qualidade de vida da população. Neste sentido, foi feita a avaliação das dimensões do Aquífero Barreiras, de seus parâmetros hidrodinâmicos, da recarga e da qualidade das águas subterrâneas. Para a caracterização das dimensões, litologia e estrutura hidrogeológica do terreno foram utilizadas fotografias aéreas, imagens de satélite e correlação de perfis de poços já existentes. Os resultados do cadastramento de poços realizado em campo permitiram o conhecimento de toda a infraestrutura hídrica existente e dos recursos anuais de águas subterrâneas explorados. A recarga foi estimada com a aplicação de diferentes metodologias: balanço hídrico; lei de Darcy aplicada ao meio saturado e método hidrológico. As condições de exploração

das águas subterrâneas foram definidas, porém, recomendações visando a proteção das mesmas são apresentadas notadamente tendo em vista o caráter preliminar da pesquisa realizada.

As águas subterrâneas do Aquífero Barreiras na área são utilizadas no suprimento hídrico da cidade de Maxaranguape e distritos situados sobre o seu domínio, além do uso industrial e agricultura irrigada. No período seco, o uso das águas subterrâneas para o desenvolvimento da agricultura irrigada é intensificado e no período de chuvas há uma redução substancial nas descargas bombeadas e no regime de bombeamento. Tomando por base 120 poços tubulares existentes com produtividade em média de 30,0 m³/h, e regime de bombeamento 6/24 h, foi obtida a descarga total anual explorada de aproximadamente 7,9x10⁶ m³/ano. No domínio da área existe um número bastante elevado de poços escavados (cacimbões), cujo uso das águas se limita a vazões muito baixas, em média de 200 l/dia. Dentro de um universo de 300 cacimbões, foi estimada uma descarga de 21,9x10³ m³/ano. Assim sendo, a oferta já disponibilizada de água subterrânea para a população é da ordem de 8,0 x10⁶ m³/ano.

Situação hidrogeológica

As dimensões, litologia e estrutura hidrogeológica do sistema Aquífero Barreiras foram avaliadas com base nos perfis litológicos e construtivos de 25 poços tubulares que penetram este aquífero (Figura 1), cujas profundidades variam de 30 m a 100 m.

O Aquífero Barreiras é formado por sedimentos Tércio-Quaternários do Grupo Barreiras. A correlação dos perfis de poços mostra que, na parte superior dos mesmos, há uma predominância de arenitos finos e argilosos e, na parte inferior os

sedimentos são formados por clásticos médios a grosseiros (Figura 2). Isso, atribui ao Aquífero Barreiras a condição de um sistema livre, com semi-confinamentos localizados. A sua espessura varia de 35,0 a 72,0 m, e, a espessura saturada varia de 13,0 a 50,0 m. Essas espessuras estão con-

dicionadas a estrutura geológica, ressaltando-se, entretanto, que há uma tendência de aumento das espessuras saturadas no sentido oeste para leste ou de montante para jusante na direção do fluxo superficial, apesar de que falhamentos inversos podem reverter esse comportamento.

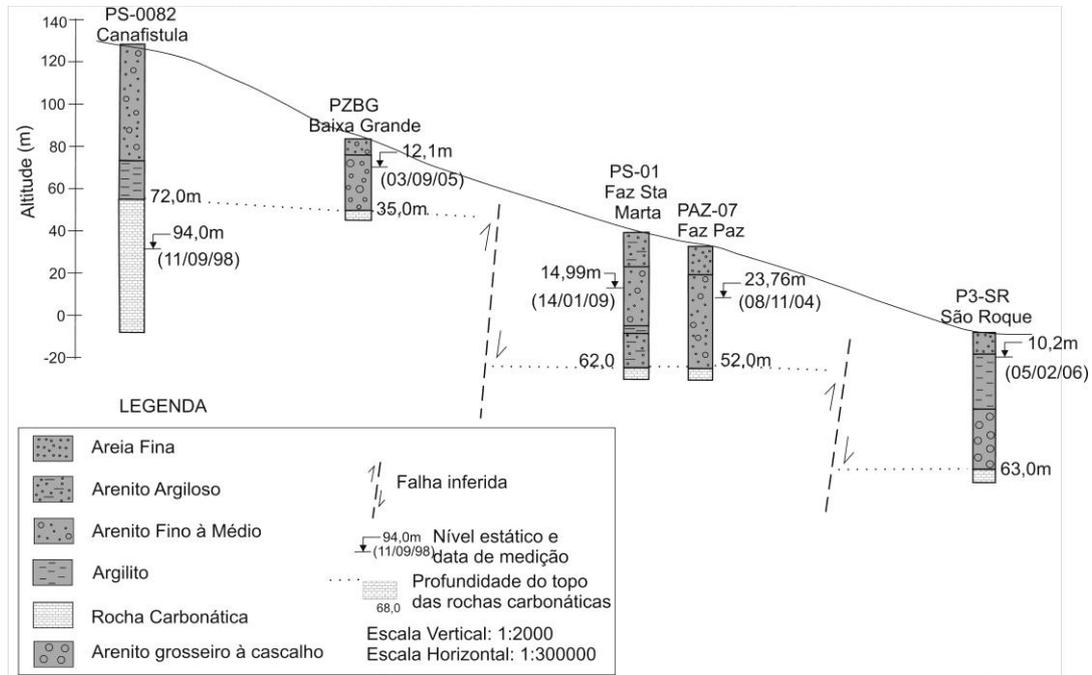


Figura 2 - Seção hidrogeológica no Aquífero Barreiras (sentido oeste – leste).

Figure 2 - Hydrogeological Section of the Barreiras aquifer (direction west - east).

Os parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Barreiras foram avaliados com base na interpretação de resultados de 22 testes de bombeamento de poços e 2 testes de aquífero com dispositivo de poço de observação (piezômetro). Os valores médios obtidos foram: Transmissividade: $3,0 \times 10^{-3}$ m²/s; Condutividade hidráulica: $1,0 \times 10^{-4}$ m/s e espessura saturada do aquífero: 33,0 m.

Padrão do fluxo subterrâneo

A configuração das equipotenciais (Figura 3) indica a presença de um fluxo subterrâneo freático dirigido da região dos tabuleiros do “Barreiras” em direção aos vales dos principais rios e riachos. Assim sendo, efetivamente, a recarga ocorre nos domínios dos tabuleiros e a descarga de água se verifica principalmente no domínio do vale do Rio Maxaranguape e do riacho Riachão.

A descarga natural do fluxo subterrâneo foi avaliada com a aplicação da lei de Darcy pela equação:

$$Q = TIL$$

Onde:

T é a transmissividade, de $3,0 \times 10^{-3}$ m²/s; I é o gradiente hidráulico médio, de 0,014 m/m e L é a frente de escoamento, de 65 km.

Aplicando-se a equação, resulta na descarga de 2,55 l/s, que corresponde ao somatório das descargas parciais em direção ao Rio Maxaranguape e riacho Riachão. O valor da transmissividade do aquífero utilizado corresponde ao valor médio obtido com base na interpretação dos testes de bombeamento; e, a frente de escoamento corresponde ao somatório das frentes de escoamento parciais em direção ao Rio Maxaranguape e riacho Riachão.

Recarga das águas subterrâneas

A recarga das águas subterrâneas constitui um parâmetro de fundamental importância no conhecimento e manejo adequado dos aquíferos (HEALY & COOK, 2002). Não se pode explorar e garantir o uso sustentável de um aquífero ou reserva de água subterrânea sem o conhecimento dos mecanismos e do montante da recarga anual a que o mesmo é submetido.

Em um sistema livre como o do Aquífero Barreiras na bacia do Rio Maxaranguape não se pode explorar um volume de água do aquífero maior do que a recarga anual, sob risco de induzir a rebaixamentos indesejáveis e afetar as captações d’água e o próprio aquífero. A própria recarga nem

sempre pode ser explorada integralmente, devendo, por conseguinte, serem observados os aspectos ambientais envolvidos.

Várias técnicas são disponíveis para quantificar recarga, entretanto, a escolha de técnicas apropriadas é frequentemente difícil. Técnicas baseadas em dados de águas superficiais e da zona insaturada geralmente fornecem estimativas da

recarga potencial, enquanto que aquelas baseadas em dados de águas subterrâneas fornecem estimativas da recarga real (SCANLON *et al*, 2002). As dúvidas associadas a cada método corroboram a necessidade de aplicar várias técnicas distintas para aumentar a confiabilidade nas estimativas da recarga.

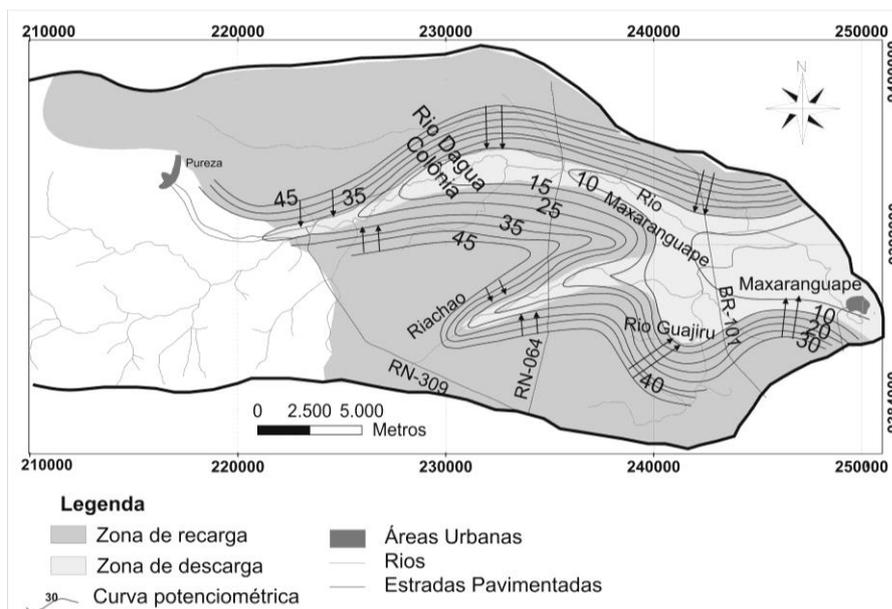


Figura 3 - Mapa potenciométrico e fluxo das águas subterrâneas.

Figure 3 - Potentiometric map and groundwater flow.

Ressalta-se, que a recarga foi estimada com a aplicação de diferentes metodologias para que se pudesse comparar e adequar resultados e, por conseguinte se ter um valor o mais real possível, devendo-se ressaltar quanto a possíveis aproximações pela aplicação de um determinado método, devido à escassez de dados.

Em sistemas aquíferos livres, como é o caso do Aquífero Barreiras, suas potencialidades estão condicionadas principalmente as infiltrações diretas das águas de chuva, cujo volume efetivamente infiltrado restitui as reservas de águas subterrâneas que se perdem nos escoamentos naturais e na exploração por poços e, também, alimentam o fluxo subterrâneo. Por definição, em condições de equilíbrio, sem considerar a exploração por poços, a infiltração eficaz é equivalente à vazão do fluxo subterrâneo natural e às reservas reguladoras.

Método climatológico

Uma primeira estimativa da recarga foi efetuada a partir do balanço hidroclimatológico

mensal, tomando o excedente hídrico anual de 186,5 mm (IBI, 2010) e a precipitação pluviométrica de 1200,0 mm, o que resulta numa taxa de infiltração em potencial de 16% do total precipitado. A área efetiva de ocorrência do Aquífero Barreiras é de 400 km², portanto, a recarga absoluta, correspondente, é de 74,6x10⁶ m³/ano.

Método de hidrologia de superfície (esgotamento de uma bacia)

Um curso de água ou uma fonte, na ausência de precipitação, e, portanto, em regime não influenciado, se alimenta mediante as águas subterrâneas correspondentes as reservas reguladoras das camadas aquíferas, acumuladas na bacia vertente ou nas estruturas hidrogeológicas no transcurso de uma determinada recarga (Figura 4).

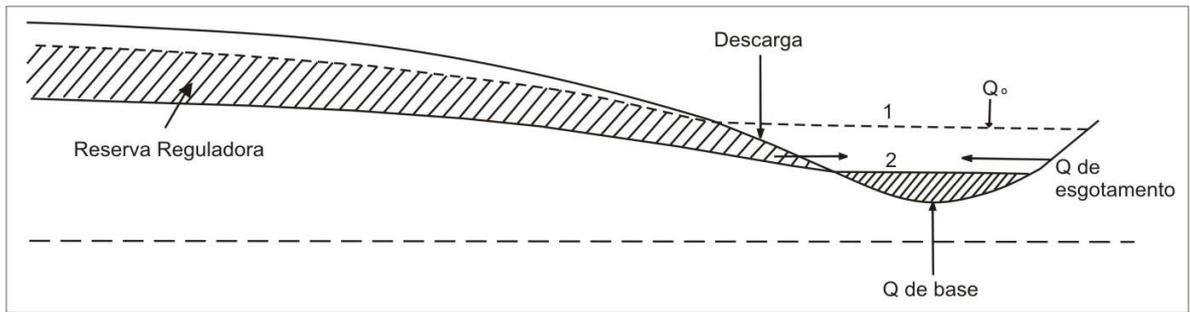


Figura 4 - Descargas das reservas reguladoras que alimentam um curso de água.

Figure 4 - Discharges of the regulating reserves that feed a stream.

A curva de esgotamento, parte final da curva de rebaixamento de um hidrograma de uma bacia, ou seja, das vazões em função do tempo, expressa a lei da descarga de uma camada aquífera (Figura 5), a qual pode ser expressa pela seguinte equação exponencial (FETTER, 2001; ALFARO *et al*, 2006)

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\mu t}$$

Onde:

Q_t é a vazão no instante t , em m^3/s ;

Q_0 é a vazão no início do esgotamento (instante t_0), em m^3/s ;

$e = 2,717$, a base dos logaritmos neperianos;

μ é o coeficiente de esgotamento da bacia;

t é o tempo transcorrido desde o começo do esgotamento em dias.

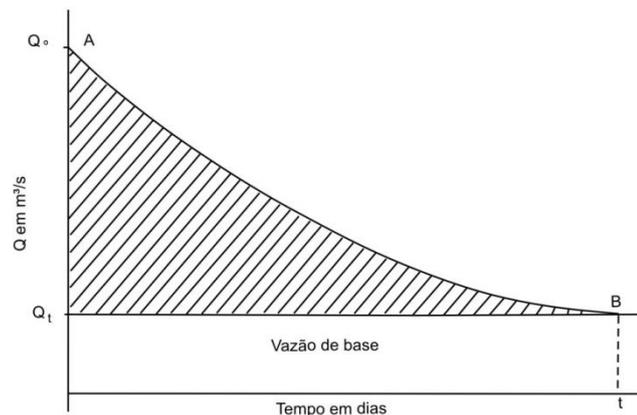


Figura 5 - Curva de esgotamento do hidrograma de fluxo.

Figure 5 - Depletion curve of the flow hydrograph.

Dispõe-se de dados de medições da descarga de recessão na bacia do Rio Maxaranguape, em uma campanha com 10 medições compreendidas entre Agosto de 2007 e Fevereiro de 2008, em duas seções: uma delas no próprio Rio Maxaranguape (BR-101) e a outra no riacho Riachão (BR-101), (FUNPEC, 2008). A aplicação dos dados à equação do esgotamento ou recessão levou a obtenção dos seguintes valores dos coeficientes de esgotamento da bacia (FUNPEC, 2008) nas seções do Rio Maxaranguape (BR101) e riacho Riachão (BR 101):

Seção do Rio Maxaranguape: $\mu=0,0031$

Seção do riacho Riachão: $\mu=0,0066$

As equações das curvas de esgotamento ficam assim definidas:

$$Q_t = 2,86 \cdot e^{-0,0031t} \text{ (Rio Maxaranguape)}$$

$$Q_t = 1,50 \cdot e^{-0,0066t} \text{ (Riachão Riachão)}$$

Observa-se que 2,86 m^3/s é a vazão do Rio Maxaranguape no início do esgotamento e 1,50 m^3/s corresponde a vazão do riacho Riachão também no início do esgotamento.

As reservas reguladoras (RR) do aquífero podem ser expressas pela seguinte equação no instante t_0 (Castany, 1974):

$$RR = \int_{t_0}^{\infty} Q_t \cdot dt,$$

ou

$$RR = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 e^{-\mu t} dt, \quad \text{com } t \text{ em segundos.}$$

$$\text{Obtendo-se: } RR = \frac{Q_0}{\alpha}$$

$$\text{ou}$$

$$RR = \frac{86400 Q_0}{\alpha}$$

Aplicando esta equação aos respectivos casos em avaliação se obtém:

$$RR_M = 80 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ (Seção Rio Maxaranguape)}$$

$$RR_R = 20 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ (Seção do riacho Riachão)}$$

No caso da seção do Rio Maxaranguape o valor obtido para as reservas reguladoras está incluindo toda a bacia até o ponto de medição, inclusive a contribuição da fonte de pureza, que se localiza na cidade de mesmo nome, imediatamente a montante da área de ocorrência do Aquífero Barreiras (Figura 3). A fonte de Pureza origina-se de rochas carbonáticas da Formação Jandaira através de um sistema de fraturas, e, torna o Rio Maxaranguape perene. Para efeito de estimativa das reservas reguladoras do Aquífero Barreiras, como medida de segurança, a descarga da fonte de Pureza foi tomada como equivalente ao valor máximo registrado até o momento, de 1548 m³/h (IBI, 2010) ou o equivalente a 13,56x10⁶ m³/ano. Nessas condições, as reservas reguladoras obtidas, correspondentes à seção do Rio Maxaranguape (BR-101), serão subtraídas de 7,3x10⁶ m³/ano. Este valor corresponde à contribuição efetiva da fonte de Pureza após a captação de um volume de 6,2x10⁶ m³/ano para abastecimento de cidades e comunidades no domínio semi-árido. Assim sendo, as RR do Aquífero Barreiras correspondentes a seção do Rio Maxaranguape são da ordem de grandeza de 72,7x10⁶ m³.

A RR efetiva do Aquífero Barreiras na bacia do Rio Maxaranguape é o somatório dos valores obtidos para as seções no Rio Maxaranguape e no riacho Riachão, ou seja, são da ordem de grandeza de 92,7x10⁶ m³.

Admite-se que no curso superior da bacia, a contribuição de água subterrânea das rochas das formações Jandaira e Açú (da Bacia Potiguar), no processo de recarga do Aquífero Barreiras, é muito pequena ou praticamente nula. A fonte de Pureza, situada nas imediações do limite oeste da área, origina-se dos calcários da Formação Jandaira através de aberturas por fraturamento e processos de dissolução das rochas (carste), pela ação das águas de infiltração, provavelmente, com recarga através dos sedimentos do Grupo Barreiras.

A avaliação da recarga das águas subterrâneas com base nas reservas reguladoras requer situações de equilíbrio hidrodinâmico. Para um aquífero sob exploração, como é o caso do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Maxaranguape, na verdade, a recarga corresponde ao somatório das

reservas reguladoras com o volume anual de água bombeado do aquífero, apesar de que uma parcela do volume bombeado volta ao aquífero através de excedentes da irrigação. Como medida de segurança a recarga do aquífero será tomada como equivalente às reservas reguladoras obtidas, ou seja, o volume de 92,7x10⁶ m³ ou 231,7 mm/ano, o que corresponde a 20% do total precipitado.

Aplicação da lei de Darcy no meio poroso saturado

Conforme apresentado anteriormente, a vazão anual do fluxo subterrâneo natural em condições de equilíbrio corresponde à recarga anual das águas subterrâneas. A vazão do fluxo subterrâneo foi estimada em 2,55 l/s. Tomando este valor como referência a um ano hidrológico obtêm-se para a vazão do fluxo subterrâneo um valor da ordem de 80,0x10⁶ m³/ano.

Considerando que o sistema aquífero está em bombeamento, na avaliação da recarga das águas subterrâneas pela lei de Darcy é necessário compensar o volume de água anual explorado, ou seja, a recarga efetiva corresponde ao somatório da vazão de fluxo subterrâneo anual mais o volume bombeado anualmente do aquífero que, foi estimado em 8,0x10⁶ m³, o que resulta em 88,0x10⁶ m³/ano. Convém lembrar que, nos domínios sob irrigação, parte do volume de água bombeado volta ao aquífero através dos excedentes de irrigação, que não foram avaliados no presente trabalho. Em uma primeira aproximação, a recarga das águas subterrâneas, pela aplicação do método da Lei de Darcy, será tomada como equivalente ao valor obtido de 88,0x10⁶ m³/ano ou 220 mm/ano. A taxa de infiltração neste caso é, portanto, de 17,6%.

Considerações sobre os diferentes métodos aplicados na avaliação da recarga das águas subterrâneas

Os diferentes métodos aplicados na avaliação da recarga das águas subterrâneas do Aquífero Barreiras permitiram a obtenção de valores indicadores de ordem de grandeza da recarga e suscitam restrições quanto a aplicação dos mesmos.

O balanço hidroclimatológico fornece uma indicação potencial da recarga das águas subterrâneas. Neste caso, uma parcela dos 74,6x10⁶ m³/ano, obtido para uma área efetiva de ocorrência do aquífero de 400 km², pode corresponder a um volume de água do escoamento superficial, e, neste caso, a recarga pode ser inferior a este valor. Por outro lado, o balanço hidroclimatológico tomado como referência na estimativa de recarga foi elaborado com base em resultados da estação meteorológica de Ceará Mirim, que reconhecidamente

apresenta um caráter de semi-aridez mais acentuado do que a área no curso inferior do Rio Maxaranguape, e, por conseguinte, a estimativa de recarga potencial poderia ter sido superior ao valor obtido.

A avaliação da recarga com base em dados hidrológicos (92,7x106 m3/ano) foi baseada em um número pequeno de medições e em dados de apenas um ano hidrológico, de forma que os resultados podem estar sujeitos a ajustes. Além disso, a complexidade hidrogeológica decorrente da contribuição da Fonte de Pureza torna mais difícil a avaliação das reservas reguladoras, influenciando na precisão dos resultados e, por conseguinte, na avaliação da recarga.

A avaliação de recarga com base na Lei de Darcy, aplicada ao meio poroso saturado, em geral fornece valores inferiores àqueles obtidos por outros métodos. No caso da recarga com base na Lei de Darcy, a vazão do fluxo subterrâneo natural foi obtida com base em um mapa potenciométrico elaborado a partir de um número reduzido de pontos, porém, outros aspectos fundamentais foram considerados no traçado das equipotenciais, tais como: o caráter predominantemente livre do sistema aquífero, a configuração do relevo e a disposição da rede de drenagem.

Avaliação hidroquímica e Qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Barreiras

Resultados das análises químicas

A avaliação hidroquímica e a qualidade das águas do Aquífero Barreiras, na bacia hidrográfica do Rio Maxaranguape, foi feita com base

nos resultados de 14 análises químicas. Os parâmetros hidroquímicos avaliados foram: cátions principais (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2}) e ânions principais (Cl^- , SO_4^{-2} e HCO_3^{-}); compostos da série nitrogenada (NO_3^- , NO_2^- e NH_4^+); além de temperatura, pH, Condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), Fe^{+2} , alcalinidade e dureza.

Os resultados das análises foram submetidos a um balanço iônico para avaliar a consistência dos mesmos. Com esta finalidade, inicialmente, foi efetuada a conversão dos valores em unidade de mg/L para meq/L e, em seguida foram avaliados o percentuais de cada cátion e ânion com relação ao somatório dos respectivos cátions e ânions. O erro de cada análise foi avaliado pela equação:

$$\text{Erro}(\%) = \frac{\sum(\text{cations}) - \sum(\text{anions})}{\sum(\text{anions} + \text{cations})} \times 100$$

Análises de alta qualidade devem fornecer erros inferiores a 2,5%; erro compreendido entre 2,5 e 5% é considerado bom, e, um erro de 5% a 10% é permissível. Um erro igual ou maior que 10% não é aceitável ou não se presta para interpretações hidrogeoquímicas (LLOYD & HEATHCOTE, 1985). Os resultados das análises são apresentados na Tabela 1. O balanço de íons aplicado aos resultados das análises indicou uma diferença percentual entre cátions e ânions com erros variando de 0,3 a 16%. Dois casos com erro superior a 10% não foram utilizados nas avaliações hidroquímicas e de qualidade das águas (P3-SR e 5GAIA4).

Tabela 1 - Resultados das análises Químicas.

Table 1 - Results of chemical analysis.

Poço	pH	C	STD	NO_3^-	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Fe^{+2}	HCO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-
		$\mu\text{S}/\text{cm}$						mg/L				
PS0494	6,4	48,7		0,64	1,21	0,98	5,38	6,15	0,08	10,95	0,58	12,89
PS0227	6,6	61,2		0,34	2,65	0,62	8,07	2,5	0,02	13,14	0,31	13,07
PS0820	6,6	75,9		0	3,74	0,91	4,35	4,44	0,03	18,77	0,15	9,5
PS0819	6,3	50,92		0	0,37	0,8	5,45	0,56	1,46	5	0,26	14
PS0183		78,5	38,4	0,11	1,22	2,23	8,46	6	0,36	12,94	1,59	17,97
PAZ-06	5,5	45,61	30,1	0,6	0,97	3,88	6,11	1,29	0	7,41	1,92	16,57
PAZ-05	5,8	48,5		1	0,1	0,1	4,6	1,6	0	4,9	0	6,7
PAZ-04	7,1	49,2		2,6	0,6	0,6	7,4	0,9		9,2	0	13,5
PAZ-03	5,8	51,5		1	0,1	0,1	4,6	1,6	0	6,1	0	6,7
PAZ-02	6,2	64,8			2,2	0,4	4,6	2	0	11	0	6,7
PAZ-01	5,6	52,2			1,2	1,7	6	1,2	0	2,4	0	13,1
P3-SR	6,8	168,7	78,0	4,9	6,8	5,45	7,9	4,4	0,15	13	11,9	37
PS-C	5,7	30,2	19,6	1,99	1,26	2,5	8	1,54	0,02	9,4	4,23	15
5GAIA4	5,9	61,3	18,0	4,00	14,3	3,00	5,6	4,2	0,3	4,3	7,6	22,3

Interpretação de resultados das análises químicas

O pH variou de 5,5 a 7,1, com média de 5,88, ou seja, são em geral águas ácidas. O valor mínimo da condutividade elétrica foi de 30,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o máximo de 168,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 63,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que permite caracterizá-las como águas de salinidade muito baixa. O sódio variou de 4,35 mg/L a 8,46 mg/L, com média de 6,05 mg/L, e, o cloreto de 6,7 mg/L a 22,3 mg/L, com média de 12,93 mg/L, atestando o baixo nível de salinização dessas águas. O potássio variou de 0,56 mg/L a 6,15 mg/L, com média de 2,61. A baixa concentração de potássio com relação ao sódio é devido à adsorção do potássio pelas argilas. A concentração de cálcio variou de 0,37 mg/L a 14,3 mg/L, com média de 2,59 mg/L, e, o magnésio de 0,1 mg/L a 3,88, com média de 1,37 mg/L. O valor mínimo de bicarbonato obtido foi de 2,4 mg/L e o máximo 18,77 mg/L, com média de 8,89 mg/L. Com relação ao nitrato, os valores obtidos são inferiores a 5

mg/L, não havendo, portanto, indícios de contaminação por atividades antrópicas.

Os resultados das análises químicas estão representados no Diagrama Trilinear de Piper (Figura 6). A maioria dos pontos de água está situada num mesmo domínio hidrogeoquímico, cujas águas, na sua maioria, são do tipo $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ (cloretadas sódicas). Este, provavelmente, representa o tipo de água de recarga, proveniente das precipitações pluviométricas, sob a influência dos aerossóis marinhos, conforme sugere a proximidade do mar e o baixo nível de salinidade das águas subterrâneas. Ocorrem dois casos de águas do tipo $\text{Mg}^{+2}\text{-Cl}^-$ (cloretadas magnesianas), que podem estar indicando uma mudança de trocas de íons, do sódio pelo magnésio ou simples mistura de águas. Ocorre um caso de águas $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ (bicarbonatadas sódicas), que pode representar um condicionamento local com maior aporte de CO_2 .

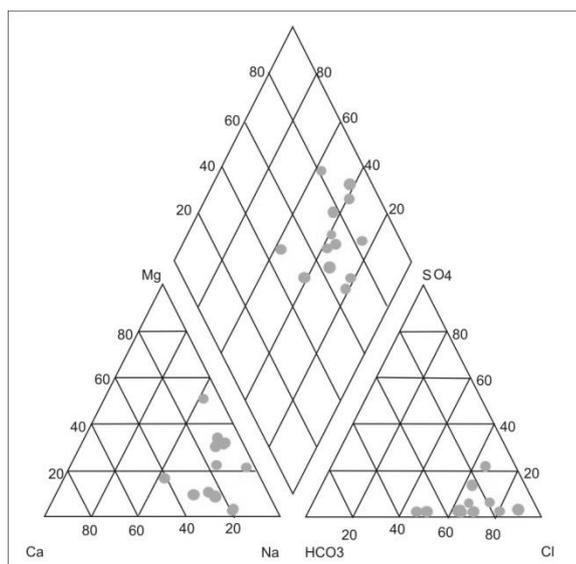


Figura 6 - Representação dos resultados das análises químicas no diagrama de Piper.
Figure 6 - Representation of the chemical analysis results in the Piper diagram.

A qualidade das águas para o uso humano foi avaliada com base nos limites de portabilidade estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e a Portaria MS 2914/2011 do Ministério da Saúde para potabilidade de águas subterrâneas. De conformidade com os resultados das análises, são feitas restrições às águas dos poços PS0183 e PS819 quanto a aos teores de ferro, com valores de 0,36 e 1,46 mg/L, respectivamente, sendo que o limite máximo permitido é de 0,3 mg/L. As restrições ao ferro são de ordem estética, não tendo, portanto, implicações direta sobre a saúde do homem. O processo de oxidação do ferro traz diversos problemas para o abastecimento público de

água: confere cor e sabor à água, provocando manchas em roupas e em utensílios sanitários. Também, traz o problema ao desenvolvimento de incrustações em canalizações, e, de ferro-bactérias, provocando a contaminação biológica da água na própria rede de distribuição.

Quanto ao uso na irrigação, a qualidade das águas foi avaliada sob três aspectos fundamentais: salinidade (C), sodicidade (S) e toxicidade (T) de íons. O efeito da salinidade é de natureza osmótica podendo afetar diretamente o rendimento das culturas; a sodicidade se refere ao efeito relativo do sódio da água de irrigação tendendo a elevar a porcentagem de sódio trocável no solo (PST), com

danos nas suas propriedades físico-químicas, provocando problemas de infiltração; a toxicidade, diz respeito ao efeito específico de certos íons sobre as plantas, afetando o rendimento, independente do efeito osmótico (AYERS & WESTCOT, 1991; HOLANDA, 1998).

De acordo com a salinidade, as águas são classificadas em quatro categorias à medida que aumenta a concentração de sais e consequentemente sua condutividade elétrica, recebendo denominações sucessivas de C₁, C₂, C₃ e C₄, conforme apresentado a seguir (RICHARDS, 1954):

C₁ - Água de baixa salinidade. Pode ser usada para irrigação da maioria das culturas e em

todos os tipos de solos; C₂ - Água de média salinidade. Pode ser usada sempre quando houver uma lixiviação moderada de sais. C₃ - Água de alta salinidade. Não pode ser usada em solos com drenagem deficiente. C₄ - Água de salinidade muito alta de uso limitado no desenvolvimento de culturas.

Quanto ao risco de sodicidade as águas podem ser divididas em quatro classes, as quais levam em consideração o risco de adsorção de sódio (RAS) e a CE (Figura 7), conforme estabelecido por Richards (1954) e apresentado a seguir:

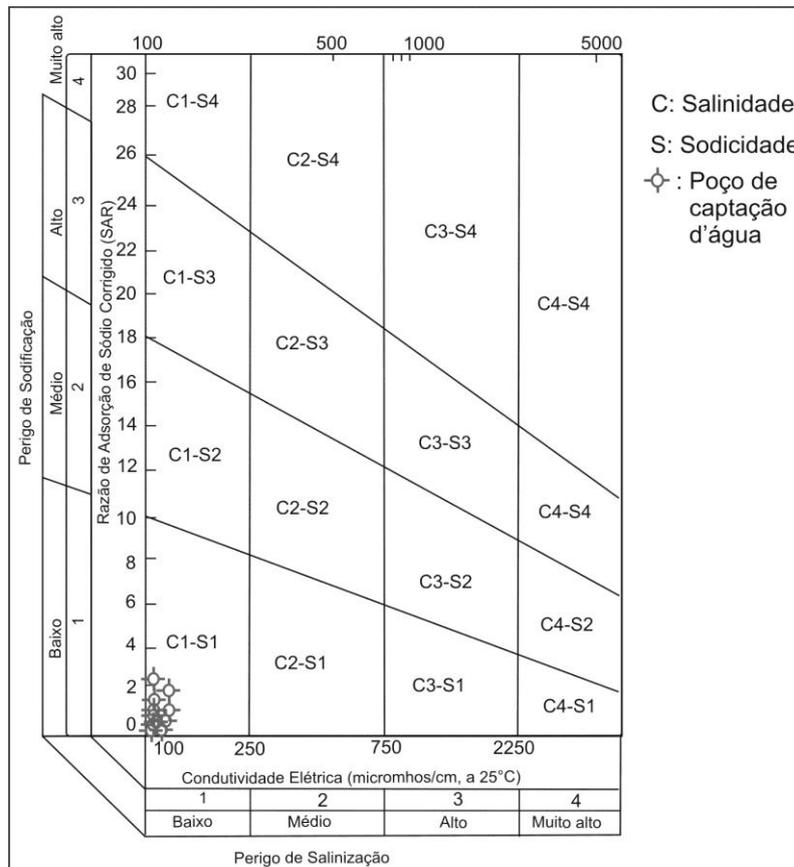


Figura 7 - Classificação das águas subterrâneas quanto ao uso na irrigação.
Figure 7 - Groundwater classification for the use in irrigation.

S₁- Água com baixa concentração de sódio. Pode usar-se na maioria dos solos com escassas possibilidades de alcançar elevadas concentrações de sódio intercambiáveis; S₂- Concentração de sódio média. Já requer um manejo adequado dos solos, para evitar problemas de sódio trocável; S₃-Água com alto conteúdo de sódio. O risco de sódio trocável é maior e requer cuidados especiais e manejo adequado; S₄-Água com conteúdo de sódio muito elevado. Em geral é inadequada para irrigação.

O RAS definido por Richards (1954) foi submetido à avaliação e proposta uma correção (SUARES, 1981), que facilita o entendimento das alterações que ocorrem com o cálcio na água do solo, através de reações com carbonatos e silicatos. Nestas condições, o RAS é calculado pela seguinte equação:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca^0 + Mg)}{2}}}$$

onde,

RASO é a Razão de adsorção de sódio corrigida;

Na, é a concentração de sódio na água, em mmol_c/L ;

Ca_c, é a concentração de cálcio na água, corrigida pela relação HCO₃⁻/Ca+2 em mmol_c/L e C em dS/m, segundo Suarez (1981);

Mg, é a concentração de Magnésio na água, em mmol_c/L.

As águas foram ainda classificadas segundo os riscos de toxicidade, em decorrência de concentrações de sódio, cloreto e boro nas águas de irrigação. Segundo Ayres & Westcot (1991) as águas podem ser divididas em três classes conforme apresentado a seguir (Tabela 2):

Tabela 2 - Riscos de toxicidade às plantas.
Table 2 - Risk of toxicity plants.

Íon	Classes de água para irrigação		
	T1	T2	T3
	Nenhum problema	Problema moderado	Problema severo
Sódio ou cloreto (mmol_c/L)			
- Irrigação por superfície	<3	3- 9	>9
-Irrigação por aspersão	< 3	>3	
Boro (mg/L)	< 0,7	0,7 – 3	> 3

Fonte: Ayers & Westcot (1991)

T1- Água com concentração de sódio ou cloreto menor que 3,0 mmol_c/L, e, boro menor do que 0,7 mg/L, sem nenhum problema para o uso na irrigação; T2 – Água com concentração de sódio ou cloreto entre 3,0 e 9,0 mmol_c/L, e, boro entre 0,7 e 3,0 mg/L, que são águas com problema moderado; e T3 – Águas com concentração de sódio ou cloreto maior do que 9,0 mmol_c/L, e, Boro maior que 3,0 mg/L, que as identifica com problema severo.

Em todas as amostras analisadas as águas são classificadas com C₁S₁T₁, ou seja, são águas de baixo risco de salinidade, baixo risco de sodicidade e baixo risco de toxicidade. Portanto, as águas subterrâneas do aquífero Barreiras na bacia do Rio Maxaranguape não apresentam restrições ao uso na irrigação.

Recursos exploráveis e condições para exploração das águas subterrâneas do Aquífero Barreiras

Em uma primeira aproximação, em um sistema aquífero livre, como é o caso do sistema Aquífero Barreiras, nas condições de equilíbrio (sem bombeamento de poços), os recursos anuais exploráveis são equivalentes à recarga das águas subterrâneas, ressaltando-se que não se pode explorar um aquífero anualmente com um volume maior que a recarga efetiva do mesmo, o que levaria ao uso de uma parcela das suas reservas permanentes, com riscos de super-exploração do aquífero e/ou afetar as próprias captações de água (poços). Essa é uma fundamentação teórica, na realidade, dentro do conceito de desenvolvimento sustentável, é necessário considerar possíveis implicações ambientais durante o processo de exploração, inclusive redução nas descargas de base dos rios. Nestas condições, os recursos anuais exploráveis podem ser inferiores a recarga anual.

Tomando por base os resultados obtidos na avaliação da recarga das águas subterrâneas, os recursos anuais exploráveis do Aquífero Barreiras são estimados em no máximo 85 milhões de m³/ano, que corresponde à recarga média obtida pela aplicação dos diferentes métodos. Ressalta-se, que já são explorados atualmente cerca de 8 milhões de m³/ano. Na bacia do Rio Maxaranguape, embora não haja restrições a qualidade das águas, o aquífero é vulnerável ao processo de contaminação, já que se trata de um sistema livre com nível d'água raso em alguns setores. Assim sendo, estratégias de manejo devem ser definidas visando à proteção das águas subterrâneas.

Com base nos valores das vazões específicas dos poços, a maioria dos quais totalmente penetrantes no sistema Aquífero Barreiras, e no perfil litológico e construtivo dos mesmos (ibi, 2010), foram avaliadas suas vazões máximas exploráveis individualmente, e, em seguida, elaborado mapa de zoneamento das possibilidades de exploração das águas subterrâneas. Na avaliação das vazões máximas exploráveis por poço, foi de fundamental importância o conhecimento do rebaixamento máximo disponível, definido em função da profundidade do topo dos filtros e na estimativa de possíveis abaixamentos adicionais atribuído às variações sazonais do nível d'água e possível interferência entre poços.

Foram definidas cinco zonas produtoras, cujas condições de exploração, em regime conti-

nuo de bombeamento, são a seguir apresentadas (Figura 8):

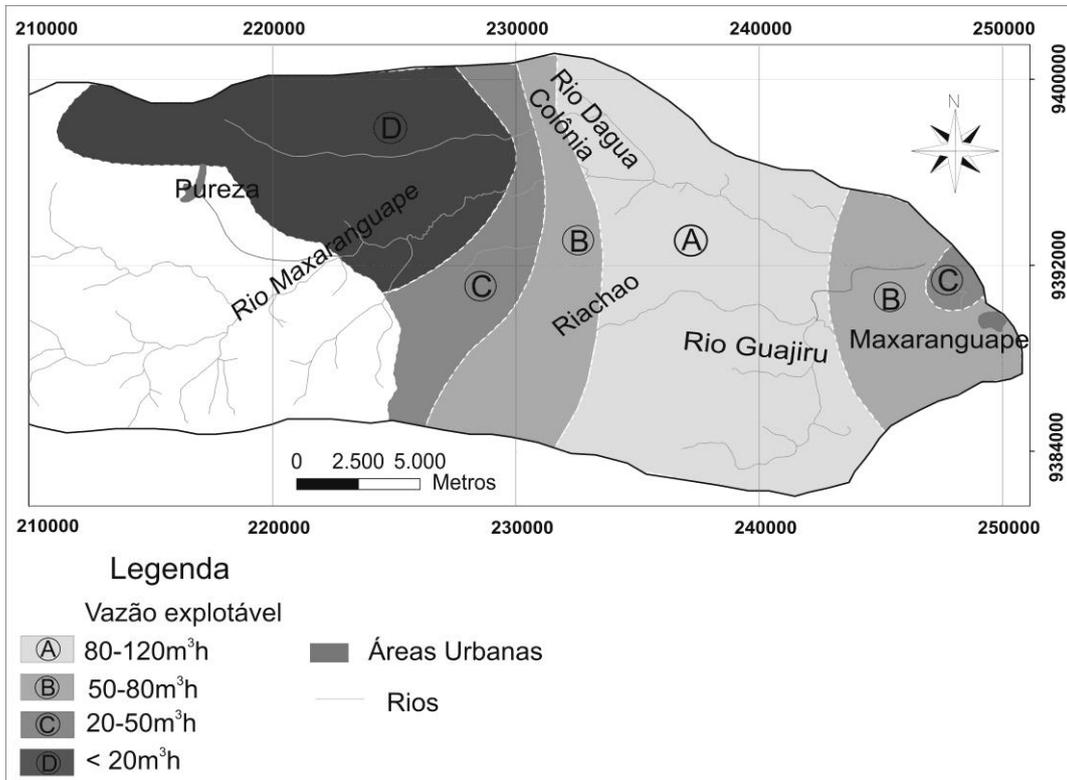


Figura 8 - Zoneamento das possibilidades de exploração das águas subterrâneas do Aquífero Barreiras.
Figure 8 - Zoning of the groundwater exploitation possibilities from the Barreiras aquifer.

Zona A: poços com vazões de 80 a 120 m³/h;
Zona B: poços com vazões de 50 a 80 m³/h;
Zona C: poços explorando vazões de 20 a 50 m³/h; **Zona D:** poços com vazões inferiores a 20 m³/h.

As potencialidades hidrogeológicas de cada zona dependem, principalmente, das transmissividades do sistema Aquífero Barreiras em cada domínio, que se refletem nas vazões específicas dos poços, e, nas dimensões da área. Ressalta-se que o montante da recarga das águas subterrâneas foi avaliado para toda a área de ocorrência do sistema Aquífero Barreiras, de modo que a taxa de recarga obtida representa o valor médio nos diferentes contextos hidrogeológicos.

CONCLUSÕES

O caráter geológico e estrutural dos sedimentos do Grupo Barreiras, no curso inferior da bacia do rio Maxaranguape, com a presença de falhamentos normais e inversos associado às variações laterais de fácies litológicas condiciona a formação do Aquífero Barreiras. Este, trata-se de um sistema aquífero livre com a ocorrência de semi-confinamentos localizados, com espessura de 40,0 a 100,0 m, com diferentes potencia-

lidades hidrogeológicas em diferentes setores da área.

A recarga do Aquífero Barreiras ocorre principalmente pelas precipitações pluviométricas nos domínios dos tabuleiros com fluxo subterrâneo em direção aos vales principais do Rio Maxaranguape e riacho Riachão. A recarga do Aquífero Barreiras é em média de 213 mm/ano, o que corresponde a uma taxa de infiltração de aproximadamente 18% do total precipitado.

As águas do Aquífero Barreiras são em geral do tipo cloretada sódica, com baixa salinidade, cuja condutividade elétrica é inferior a 100 μ S/cm. São águas que, em geral, não apresentam restrições ao uso humano. Quanto ao uso na irrigação, as mesmas se enquadram na classe C1S1T1, ou seja, são de baixo risco de salinização, baixo risco de produzirem sódio trocável e baixo risco de toxicidade. Podem, portanto, serem utilizadas em todos os tipos de cultura e solos no curso inferior da bacia do Rio Maxaranguape.

A parte central da área, com 180 km², corresponde a zona de maior potencialidade hidrogeológica, onde verifica-se a possibilidade de perfuração de poços com profundidade variando de 50 a 100 m, com vazões exploráveis

de 80,0 a 120 m³/h, em regime contínuo de bombeamento.

O Aquífero Barreiras na bacia do rio Maxaranguape por se tratar de um sistema aquífero livre com nível d'água pouco profundo, é vulnerável ao processo de contaminação e com riscos potenciais de contaminação devido atividades agrícolas, industriais e urbanas com a disposição local de efluentes domésticos. Diante desses riscos, urge a necessidade de adoção de medidas de manejo visando à proteção desses recursos, cuja exploração sustentável poderá garantir o suprimento de demandas específicas de interesse no desenvolvimento da região. É

REFERÊNCIAS

- ALFARO, P. E. M.; SANTOS, P. M.; CASTANO, S. C., 2006. **Fundamentos de Hidrogeologia**. Ediciones Mundi-Prensa, Madri, Espanha.
- AYERS, R. S., WESTCOT, D. W., 1991. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. Gheyi, H. R., Medeiros, J. F., Damasceno, F. A. V., Campina Grande: EFPB, 218 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1).
- CASTANY, G. , 1974. **Prospección y explotación de las aguas subterráneas**. Ediciones Omega, S. A. Barcelona.
- FETTER, C. W., 2001, **Applied Hydrogeology**. Prentice – Hall, Inc. Uppder Saddle River, New Jersey, USA. Th ed.
- FUNPEC, 2008. **Estudo das Potencialidades Hídricas das bacias de Maxaranguape, Punau e Boa Cica**. Relatório Técnico, CAERN, Natal, RN.
- HEALY, R. W.; COOK, P. G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Journal Hydrogeology*. V.10, p. 91-109.
- HOLANDA, J. S., 1998. **Qualidade da água para irrigação**. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- IBI, 2010. **Estudos Hidrogeológicos da Bacia do rio Maxaranguape**. Plano Diretor da Bacia do Rio Maxaranguape. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SEMAR). Ibi-Engenharia.
- IDEMA, 2006. **Estudo hidrogeológico da área da Fazenda São Roque, Maxaranguape, RN**. Grupo de Pesquisa de Águas Subterráneas da UFRN.
- LLOYD, J. W.; HEATHCOTE, J. A., 1985. **Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater - in introduction**. Okford: Clarendon Press, 1985.
- PERH-SERHID, 1998. **Estudos hidrogeológicos para o Plano de Recursos do Estado do Rio Grande do Norte**.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington D.C.: U.S. Salinity Laboratory; 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Journal Hydrogeology*. V.10, p.18-39.
- SILVA, F. R., 2006. **Avaliação Hidroambiental e Hidrogeológica da Fazenda São Roque no Município de Maxaranguape, RN**. Relatório de Graduação.
- SUAREZ, D.L, 1981. **Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters**. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, n.45, p.469-75.