

HIDROGEOLOGIA DA BACIA SEDIMENTAR DO RIO DO PEIXE-PB

**Manoel Júlio da Trindade Gomes Galvão¹; Dunaldson Eliezer Gomes Alcoforado da Rocha²;
Cristiano de Andrade Amaral³ & Waldir Duarte Costa Filho⁴**

Resumo – O estudo indica resultados que validam os esforços direcionados a um entendimento geral do comportamento hidrogeológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e da distribuição qualitativa de suas águas. Aspectos geológicos e geofísicos puderam ser confrontados, indicando a complexidade tectônica existente e reforçando a necessidade de estudos mais detalhados capazes de elucidarem os conflitos. O acompanhamento qualitativo e quantitativo contínuo das águas subterrâneas, através de campanhas de monitoramentos periódicos em toda a bacia, seguido da modelagem matemática do fluxo d'água subterrâneo na bacia, resultou na elaboração de mapas potenciométricos e hidroquímicos. Esses estudos, juntamente com a aplicação do Balanço Hídrico, permitiram uma avaliação preliminar do volume de água subterrânea renovável no ciclo hidrológico, bem como, caracterização e classificação das águas para os mais diversos usos de aproveitamento. A disponibilidade, admitida entre 50 a 60% do potencial, ficou entre 27,5 e 33 milhões de m³. Qualitativamente, salienta-se a ocorrência mais freqüente das classes C3-S1 e C3-S2 em toda a Bacia. Áreas vulneráveis e de risco natural de contaminação foram identificadas e mapeadas, o que permitiu considerar medidas preventivas e realizar simulações de novos cenários para indicação da evolução desses fatores impactantes na bacia.

Abstract – The study indicates that results validate the efforts directed at a general understanding of the behaviour of hydrogeological Sedimentary Basin in Rio do Peixe and the distribution of quality of its waters. Geological and geophysical aspects could be confronted, indicating the complexity tectonics existing and reinforcing the need for more detailed studies capable of show the conflict. The qualitative and quantitative continuous monitoring of groundwater, through periodic monitoring of campaigns throughout the basin, followed by mathematical modeling of the flow of water underground in the basin, resulted in the development of potentiometric and hydrochemistry

¹ Hidrogeólogo, Esp. – CPRM Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Recife. Av.Sul, 2291 – Afogados – Recife-PE. (81) 3316.1477. mjtg@re.cprm.gov.br

² Geólogo, Esp. - CPRM Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Recife. Av.Sul, 2291 – Afogados – Recife-PE. (81) 3316.1469. dunaldson@re.cprm.gov.br

³ Geólogo, M.Sc. - CPRM Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Recife. Av.Sul, 2291 – Afogados – Recife-PE. (81) 3316.1430. cristiano@re.cprm.gov.br

⁴ Hidrogeólogo, M.Sc. – CPRM Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de Recife. Av.Sul, 2291 – Afogados – Recife-PE. (81) 3316.1477 / 9997.8848. waldir@re.cprm.gov.br

maps. These studies, together with the implementation of the Balance Hydride, enabled a preliminary assessment of the volume of renewable underground water in the hydrological cycle and, characterization and classification of water for the most diverse uses of exploitation. The availability, allowed between 50 to 60% of potential, was between 27.5 and 33 million m³. In Quality, it is the most frequent occurrence of class C3-S1 and C3 -S2 throughout the basin. Areas vulnerable and Natural risk of contamination have been identified and mapped consider preventive measures and carry out simulations of new scenarios for indication of the evolution of these factors impact in the basin.

Palavras-Chave – RIO DO PEIXE, HIDROGEOLOGIA, ÁGUA SUBTERRÂNEA

1. INTRODUÇÃO

O presente resume o relatório que trata especificamente do projeto “*Hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe*”, desenvolvido pela Superintendência Regional de Recife da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM SUREG-RE em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Para o fiel e regular desenvolvimento da pesquisa, estipulou-se um cronograma com metas e atividades que, em linhas gerais, visavam: i) o resgate de estudos anteriores, observando o estado da arte; ii) estudos geológicos e geofísicos, que renderam novas interpretações, um mapa geológico revisado e, até mesmo, novas concepções do arcabouço estrutural que deu origem a bacia; iii) localização e definição de uma rede de poços a monitorar quantitativamente e qualitativamente, em períodos trimestrais; iv) instrumentação, pela instalação de equipamentos auxiliares no monitoramento hidroclimático; v) realização de testes de bombeamento; vi) execução das campanhas de monitoramento e vii) tratamento e interpretação dos dados coletados, com emprego de mapas potenciométricos, modelagem do fluxo e parâmetros da qualidade das águas.

Os trabalhos foram realizados, além dos autores deste Artigo, em parceria com os seguintes profissionais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG: Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, M.Sc. José do Patrocínio Tomaz Albuquerque, M.Sc. Janiro Costa Rego, Dr. Hans Dieter Max Schuster, Dra. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos, Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Dra. Márcia Maria Rios Ribeiro e José Rosenilton de Araújo Maracajá; e do técnico da CPRM, Armando Arruda Câmara Filho.

2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A Bacia sedimentar do rio do Peixe localiza-se na porção noroeste do estado da Paraíba, aproximadamente entre os meridianos 37° 40' 00'' e 38° 45' 00'' de Longitude W de Greenwich e entre os paralelos 06° 25' 00'' e 06° 55' 00'' de Latitude Sul (Figura 1). Ela ocupa uma área aproximada de 1300 Km², distribuída pelos municípios de Pombal, Aparecida, Sousa, São João do Rio do Peixe, Poço José de Moura, Umari, Triunfo, Uiraúna e Santa Helena.

Os principais acessos à região podem ser feitos a partir de Campina Grande através da BR-230, e de Salgueiro-PE ou Fortaleza-CE, ambos utilizando em sentidos inversos a BR-116, até atingir o trevo Felizardo-Cajazeiras. A partir daí, tem-se acesso à área da Bacia do Rio do Peixe.

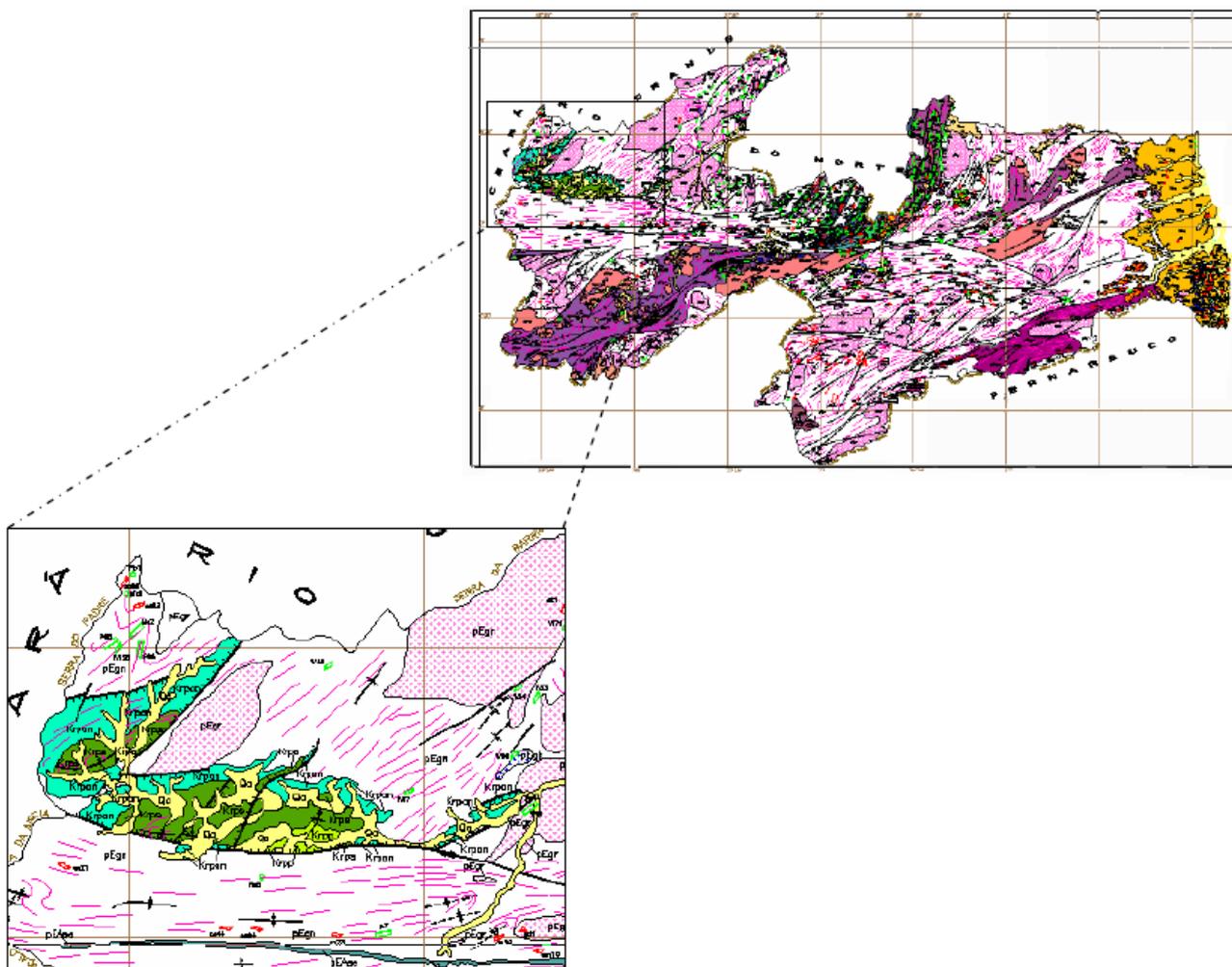


Figura 1 - Localização da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe no Estado da Paraíba.

3. LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE

Foi elaborado, como primeiro produto do Projeto, um relatório do estado da arte sobre a hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe - PB, que teve como objetivo levantar, gerar e disponibilizar informações e conhecimentos sobre a ocorrência, potencialidades, circulação e utilização das águas subterrâneas na bacia estudada.

Foram tratados diversos aspectos, entre eles: o contexto geológico, o contexto hidrogeológico, os estudos qualitativos (hidrogeoquímica e isotopia) e o contexto hidroclimatológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe-PB.

4. REVISÃO GEOLÓGICA

Durante os trabalhos de campo, principalmente nas sub-bacias de Brejo das Freiras (porções Norte e Sul) e Sousa (porção Oeste), no domínio da Formação Antenor Navarro, observamos alguns

afloramentos com características da Formação Sousa, nas porções mais baixas do relevo local, associadas a arenitos grosseiros a conglomeráticos no topo de pequenas elevações.

É importante destacar a diminuição areal da Formação Antenor Navarro nas subbacias de Sousa e Pombal, em relação aos mapeamentos anteriores, como também a caracterização dos “megaconglomerados” na porção sul da Sub-bacia de Pombal.

Estudos geofísicos de eletrorresistividade realizados na Bacia do Rio do Peixe sugerem alguns locais onde o comportamento elétrico da unidade mapeada não condiz com o esperado. Isto ocorre principalmente na porção norte da Sub-bacia de Brejo das Freiras (SSE de Triunfo) e nas porções sul desta mesma bacia (SW do Açude de Pilões) e oeste da Sub-bacia de Sousa (SW de São João do Rio do Peixe) onde a geofísica definiu alguns elementos estruturais como o Alto de Tabuleiro Grande e os baixos de Cacimba Nova e Santa Rita (Feitosa, 2006).

5. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Definição da Rede de Poços para Monitoramento

Com base na rede de pontos d'água inventariados - 327 pontos visitados (290 poços tubulares, 27 poços amazonas, 01 fonte termal, e 10 pontos de águas superficiais), foram selecionados, a princípio, para monitoramento hidroquímico (possuíam dados de campo) – 268 poços e selecionados para monitoramento potenciométrico - medição de NE – 161 pontos.

Posteriormente com a seqüência dos conhecimentos adquiridos durante os trabalhos das primeiras etapas de campo esta rede foi reduzida, principalmente devido a questões operacionais, para cerca de 127 poços tubulares, sendo acrescentados, porém, 34 poços amazonas.

Instalação de equipamentos

Instalação de pluviógrafos e lisímetros

Foram definidos, estrategicamente, pela UFCG e CPRM-RE, os locais de implantação dos pluviógrafos e lisímetros que conjuntamente constituíram as estações de monitoramento, que contemplaram as zonas de recarga distribuídas pela bacia.

Construção de piezômetros

Com a finalidade de funcionarem como piezômetros em testes de aquíferos, foram perfurados três poços tubulares, dois no sítio Serrote dos Letreiros e um na Fazenda Santo Antonio. O sistema de perfuração utilizado foi o de percussão.

Teste de Aquífero

Foram executados, três testes de aquíferos na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe. Dois deles no Sítio Serrote dos Letreiros, município de Sousa, onde foram construídos dois piezômetros, e outro na Fazenda Santo Antônio – município de Santa Helena.

Tendo em vista que os testes de bombeamento executados não permitiram uma avaliação segura dos parâmetros hidrodinâmicos, através do método de Cooper-Jacob ou de qualquer outro método de análise, a equipe pesquisadora lançou mão de métodos alternativos de cálculo desses parâmetros.

Para se obter alguns valores de transmissividade, foram utilizados dados de teste de produção de 13 poços, executados pela Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba, CDRM-PB, nas sub-bacias Brejo das Freiras/Triunfo, Sousa e Pombal, durante os últimos 25 anos. Para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade e condutividade hidráulica), a partir do modelamento matemático aplicado, foram utilizados dados de teste de bombeamento de 13 poços distribuídos nas sub-bacias Brejo das Freiras, Sousa e Pombal, conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Transmissividades obtidas através da análise dos testes de produção.

No. Poço	Ano do Teste	t (min)	Q (m ³ /h)	s (m)	L (m)	r (m)	S (-)	Q/s (m ³ /h/m)	T max (m ² /d)	T min (m ² /d)
P1	1998	600	3,00	12,87	40	0,1	0,0001	0,233	236,4	7
P2	1994	720	1,24	13,00	30	0,1	0,0001	0,095	95,1	2,7
P3	2004	1440	2,18	33,94	90	0,1	0,0001	0,064	72,7	1,9
P4	2001	360	0,22	8,10	35	0,1	0,0001	0,027	27	0,7
P5	2002	600	4,50	7,97	40	0,1	0,0001	0,565	566,1	17,9
P6	2004	600	0,42	26,67	35	0,1	0,0001	0,016	15,4	0,4
P7	2004	1440	9,00	5,80	40	0,1	0,0001	1,552	1567,1	55,2
P8	1994	600	2,00	17,12	40	0,1	0,0001	0,117	116,4	3,3
P9	1994	480	0,90	18,30	40	0,1	0,0001	0,049	48,8	1,3
P10	2005	600	3,60	17,90	45	0,1	0,0001	0,201	204,3	6
P11	1983	720	5,10	0,51	10	0,1	0,0001	10,000	8133	380
P12	1994	600	5,40	8,42	20	0,1	0,0001	0,641	578,6	20,6
P13	1981	120	2,25	0,42	18	0,1	0,0001	5,357	4705,3	184,8

Elaboração de mapas potenciométricos

Os mapas foram traçados utilizando-se duas metodologias: uma manualmente com auxílio do programa *SURFER*, a intervalos de carga hidráulica de $\Delta h = 5$ metros e a outra utilizando-se o software *ARCVIEW*, que constitui poderosa ferramenta, com todos dados dos poços georreferenciados, sendo as isopiezas, também com intervalos de carga hidráulica de $\Delta h = 5$ metros, calculadas com a aplicação do módulo “Spatial Analyst” diretamente sobre o mdt real do terreno. Nos mapas gerados a partir do *ARCVIEW* observa-se a inclusão da Bacia de Pombal apresentando também dados da sua potenciométrica.

Neles se pode observar que o sentido geral do fluxo subterrâneo é de Oeste para Leste, e que existe em todos os mapas um fluxo lateral de entrada no contorno ao lado montanhoso de Oeste.

Em geral, pode-se dizer, ao se observar as posições das isopiezas principais, que os mapas potenciométricos, e, portanto, as redes de fluxo, se alteram pouco durante os dois anos de levantamento no campo.

Mesmo nos períodos de chuva, entre novembro de 2005 a maio de 2006 e novembro de 2006 a maio de 2007, quando normalmente ocorrem as recargas do aquífero, o efeito destas recargas, medido nos poços tubulares da bacia, não é detectável com plena clareza em um exame menos minucioso dos mapas potenciométricos.

As variações entre as linhas potenciométricos nos diversos mapas sofrem também grande influência da seleção dos poços observados nas respectivas campanhas, uma vez que, pelos motivos já expostos, houve variação tanto no número dos poços medidos quanto dos poços selecionados, de campanha para campanha. Apenas 21 poços foram medidos continuamente nas sete campanhas.

Balanço Hídrico

Foram analisados o método de Thornthwaite & Mather (1955) e o modelo de balanço hídrico seqüencial diário (BALSEQ), desenvolvido por Lobo Ferreira em 1981.

O método clássico de Thornthwaite & Mather calcula excedentes e déficits hídricos usando apenas dados climatológicos, como a taxa medida de precipitação e a temperatura, para fazer um balanço hídrico da área em estudo, definindo uma recarga potencial de água subterrânea, enquanto o modelo BALSEQ calcula a infiltração profunda, em função dos parâmetros de tipo e uso de solo, empregando o método do Soil Conservation Service (1972) para o cálculo do escoamento superficial e um balanço hídrico na zona radicular. Ignorando o efeito da redistribuição da umidade na zona não saturada, esta infiltração profunda calculada representa a recarga efetiva de água subterrânea. Assim, o modelo BALSEQ é capaz de fornecer valores de recarga mais realísticos, em comparação com os demais modelos simples de balanço hídrico.

Comparando os dois cenários simulados, as taxas médias de recarga em toda a bacia, nos anos de 2004 a 2007 foram, para o cenário 1 (sem cobertura aluvial), de 5,53%, 0,81%, 7,92% e 0,04% da taxa de precipitação, respectivamente. No cenário 2, as taxas de recarga foram 19,23%, 9,20%, 24,74% e 2,93%. Considerando as incertezas, ainda reinantes, sobre a geologia e as dimensões do sistema aquífero, os valores referidos acima podem ser considerados como limites inferiores e superiores da estimativa das taxas de recarga nos anos considerados.

Analisando as recargas durante o período de 4 anos, observa-se que apesar de 2004 ter uma precipitação maior que 2006, a taxa de recarga do ano 2006 foi superior àquela do ano de 2004.

Este fato ocorre em virtude da distribuição espacial da precipitação, dependendo da intensidade da chuva, variando em função do tipo de solo, podendo assim, ocorrer a combinação de intensidades de chuvas maiores em áreas de recarga mais propícias.

Concluindo, pode-se dizer que ambos os métodos aplicados para a estimativa de recarga padecem de um alto grau de incerteza. Contudo, trata-se de uma limitação inerente a todos os métodos de recarga conhecidos, por causa da enorme complexidade hidrológica da zona não saturada associada à falta de registros confiáveis de dados de campo em quantidade suficiente.

Elaboração de modelos de fluxo

O modelo conceitual do sistema aquífero da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe foi elaborado com base nas informações existentes nos trabalhos anteriores realizados na área (Françolin, 1992, Albuquerque 1984, Lima Filho, 1991, *et al*) e aquelas coletadas em campo nas campanhas feitas pelas equipes da CPRM e UFCG durante o período de maio de 2005 até junho 2007.

A configuração geológica adotada para a bacia foi a de Rocha *et al.* 2006 onde, apesar das posições sobrepostas das formações Antenor Navarro, Souza, Rio Piranhas e Aluviões, algumas constituindo aquíferos e uma, a formação Souza, funcionando também como aquífero, o modelo conceitual, partindo do princípio da interligação hidrodinâmica entre as diversas camadas sedimentares, adotou uma única camada aquífera, abrangendo a espessura total da bacia. Portanto, os parâmetros hidráulicos desse modelo seriam equivalentes ao das diversas camadas e não sofrem variação vertical.

A simplificação dos diversos sistemas aquíferos em uma única camada deve-se a fatores como: a falta de conhecimento sobre a geometria vertical das formações; falta de estudos dos parâmetros hidrogeológicos entre as formações; maior complexidade do modelo com maior número de parâmetros a se determinar por calibração e, conseqüentemente, aumento da incerteza dos resultados.

Esta estrutura conceitual adotada, de um aquífero único freático, apresenta, portanto, a vantagem da simplicidade e da economia de dados e cálculos no correspondente modelo numérico bidimensional, em comparação com um sistema de múltiplos aquíferos, que exigiria dados detalhados de espessuras de camadas (indisponíveis) bem como uma modelagem numérica tridimensional.

A área escolhida para ser modelada foi a totalidade da bacia sedimentar, excluída, mais tarde, a sub-bacia de Pombal por causa da uma conexão estreita com a bacia principal. Os rios da bacia, de regime intermitente, também foram considerados no modelo.

A topografia da superfície e as cotas da altitude topográfica dos poços foram conseguidas através de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), com pontos coletados em uma malha de 90 x 90 metros.

Quanto aos níveis potenciométricos, a serem utilizados para a calibração e verificação do modelo, estes foram coletados em um total de 7 (sete) campanhas realizadas pelas equipes da CPRM e da UFCG.

O total de poços que tiveram seus níveis estáticos coletados chegou a 163, sendo 127 tubulares e 36 amazonas. Os poços amazonas foram desconsiderados para a modelagem.

O tamanho da malha selecionado estendeu-se 107.000 m (107 km) em direção Norte-Sul e 45.000 m (45 km) em direção Oeste-Leste. A malha foi discretizada, horizontalmente, de forma regular, com as células possuindo dimensão de 500 m x 500 m em todo o domínio do modelo, ou seja, 90 linhas e 214 colunas em total.

Neste estudo, as condições de contorno, identificadas e adotadas para a modelagem foram as seguintes:

. Condições externas: todas as células externas à bacia sedimentar são do tipo fluxo especificado, ou condição de Neumann, neste caso igual a zero, pois ao redor de toda a bacia há o afloramento do cristalino, implicando assim na inexistência de fluxo nestas células contíguas a bacia. Assim todas as células que circundam o modelo são inativas.

. Condições internas: a hidrografia foi representada pelo pacote *Drain* do *MODFLOW*. Este pacote é indicado para a representação de rios intermitentes, como no caso de regiões semi-áridas. A taxa de fluxo para o dreno é calculada segundo a expressão $Q C (h d) d = -$, onde Q é o fluxo (L^3T^{-1}), C_d é a condutância hidráulica equivalente do dreno (L^2T^{-1}), h é a carga hidráulica na célula do dreno (L) e d a elevação do dreno (L). Esta é a condição do tipo fluxo dependente da carga hidráulica, ou condição de Cauchy.

Próximo à divisa das sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa o Rio do Peixe é represado pelo açude Pilões, o maior reservatório localizado no interior da bacia sedimentar. O açude de Pilões foi representado pela condição de contorno de carga hidráulica especificada, ou condição de Dirichlet. As variações sazonais de nível não são consideradas aqui com esta condição de contorno.

Outro local com a condição de potencial de carga especificada, ou condição de Dirichlet, é a saída da sub-bacia Sousa para a sub-bacia Pombal, próximo a cidade de Aparecida.

As retiradas de poços não foram consideradas no modelo estacionário, pois, apesar da existência de cerca de 160 poços ativos ao longo da área de estudo estes estão localizados quase

sempre em pequenas propriedades rurais e apresentam retiradas muito pequenas, conforme constatado em visitas aos locais.

A calibração do modelo foi realizada tanto no regime estacionária quanto no regime transitório (não-estacionário).

Os valores de condutividades hidráulicas calibradas indicam que a formação Antenor Navarro da sub-bacia de Brejo das Freiras possui uma condutividade hidráulica duas vezes maior que a da formação de Sousa, a qual é principalmente composta por folhelhos. No entanto, a formação Antenor Navarro da sub-bacia Sousa (justamente a região que é suspeita de, na verdade, fazer parte da formação Sousa) mostra uma condutividade 3 vezes menor que o valor do Antenor Navarro da sub-bacia Brejo das Freiras.

A maior condutividade hidráulica da bacia (duas vezes maior que a formação Antenor Navarro) possui a formação Rio Piranhas composta por arenito e que é geologicamente mais jovem que a formação de Sousa e Antenor Navarro. Como se pode admitir, a calibração ainda é passível de melhorias, porém estas implicariam em se conceber um modelo conceitual mais próximo da situação de campo e se obter um aumento quali-quantitativo dos dados para a calibração.

A calibração do coeficiente de armazenamento foi feita com os níveis das medições feitas em agosto e novembro de 2005, durante a época seca. Esta calibração, em teoria, seria melhor se houvesse mais poços com medição contínua, para o ajuste pelo *PEST*. A técnica de calibração, porém, foi executada corretamente, dentro das possibilidades. Os valores do coeficiente de armazenamento calibrado não mostram claramente uma relação com a litologia, apenas que a formação de Antenor Navarro possui um coeficiente de armazenamento ou porosidade efetiva 10 até 100 vezes maior que da formação Sousa. Relativamente pequeno é o coeficiente da formação Rio Piranhas.

O processo de calibração da recarga foi realizado com dados de nível coletados na época da chuva, entre novembro de 2005 e maio de 2006 e, a segunda vez, entre novembro de 2006 e maio/junho de 2007, distribuídos em todas as zonas de calibração.

Assim, considerando-se que as calibrações dos valores de condutividade hidráulica e de coeficiente de armazenamento chegaram a valores representativos do comportamento hidrodinâmico da bacia, a calibração da recarga também chegou a valores plausíveis, pois havia quantidade suficiente de dados para o ajuste. A recarga média nos anos 2005-2006 atingiu um valor de 50,5 mm, equivalente a 5% da precipitação média total (1018 mm) e a recarga média nos anos 2006 – 2007 chegou a um valor de 36,1 mm ou 6% da precipitação média total (595 mm).

As taxas de recarga mostram claramente uma recarga significativa maior nas áreas da formação de arenito Antenor Navarro, da sub-bacia Brejo das Freiras (zona 1) que nas áreas das zonas 2, 3, 4 e 5. A zona 5 de arenito da sub-bacia Rio de Piranhas, recebe a metade da recarga da zona 1, porém ainda 2 vezes maior que a das zonas de folhelhos 2, 3 e 4).

Uma comparação direta com a estimativa de recarga na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, realizada através de modelo de BALSEQ e atrás apresentada, mostra, para o cenário 1 daquele estudo que as taxas de recarga atingem valores médios um pouco mais altos (80,5 mm) para o ano chuvoso de 2006 e mais baixo (0,24 mm) para o ano menos chuvoso de 2007, mas com a mesma tendência para cada área da formação geológica.

A etapa da verificação do modelo mostra a eficácia e estabilidade do modelo para simulações transitórias, visto que os erros nos períodos de observação que se sucederam a partir de agosto de 2005 não aumentavam significativamente e não surgiu nenhuma discrepância nos dados.

Concluindo, é possível afirmar que o modelo apresenta uma boa confiabilidade para a simulação do aquífero.

Avaliação dos recursos de água subterrânea da bacia

Os recursos de água subterrânea de uma bacia sedimentar são compostos de dois segmentos: o potencial ou potencialidades e as reservas. Este potencial é, também, denominado de reserva reguladora.

Para se saber a contribuição de cada unidade aquífera ter-se-ia que dispor de postos estrategicamente localizados em pontos onde se identificasse o término da influência de cada unidade ou conjunto de unidades (subsistema aquífero). Infelizmente, não se dispõe dessas séries de medidas históricas que, para serem representativas, devem ter longo período de observação.

Resta, portanto, o caminho da modelagem numérica como forma de obtenção de valores de recarga de água subterrânea como indicativos pontuais da potencialidade. O modelo elaborado nestas pesquisas, ainda de caráter preliminar, conforme se discorreu neste trabalho, estimou a recarga no período de novembro de 2005 a maio de 2006 em cerca de 64.000.000 m³ e no período de novembro de 2006 a maio de 2007 em cerca de 46.000.000 m³.

Como uma aproximação bastante grosseira, poderíamos lançar mão dos valores das recargas de dois anos, calculadas neste estudo. Assim, o potencial corresponderia à média dois valores (64 e 46 milhões de m³), isto é, 55.000.000 m³ e a disponibilidade entre 27,5 e 33 milhões de m³.

6. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

Ao todo foram selecionados 328 pontos d'água, representados por 291 poços tubulares, 27 poços amazonas, 01 fonte termal, e 08 corpos de água superficiais (açudes e lagoas). Nestes pontos d'água, selecionados para monitoramento de campo, foram medidos "in loco" os valores de condutividade elétrica, pH e temperatura ambiente.

Posteriormente, devido a questões operacionais e aos conhecimentos adquiridos durante o desenvolvimento dos trabalhos, esta rede foi reduzida para cerca de 127 poços tubulares, sendo acrescentados, porém, 34 poços amazonas. Além da medição dos parâmetros hidroquímicos já citados realizados em campo foram coletadas amostras destes pontos d'água para execução de análises físico-químicas, bacteriológicas, como se vê na seqüência deste relatório.

Foram gerados, diversos mapas de isopiezas de condutividades elétricas referentes aos dados coletados em algumas etapas de campo, agosto e outubro de 2005 e maio de 2006. Observa-se o decréscimo gradativo dos valores da condutividade elétrica a partir de agosto de 2005, outubro de 2005 meses de seca e maio de 2006 quando ocorre o período mais chuvoso da região.

As amostras de água para análises físicos e químicos foram coletadas em frascos plásticos atóxicos perfeitamente limpos e encaminhados ao Laboratório de Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)/Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, para análises. As amostras para análises microbiológicas foram coletadas em frascos de vidro neutros estéreis (2 horas em estufa a 170°C), cor caramelo e boca larga, protegida com papel de alumínio.

Os resultados mostram águas de pH entre levemente básico e extremamente básico (pH 9,12), mediamente duras e duras, bicarbonatadas e ricas em sódio, de condutividade elétrica entre média e alta. As formas de nitrogênio (amônia, nitrito e nitrato) acusaram concentrações baixas (sem diferenças estatísticas significativas $\alpha = 0,05$) e não foram limitantes para consumo humano exceto em um poço com teor elevado de amônia livre que supera o padrão de potabilidade (Portaria 518/2004-MS) e que representa risco à saúde. Também apenas uma amostra teve concentração elevada de nitrato, próxima ao valor limite para consumo humano ($<10\text{mg/L}$). Em várias amostras houve altos valores de ferro, ultrapassando o padrão de aceitação, de 0,3 mg/l, segundo a mesma portaria em vigência.

O diagrama de Piper, apresentado a seguir na Figura 2 mostra a distribuição dos íons predominantes no total dos poços, distribuídos nas quatro formações geológicas. Este diagrama é usado para classificar e comparar distintos grupos qualidade de águas em relação aos íons predominantes.

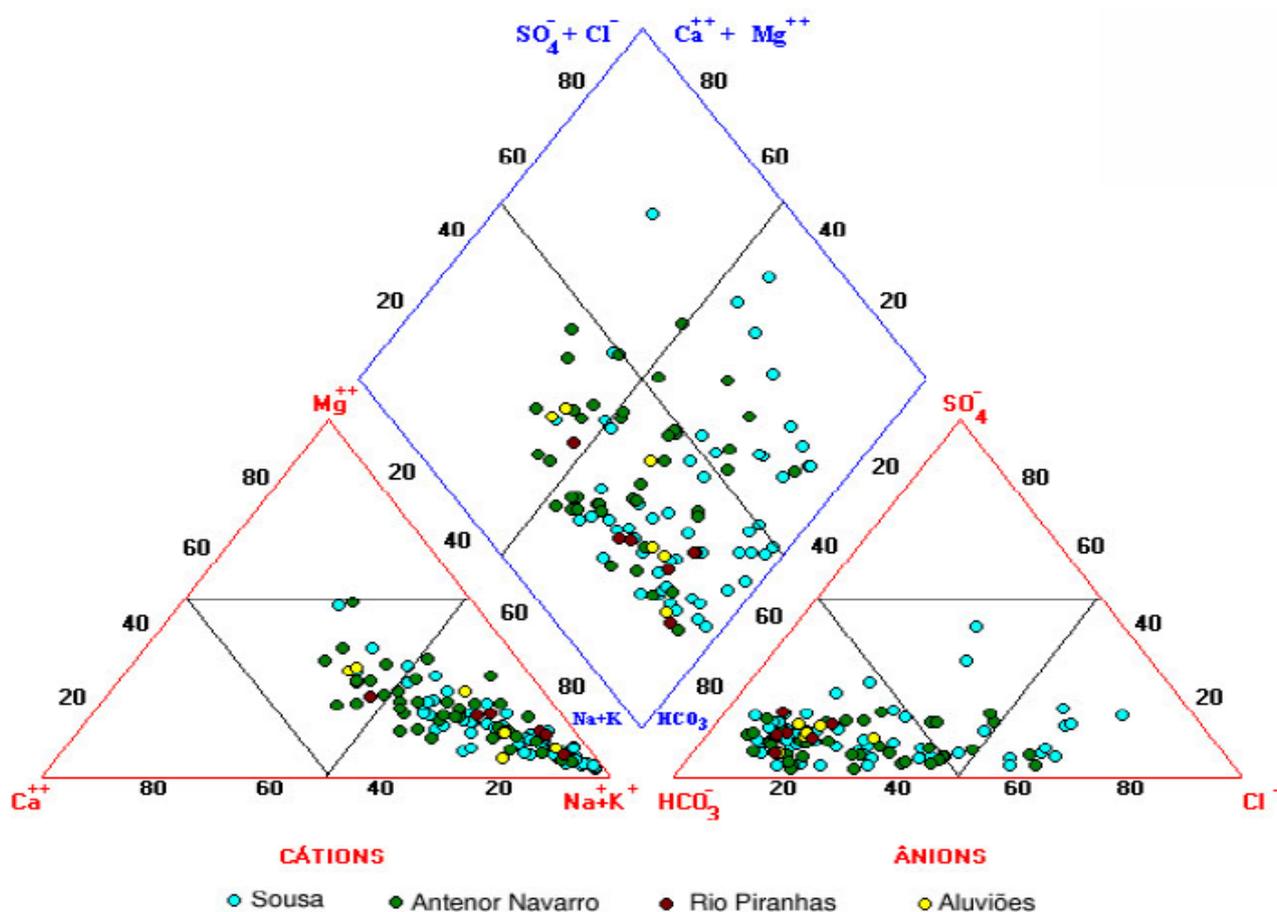
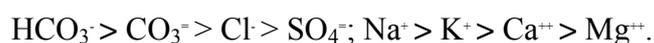


Figura 2 - Diagrama de Piper. Íons predominantes nas águas subterrâneas das quatro formações geológicas da Bacia Sedimentar de Rio do Peixe- PB.

Observa-se que estas águas são, em sua grande maioria, Bicarbonatadas (85,6%), Sódicas (94,6%) e Bicarbonatadas Sódicas (81,1%), não havendo grande distinção dessas características por formação geológica. Poucos poços apresentaram águas com teores significativos de magnésio e também poucas amostras tiveram altos teores de sulfatos. As primeiras se concentraram na sub-bacia de Brejo das Freiras e as segundas, no norte da formação Sousa.

Portanto, a composição iônica global das águas subterrâneas estudadas pode ser assim resumida:



A seguir foi feita a análise de agrupamento (SPSS 14.0) que objetivou identificar as amostras de água de qualidade semelhante e analisar uma possível relação entre essa qualidade e a formação geológica na qual o poço está localizado. Para essa análise foram utilizados os valores da mediana para as seis campanhas de monitoramento para todos os parâmetros de qualidade (20 parâmetros). Como resultado obteve-se um dendrograma, com 14 agrupamentos.

O critério aplicado para a escolha dos agrupamentos foi baseado no menor grau de liberdade que apresentasse consistência no resultado. Assim, houve 14 diferentes grupos de poços com qualidade semelhante. Tais grupos foram: G1 com 31 poços, representando 27,93% do total dos poços amostrado, G2 com 45 poços - 40,54%, G3 com 12 poços - 10,81%, G4 com 10 poços - 9,0%, G5 com 3 poços - 2,7% e G6 com 2 poços - 1,8%. Os outros oito grupos ficaram com apenas um poço cada um. Os percentuais apresentados evidenciam que os maiores grupos foram G1, G2, G3 e G4, que somam 88,28% dos poços amostrados, e, por tanto, esses conjuntos de poços representam as diferentes qualidades de água subterrânea predominantes na bacia sob estudo.

Os resultados da análise de agrupamento foram plotados sobre o mapa geológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, utilizando-se códigos de símbolos e de cores para indicar os grupos de qualidade e as formações geológicas. Neste mapa, evidencia-se que as amostras de água dos diferentes agrupamentos correspondem a poços distribuídos em toda a bacia, sem uma clara identificação entre grupo de qualidade e formação geológica. Em linhas gerais, a análise geral das 111 amostras mostra que:

1) As águas subterrâneas desta bacia são alcalinas, bicarbonatadas e ricas em sódio, mediamente duras e duras.

2) Diferenciam-se na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe 14 grupos de qualidade de água subterrânea, sendo seis desses grupos os mais representativos da qualidade predominante.

3) Esses seis grupos qualitativos se caracterizaram pelas limitações ou restrições crescentes de uso de G1 a G6, pelo aumento das concentrações da maioria dos parâmetros, destacando-se íons, com aumentos significativos de CE, SDT, sódio, dureza e sulfato. Estes parâmetros foram os principais componentes da qualidade da água que diferenciaram os seis principais agrupamentos.

4) A maioria dos seis principais grupos de qualidade d'água dos poços se distribuem nas quatro formações geológicas da bacia.

5) G1 se diferenciou dos grupos restantes pelas menores concentrações de todos os parâmetros, portanto, podem se considerar que são as águas de melhor qualidade dentre as 111 amostras de água analisadas. Este conjunto de amostras foi predominante na formação Antenor Navarro, distribuído principalmente na sub-bacia de Brejo das Freiras.

6) G2 se diferenciou do grupo anterior, pela salinidade mais elevada e principalmente pela alta alcalinidade de bicarbonato. A distribuição espacial deste grupo foi predominante na formação Sousa nas sub-bacias de Brejo das Freiras e de Sousa.

7) G3 teve distribuição espacial predominante na formação Sousa.

8) G4 apresentou salinidade mais elevada que os outros e os parâmetros CE, sódio e bicarbonatos foram os diferenciais deste agrupamento. Embora houve predominância de poços com esta qualidade na formação Sousa, sub-bacia de Sousa, houve também algumas amostras distribuídas na formação Antenor Navarro da sub-bacia de Brejo das Freiras.

9) G5 teve distribuição espacial predominante na formação Sousa.

10) G6 agrupou as amostras de pior qualidade em relação a CE, SDT, sódio, dureza e principalmente sulfato. Este agrupamento se concentrou na formação de Sousa e sub-bacia de Souza

Os riscos de salinização e de sodicidade foram estudados para as 111 amostras. Para isso, a distribuição das águas segundo sua qualidade para irrigação avaliando-se o perigo de sódio e de salinização dos solos foi feita usando-se a classificação de Riverside, USSL. Previamente calcularam-se a RAS - Riscos de Sódio, usando-se os dados das concentrações de sódio, cálcio e magnésio dessas amostras, coletadas entre agosto de 2005 até fevereiro 2007, com auxílio do Software Qualigraf (FUNCEME, 2007).

Na Figura 3 se apresenta o diagrama de Riverside-USSL e a distribuição, nesse diagrama, dos poços amostrados, em função do Risco de Sódio (RAS) versus a condutividade elétrica, fornecendo o risco de salinidade dos solos quando irrigados com águas com diferentes valores desses parâmetros.

A maioria das águas subterrâneas da bacia sedimentar sob estudo segundo sua qualidade para irrigação apresentou risco de salinidade dos solos entre médio e alto e risco de sódio entre baixo e médio, predominando as classificações C₃-S₁ até C₃-S₄. Amostras de água com riscos de sódio forte e muito forte e riscos de salinidade entre alto e muito alto (C₄-S₁ até C₄-S₄) foram relativamente escassas, cerca de 18%, e deles, 13,5% de poços estão localizados na formação Sousa. As classes C₁-S₁ (baixo risco de sódio e de salinidade) se concentraram na formação Antenor Navarro (apenas três poços) e as classes C₂-S₁ e C₂-S₂ (baixo risco de sódio e médio de salinidade) foram observadas nas águas dos poços das aluviões, de Antenor Navarro e algumas na formação Sousa. A Tabela 3 expõe a ocorrência dos diversos grupos por formação geológica e sua predominância

Nas Figuras 4 e 5 tem-se a regionalização espacial das concentrações de parâmetros selecionados de qualidade na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe que confirma o observado nas análises anteriores.

O pH foi básico na maior parte da bacia, com valores levemente básicos sobre a formação Antenor Navarro.

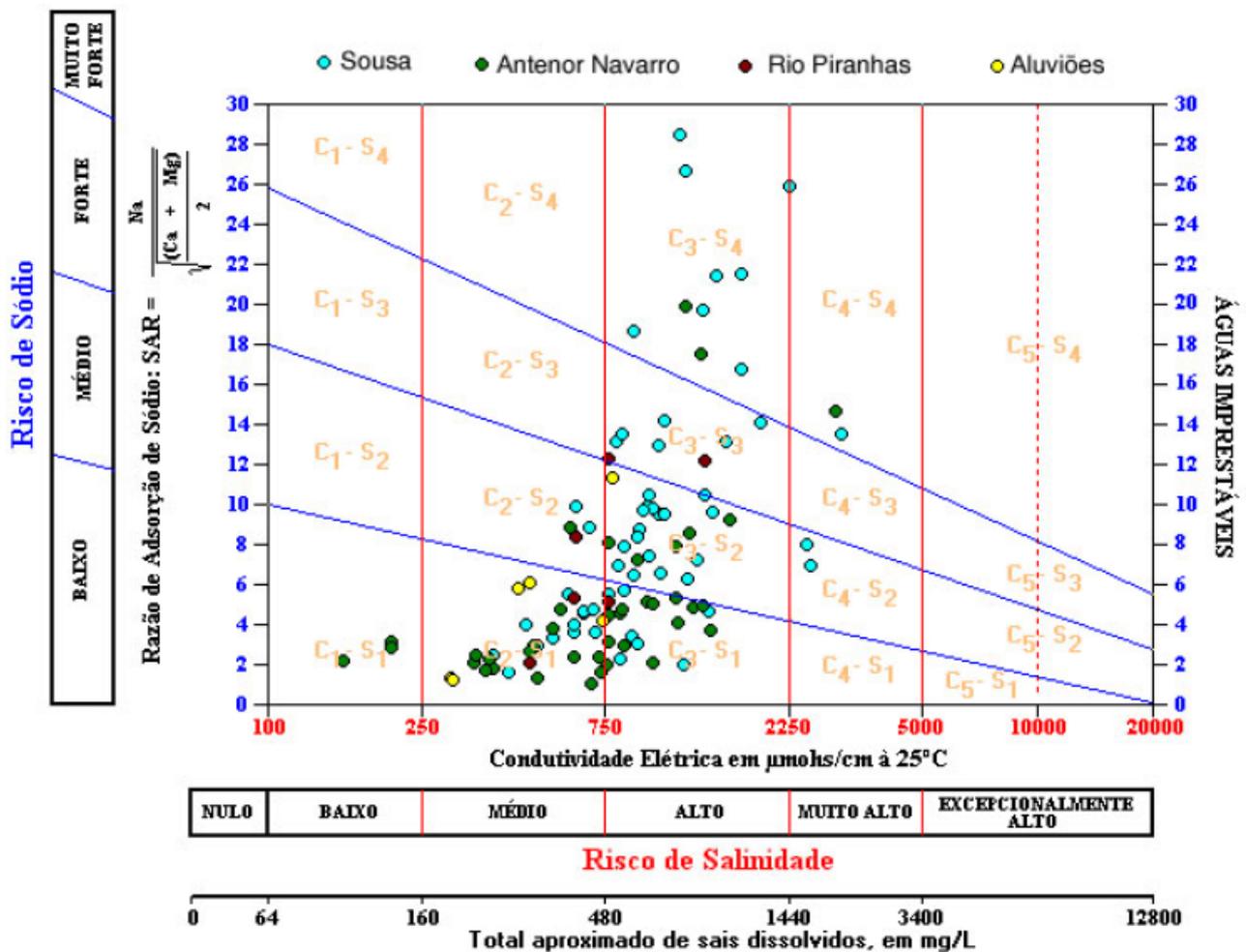


Figura 3 - Distribuição dos 111 poços amostrados no Diagrama de Riverside - USLL, indicando o risco de salinidade e o risco de sódio de suas águas, se usadas para irrigação.

Tabela 3 - Ocorrência dos diversos grupos por formação geológica e sua predominância

Classes de qualidade (Nº de amostras)	Número de amostras				Frequência de ocorrência (%)				Predominância
	Formações				Formações				
	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	Antenor Navarro	Sousa	Rio Piranhas	Aluvião	
C ₁ -S ₁ (3)	3	0	0	0	2,7	0,0	0,0	0,0	Antenor Navarro
C ₂ -S ₁ (33)	16	12	2	3	14,4	10,8	1,8	2,7	Antenor Navarro
C ₂ -S ₂ (4)	1	2	1	0	0,9	1,8	0,9	0,0	Sousa
C ₃ -S ₁ (22)	13	8	1	0	11,7	7,2	0,9	0,0	Antenor Navarro
C ₃ -S ₂ (22)	5	16	0	1	4,5	14,4	0,0	0,9	Sousa
C ₃ -S ₃ (9)	0	5	2	2	0,0	4,5	1,8	1,8	Sousa
C ₃ -S ₄ (14)	12	2	0	0	10,8	1,8	0,0	0,0	Antenor Navarro
C ₄ -S ₂ (2)	0	2	0	0	0,0	1,8	0,0	0,0	Sousa
C ₄ -S ₄ (2)	1	1	0	0	0,9	0,9	0,0	0,0	Antenor Navarro/Sousa

A condutividade elétrica se manteve elevada e crescente em direção à parte norte da sub-bacia de Sousa, onde se concentra a zona petrolífera. Os SDT seguem a mesma tendência, assim como os teores de sulfato.

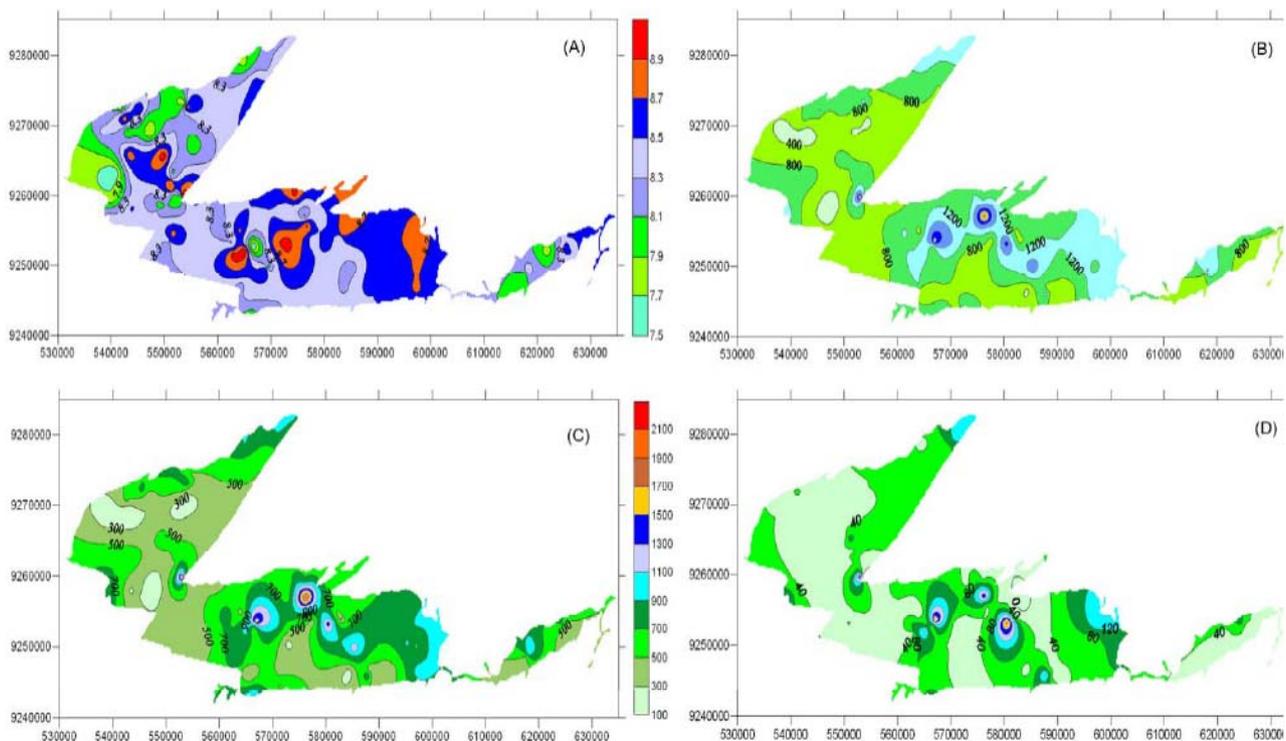


Figura 4 - Mapas da distribuição espacial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe dos parâmetros: (A) pH; (B) Condutividade Elétrica (S/cm); (C) SDT (mg/L) e (D) Sulfato (mg/L).

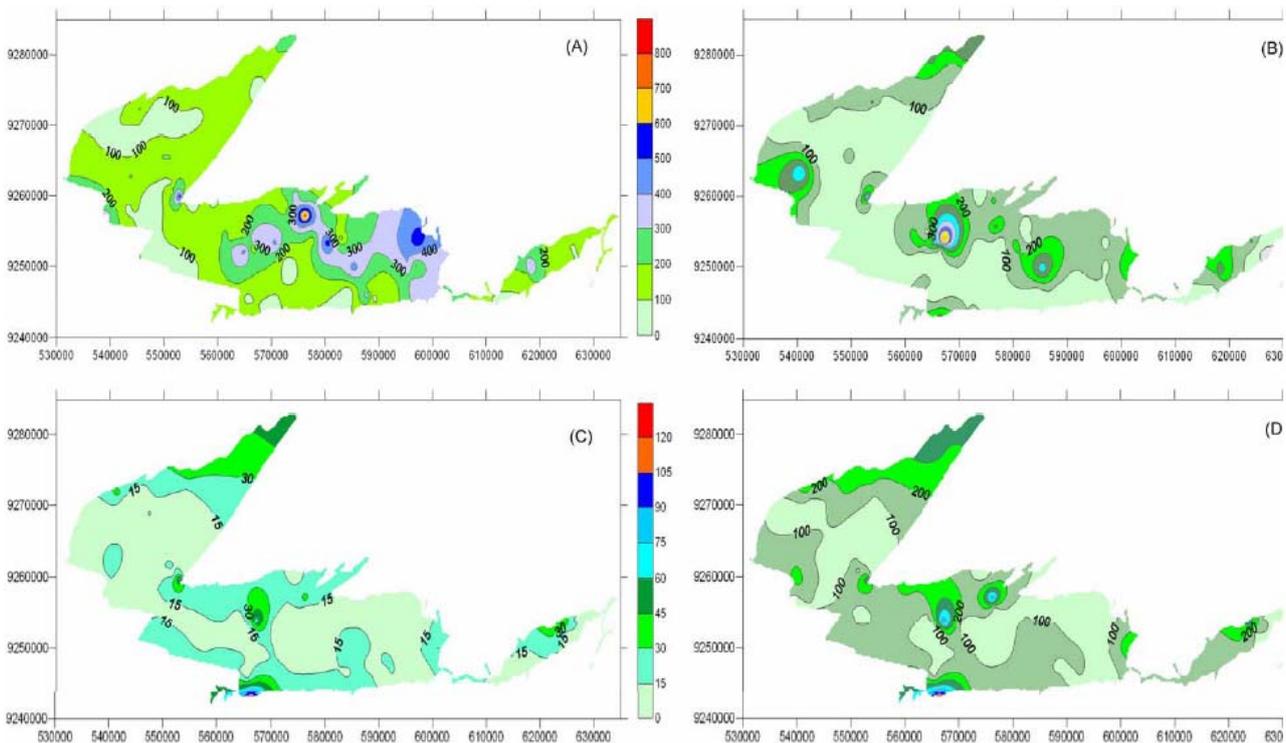


Figura 5 - Mapas da distribuição espacial na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe dos parâmetros: (A) Sódio (mg/L); (B) Cloreto (mg/L); (C) Magnésio (mg/L) e (D) Dureza (mg/L).

Seguindo a mesma distribuição espacial da condutividade elétrica e do SDT, o sódio e o cloreto são mais elevados na sub-bacia de Sousa e menores na sub-bacia Triunfo-Brejo das Freiras,

exceto em duas áreas localizadas próximo das falhas de cisalhamento que limitam esta sub-bacia, sobre o Alto de Santa Helena. Essa distribuição iônica não se coaduna com as características de salinidade das águas subterrâneas contidas na formação Antenor Navarro, e sim com aquelas da formação Sousa, corroborando alterações na geologia da bacia, propostas por Albuquerque neste mesmo relatório.

7. ESTUDO DE VULNERABILIDADE E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS

As unidades geológicas foram assim classificadas (Figura 6) em relação ao seu índice de vulnerabilidade conforme a metodologia acima adotada:

- Vulnerabilidade Alta a Extrema - Compreendem as areias aluviais (Qal).
- Vulnerabilidade Moderada – Compreende a área de ocorrência do aquífero Antenor Navarro quando livre.
- Vulnerabilidade Alta - Compreende a área de ocorrência do aquífero Rio Piranhas.
- Vulnerabilidade Baixa - Compreende a área de ocorrência da formação Sousa Superior.

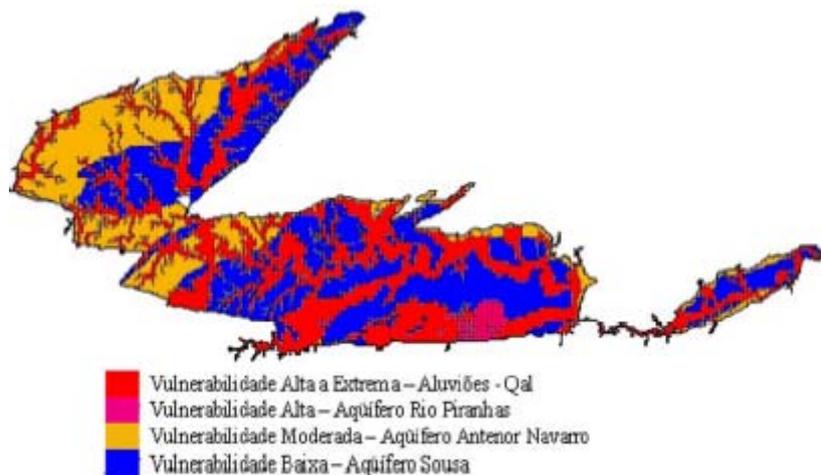


Figura 6 – Classificação da Bacia do Rio do Peixe em relação ao seu grau de vulnerabilidade.

A metodologia utilizada para definição da potencialidade de risco de contaminação dos aquíferos, também baseada em Foster & Hirata (1987), consistiu na interação entre a vulnerabilidade natural dos aquíferos e da caracterização das cargas contaminantes identificadas na região da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

Ao nível de reconhecimento e com base nos dados disponíveis foram cadastradas as principais atividades potencialmente geradoras de contaminantes, tais como, lixões, indústrias, postos de

gasolina, cemitérios, observadas as condições de saneamento básico e de agricultura irrigada existentes na região, associando-as, quando possível, a classe do contaminante, o tipo de solo, e proximidade de cursos d'água superficiais e de captações de água subterrânea, etc.

Na Figura 7 estão indicadas todas as fontes potenciais de poluição cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, enquanto na Figura 8 estão selecionadas as principais áreas com potencial risco de contaminação, quais sejam:

Área A – região ao entorno da cidade de Sousa com risco moderado a alto e área

Área B – região ao entorno da sede do município de São João do Rio do Peixe, também com risco de contaminação de moderado a alto.

Área C – toda a área restante da bacia pode ser considerada como tendo baixo risco de contaminação.

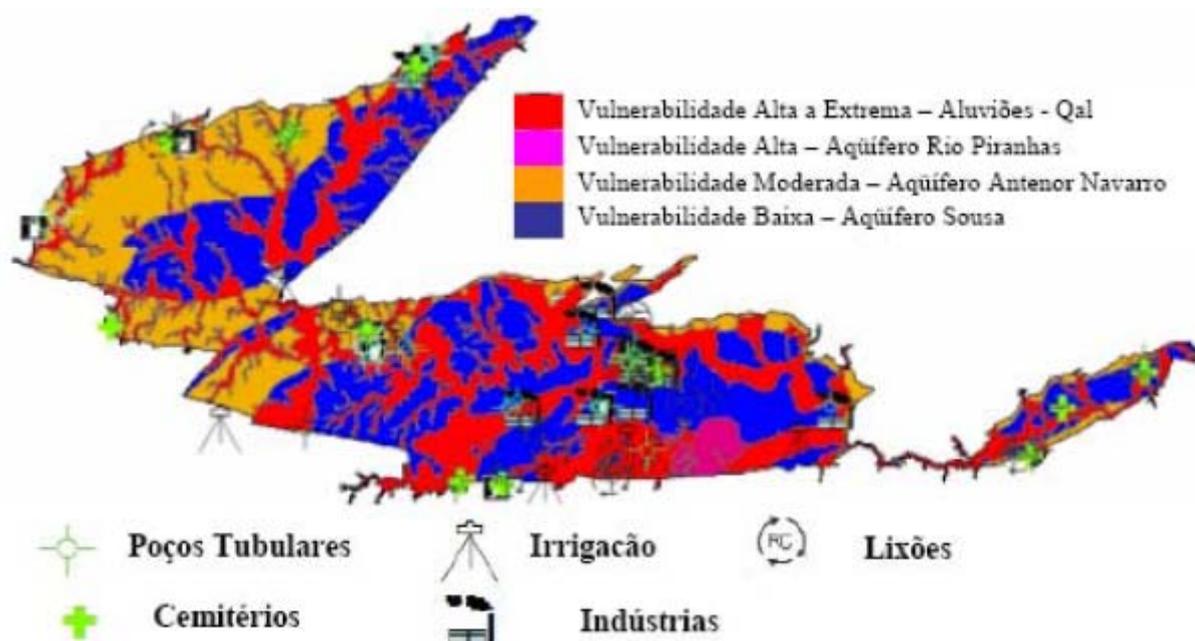


Figura 7 – Localização das fontes potenciais de poluições cadastradas na Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

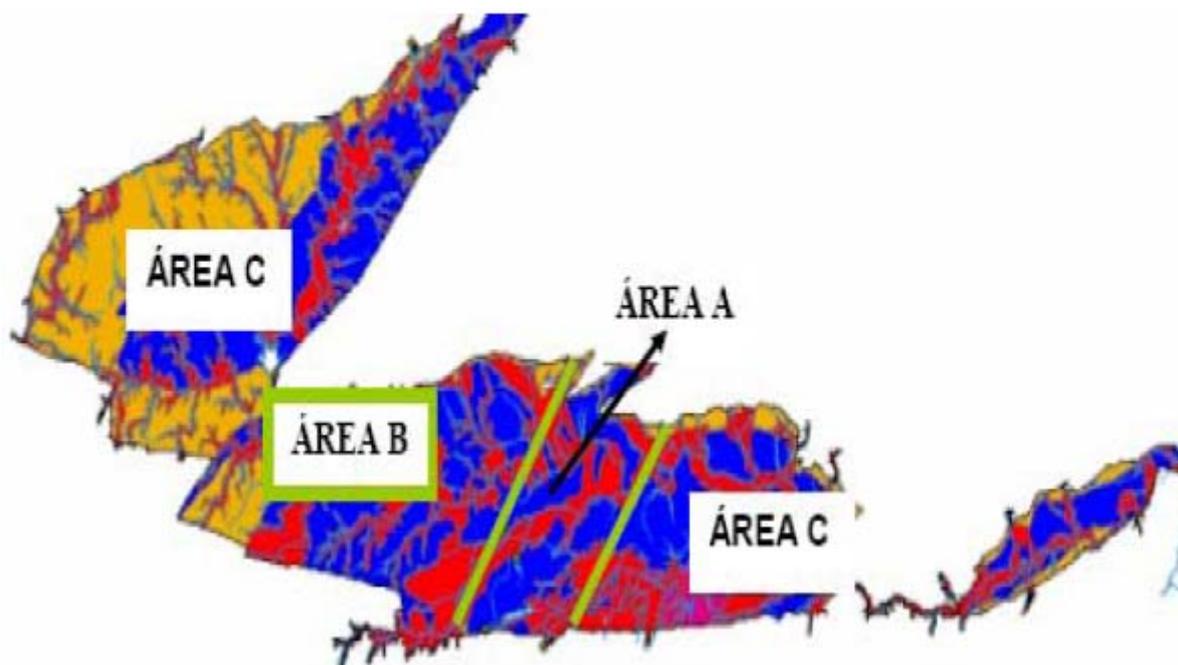


Figura 50 – Risco de contaminação; Áreas A e B – risco moderado a alto, Área C – risco baixo de contaminação.

8. SUBSÍDIOS À GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Zoneamento Explotável

A aplicação do modelo consistiu em se fazer a verificação do volume anual da recarga para a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, sendo esta igual à chamada reserva renovável e disponível para gestão hídrica da bacia. O modelo permite também verificar o comportamento do sistema frente a explorações significativas deste.

Para avaliar o comportamento do aquífero diante de um possível aumento das retiradas de água, foram realizadas simulações do sistema considerando retiradas anuais do sistema.

Quatro cenários de retiradas foram simulados pelo modelo, sendo o primeiro (em regime estacionário) e o segundo (em regime transitório), ambos com 180 dias de duração e vazão de bombeamento de 250 m³/dia/poço. Considerando os 194 poços existentes, isto equivale a um volume total de 8.730.000 m³. O terceiro e o quarto cenários foram respectivamente idênticos, com exceção da vazão, que foi de 500 m³/dia/poço, resultando num volume bombeado total de 17.460.000 m³.

Em linhas gerais a simulação mostra que o aquífero não apresenta rebaixamentos significativos, decorrentes das retiradas simuladas, atingindo os maiores valores nas bordas da

bacia, principalmente na extremidade superior da sub-bacia de Brejo das Freiras, próximo ao município de Uiraúna.

Desta forma, pode-se concluir que não há fortes restrições para exploração racional de água subterrânea em qualquer uma das sub-bacias.

Obras Hídricas recomendadas e outras considerações

Evidentemente, as obras hídricas recomendadas devem ser projetadas em função das condições de jazimento e de circulação das águas subterrâneas nas diversas unidades aquíferas da bacia: Antenor Navarro, Sousa, Rio Piranhas e Aluvial.

Para o aquífero Aluvial, ocorrente, de uma maneira geral, em condições rasas de jazimento e circulação, pequenas espessuras saturadas e, conseqüentemente, baixas transmissibilidades, são recomendados poços escavados, de grande diâmetro (2 ou mais metros, a depender de profundidades e vazões demandadas) e, em alguns casos de demandas maiores, a construção de barragens subterrâneas. Nestes casos estudos prévios para conhecimento de litologias e de espessuras serão necessários à definição dos locais destes represamentos do fluxo subsuperficial.

Em áreas deste aquífero em que o pacote aluvial seja francamente arenoso e espessura saturada relativamente grande (6 metros ou mais), pode-se optar por perfurações de poços de pequeno diâmetro (10 polegadas ou mais) como forma de obtenção de vazões, relativamente, elevadas. Uma outra obra recomendada para aquíferos aluviais é a construção de poço tipo coletor com drenos radiais, ou do poço Bico-de Pato, de alvenaria seca de tijolos com forma e dimensões especiais.

Em relação aos demais aquíferos, a captação somente pode ser efetivada através da perfuração de poços tubulares, de pequeno diâmetro, profundos. Isto exige a elaboração prévia de projetos de poços que contemplem as condições de jazimento e circulação desses aquíferos, de um lado, e os aspectos socioeconômicos de outro, entre eles a vazão requerida. De uma maneira geral, com respeito à profundidade de captação e diâmetro, pelo nível de conhecimento atual das condições de circulação e fluxo, recomendam-se, orientativamente, as seguintes condições de perfuração de poços:

. Para o Antenor Navarro, na área de recarga na sub-bacia de Triunfo-Brejo das Freiras, poços com profundidades de até 250 metros, quando se espera que tenham atingido o embasamento cristalino impermeável;

. Para o Antenor Navarro, na área sob carga de pressão, exercida pelo pacote de sedimentos sobreposto (formações Sousa, Rio Piranha e Aluvial), poços entre 250 e, pelo menos, 1.000 metros

de profundidade, de modo a captar toda espessura aquífera, atingindo-se o embasamento cristalino impermeável;

. Para os níveis aquíferos intercalados no aquífero Sousa, a julgar pelas perfurações já encetadas, a profundidade dos poços deve situar-se em torno dos 50 a 60 metros, podendo, eventualmente, na dependência do conhecimento hidro-lito-estratigráfico (existência de duas ou mais lentes areníticas saturadas), as perfurações atingirem os 100m ou mais;

. Para o aquífero Rio Piranhas, recomendam-se poços com 100m de profundidade;

Em todos os casos, estes poços devem ser filtrados em toda sua extensão produtora, com diâmetros não inferiores a 6 polegadas.

Evidentemente, no momento, todas estas recomendações são genéricas. A sua execução dependerá das vazões demandadas e da possibilidade de serem atendidas com estas obras, em número em que a relação custo-benefício seja aceitavelmente positiva. Isto exige um conhecimento das condições de oferta, ainda, não disponível, de vez que os poços até hoje perfurados na bacia não preenchem os requisitos definidos pelas condições de jazimento e de circulação dos aquíferos da bacia. Talvez, a exceção ocorra com as captações das unidades aquíferas contidas na formação Sousa.

9. BIBLIOGRAFIA

- 1) ALBUQUERQUE, J do P. T. 1984. *Os Recursos de Água Subterrânea do Trópico SemiÁrido do Estado da Paraíba*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1984.
- 2) FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. C. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de águas subterráneas. Una metodología basada em datos existentes*. Lima: CEPIS, 1991. 81p.
- 3) FRANÇOLIN, J. B. 1992. *Analyse Structurale du Bassin du Rio do Peixe*. Tese de doutorado, Université de Rennes, Rennes, França.
- 4) FUNCEME.2007. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em: <http://www.funceme.br/>
- 5) LIMA FILHO, M.F. 1991. *Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia do Rio do Peixe (PB)*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia., Universidade Federal de Pernambuco. 1991
- 6) ROCHA, D.; AMARAL C. 2006. *Hidrogeologia da Bacia do Rio do Peixe - Geologia da Bacia do Rio do Peixe*. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Recife-PE, 2006.
- 7) SOIL CONSERVATION SERVICE. 1972. *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, available from U. S. Government Printing Office, Washington D.C.
- 8) THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1955. *The water balance*. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104 pp.