

DIAGNÓSTICO QUALI-QUANTITATIVO DO AQUÍFERO FREÁTICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ -RS

Marta Rubbo¹; Ricardo Giumelli Marquezan²; Nelson Luna Caicedo³ & Marcos Imério Leão⁴

Resumo - Este artigo trata do estudo quali-quantitativo do aquífero freático da bacia hidrográfica do rio Gravataí como parte integrante do projeto “Identificação das Alternativas Possíveis e Prováveis para a Regularização das Vazões do Rio Gravataí”.

Desta forma, através da simulação do fluxo bidimensional foi estabelecido o padrão do escoamento de fluxo regional obtidos por modelo numérico e, para conhecimento do aspecto qualitativo foram realizadas coletas de amostras d’água em piezômetros para posterior análise.

A modelagem apresentou como contribuição da porção livre do aquífero para a drenagem superficial o valor equivalente a uma descarga de 2,66 m³/s que representa 7,7% do valor estimado da vazão das águas superficiais da bacia. A análise da qualidade da água mostrou-se apta apenas para dessedentação animal e agrícola, devido a alta concentração de ferro (0,3 mg/L) e turbidez sendo inapta ao consumo humano.

Abstract - This paper describes a study of aquifer water quality and quantity in the drainage basin of the Rio Gravataí, the study being part of a project entitled “Identification of Possible and Probable Alternatives for Regularizing Flows in the Rio Gravataí”.

Patterns of regional flow were established by simulating two-dimensional fluxes with numerical models, and water samples were collected in piezometers for later analysis to give information on water quality aspects.

The model showed that the contribution by the free portion of the aquifer to surface drainage was equal to a discharge of 2.66 m³/s, which represents 7.7% of the estimated surface water flow in the basin. Analysis of water quality showed that it was suitable only for livestock and agricultural use, because its high iron content (0.3 mg/L) and turbidity makes it unsuitable for human consumption.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Caixa Postal 15029 – CEP 91501-970 Porto Alegre-RS, Tel./Fax: (14) 33167509, mrubbo@iph.ufrgs.br

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Caixa Postal 15029 – CEP 91501-970 Porto Alegre-RS, Tel./Fax: (14) 33167509, ricardo@orion.ufrgs.br

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Caixa Postal 15029 – CEP 91501-970 Porto Alegre-RS, Tel./Fax: (14) 33167509, caicedo@iph.ufrgs.br

⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Caixa Postal 15029 – CEP 91501-970 Porto Alegre-RS, Tel./Fax: (14) 33167509, imerio@iph.ufrgs.br

Palavras-chave – modelagem, hidroquímica, lençol freático

INTRODUÇÃO

O presente estudo encontra-se inserido no contexto do trabalho “Identificação das Alternativas Possíveis e Prováveis para a Regularização das vazões do rio Gravataí” que tem como objetivo superior garantir o processo de gerenciamento conjunto, entre o estado e a comunidade, dos recursos hídricos da bacia do rio Gravataí, conforme determina a Lei nº 10.350/94, que institui o sistema Estadual de Recursos Hídricos previsto no Art. 171 da Constituição do Estado.

A bacia hidrográfica do rio Gravataí engloba uma região com grandes conflitos pelo uso dos recursos hídricos devido a numerosa população a ser atendida, ao número apreciável de indústrias e a grande área de cultivo com destaque para as lavouras de arroz.

Para identificar as alternativas de intervenções estruturais e não estruturais que proporcionem a regularização das vazões do rio Gravataí incluindo a contribuição de áreas naturais, tais como banhados, visando o atendimento das demandas atuais e futuras e em conformidade com os usos definidos pelo enquadramento dos recursos hídricos da bacia hidrográfica em classes de usos, tornou-se fundamental a consideração do potencial das águas subterrâneas.

Para tanto, realizou-se a modelagem do fluxo subterrâneo da camada livre do aquífero objetivando-se entender o comportamento do lençol freático através da simulação bidimensional do fluxo. Paralelamente foram realizadas coletas de amostras d’água em piezômetros para análise dos parâmetros hidroquímicos.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA

A bacia hidrográfica do Rio Gravataí está localizada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Estende-se entre Porto Alegre e o delta do rio Jacuí a oeste, e a zona de lagunas da costa do Atlântico a leste, entre as longitudes 50°27' e 51°12' oeste. Ao norte faz limite com a bacia hidrográfica do rio dos Sinos, e ao sul com os banhados e arroios que escoam para a Lagoa dos Patos, entre as latitudes de 29°45' e 30°12' sul.

Com área de drenagem aproximada de 2.020 km², abriga área total ou parcial de nove municípios. A Figura 1 permite visualizar a localização da bacia hidrográfica no estado do Rio Grande do Sul.

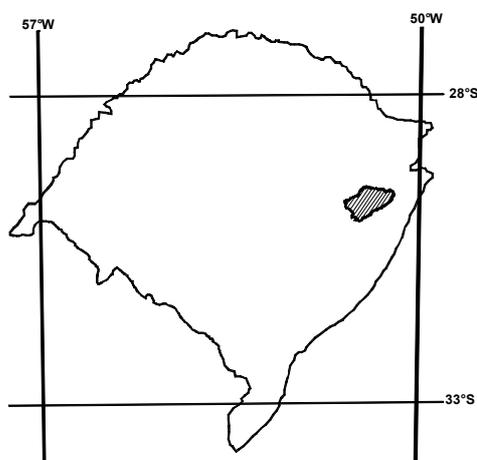


Figura 1 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Gravataí.

Topografia

A bacia hidrográfica do rio Gravataí apresenta elevações ao norte, sul e oeste, envolvendo uma planície central, no sentido sudoeste-nordeste. Em relação ao nível médio do mar do hidrógrafo de Torres – RS, as elevações ao norte, alcançam altitudes médias de 300 m, tendo encostas íngremes e topos planos. Ao sul e sudeste (Coxilha das Lombas), as altitudes são menores, com cerca de 150 e 100 m, respectivamente.

Entre estas duas elevações, no município de Santo Antônio da Patrulha, existe uma grande área plana e alagadiça, formada por três banhados (Grande, dos Pachecos e Chico Lomã). Atualmente, este complexo de banhados é denominado, simplesmente, Banhado Grande.

Esta planície central é maior na metade leste da bacia, tendo em média 45 km de comprimento e 10 km de largura. Nesta região, à leste, permanece remanescente a área de banhados e, a oeste o curso do rio Gravataí, que recebe a contribuição das águas de dois terços da área total da bacia. Cerca de 30% da área da bacia é plana ou com pequena declividade, incluindo-se os banhados, os terraços adjacentes e os vales.

Hidrografia

O rio Gravataí nasce próximo ao litoral do estado do Rio Grande do Sul, no município de Santo Antônio da Patrulha. A nascente não é claramente definida, já que as planícies alagadas vão afunilando ao longo de mais ou menos 16 km. Do ponto denominado Passo do Vau (antigo “*funil*” que fecha o exutório dos banhados) até a foz, o rio Gravataí possui 39 km de extensão. O rio corre de leste para oeste e deságua no Lago Guaíba.

O rio Gravataí possui um regime hidrológico peculiar e complexo recebendo água apenas das vertentes, alimentadas pelas chuvas, e dos riachos formados por essas. Não há nenhum afluente de porte. Além disso, as terras da bacia são baixas e planas, com desníveis muito suaves.

Clima

Segundo o sistema de Köppen, o clima tem a classificação de *Cfa*, isto é, um clima subtropical, caracterizando-se por chuvas em todos os meses e por temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. e, do mês mais frio entre 3° e 18°C. Os fatores climáticos registrados por longos períodos em pontos extremos da bacia, mostram somente pequenas diferenças entre si, permitindo considerar a bacia como unidade climática homogênea. A topografia, relativamente suave, também não favorece a formação de anormalidades microclimáticas de magnitude considerável.

Geomorfologia

A Bacia Hidrográfica do rio Gravataí localiza-se numa grande depressão, balizada ao norte pelo Planalto das Araucárias e a leste pela extensa planície costeira, que compõe a região leste do Estado do Rio Grande do Sul.

De acordo com o IBGE (1986) são individualizados três Domínios Morfoestruturais na região, caracterizados a partir dos modelados e seus processos evolutivos, quais sejam: Domínio dos Depósitos Sedimentares, Domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares e Domínio dos Embasamentos em Estilos Complexos.

O Domínio Morfoestrutural dos Depósitos Sedimentares é representado na bacia pela Região Geomorfológica Planície Costeira Interna, que corresponde a uma região plana, homogênea, sem dissecação. Esta, compreende, por sua vez, as unidades geomorfológicas Planícies e Terraços Lagunares, Coxilhas das Lombas e Depressão Flúvio-Coluvionar.

O Domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares é representado na área da bacia pelas regiões geomorfológicas Planalto das Araucárias e Depressão Central Gaúcha.

O Domínio dos Embasamentos em Estilos Complexos está representado pela Região Geomorfológica Planalto sul-rio-grandense, que na área divide-se nas unidades geomorfológicas Planalto Residual Canguçu e Planalto Rebaixado Marginal.

Geologia

A seguir faz-se uma breve descrição da seqüência litoestratigráfica elaborada a partir da compilação de trabalhos geológicos executados em épocas distintas somados a vistorias realizadas na área.

- Pré-Cambriano Indiviso: as rochas mais antigas afloram na porção sudoeste da bacia, região de Porto Alegre, com pequenas áreas isoladas, representadas na porção centro-oeste em Gravataí e no centro-sul. Composto por granitos e migmatitos com fraturamento interno predominantemente NE e NW.
- Formação Rio Bonito: de idade Permiana ocorre na região centro-oeste da bacia. A fácies fluvial é constituída por conglomerados, arenitos finos e médios com intercalações de siltitos e argilitos. As fácies lagunar, paludal e de transição são representadas por siltitos e argilitos com intercalações de arenitos finos e siltitos carbonosos.
- Formação Palermo: é constituída por arenitos conglomeráticos e siltitos arenosos silicificados.
- Formação Irati: constituída por espesso pacote de folhelhos alternados com camadas, bancos e lentes de calcários. O ambiente de deposição é não marinho de águas rasas a moderadamente profundas com má circulação de fundo.
- Formação Estrada Nova: os sedimentos desta formação ocorrem no noroeste da bacia e na parte média da sub-bacia do Arroio Demétrio. Predominam folhelhos argilosos com intercalações de arenitos finos na base, gradando ao topo para arenitos finos e siltitos.
- Formação Rosário do Sul: pertencente ao período Triássico, constitui-se de arenitos finos a grosseiros, quartzosos, englobando fragmentos de argilitos, lamitos e arenitos provenientes da erosão da própria formação. A Formação Rosário do Sul transiciona para a Formação Botucatu.
- Formação Botucatu: são evidenciados 2 horizontes: basal constituído de arenitos muito finos e silticos com feições morfológicas próprias tais como coxilhões maiores; horizonte superior de maior uniformidade litológica predominando arenitos finos e médios e elevado grau de diagênese devido às ferrificações e silicificações.
- Formação Serra Geral: de idade Jurássico Superior. O limite norte e nordeste da bacia do Rio Gravataí é estabelecido pela Formação Serra Geral em paralelismo à Formação Botucatu. Na área estudada constitui o grande divisor de águas entre as bacias do Rio Gravataí e Rio dos Sinos, com altitudes de até 350m. Ocorrem derrames, soleiras e diques, tanto em massas contínuas, como em corpos isolados como testemunhos de erosão. São rochas com texturas finas e afaníticas, raramente pórfiras, constituídas por plagioclásios e piroxênios.
- Depósitos Gravitacionais de Encosta: esta unidade é aquela que possui a maior representatividade na bacia. Tratam-se de depósitos de deslizamento formados por fragmentos de areia a matações, provenientes das unidades vizinhas, envoltos por matriz argilosa ou argilo-síltica e baixo grau de compactação.

- Depósitos de Dunas Litorâneas: a bacia na sua porção sul está limitada por esta unidade, que ocorre como uma faixa contínua de superfície ondulada constituída por colinas com até 140m de altura, que vêm a formar o corpo principal da Coxilha de Lombas. São depósitos de areias quartzosas de granulação fina a média com matriz argilosa.

- Depósitos Lagunares, Flúvio-Lagunares e Paludais: os sedimentos lagunares e paludais ocorrem de modo contínuo desde a localidade de Águas Claras (SW da bacia) até Chico Lomã (extremo leste da bacia). Os depósitos lagunares e flúvio-lacustres são areno-sílticos-argilosos, predominantemente bem selecionados, exibindo laminações plano-paralelas e cruzadas, freqüentes lentes de material síltico-argiloso e eventualmente areno-conglomerático.

Os Depósitos Fluviais são comuns em toda a extensão da bacia, em forma de terraços, planícies aluvionares e canais fluviais. São depósitos isolados, não litificados, compostos de cascalhos e areias ou corpos tabulares sílticos-argilosos com restos vegetais. A estratificação apresenta-se irregular com imbricações de seixos. Estão distribuídas em duas faixas paralelas, ao norte e ao sul do Banhado Grande.

- Depósitos Atuais de Encosta: mostram arenitos conglomeráticos, arenitos e lamitos avermelhados, maciços ou com estrutura acanalada.

Hidrogeologia da área

A bacia hidrográfica do rio Gravataí apresenta-se bastante complexa do ponto de vista geológico. Esta complexidade, determinada pela interdependência das litologias estruturais rígidas de área, reflete-se no comportamento hidrogeológico. Os sistemas aquíferos presentes na bacia do rio Gravataí englobam grande parte das formações existentes no estado, de modo que pertencem a um grande número de províncias hidrogeológicas como estabelecido por Hausman (1995) e citados a seguir.

- Sistema Aquífero do Embasamento Cristalino: constituiu-se de afloramentos de rochas antigas pertencentes ao Escudo Sul-riograndense, representadas por rochas graníticas, granitóides e gnaisses. Também caracteriza-se pela presença de espessa camada de alteração superficial, com solos espessos e leques aluviais. Basicamente, trata-se de um aquífero fraturado. Vazões entre 0,2 e 5 m³/h.

- Sistema Aquífero Permo-Carbonífero: compõe-se de lentes ou camadas arenosas, intercaladas com siltitos e argilitos, que ora funcionam como aquíferos ou aquícludes. Nas proximidades do contato com as rochas graníticas, freqüentemente ocorrem

conglomerados. Na seção que atravessa a Formação Rio Bonito predominam siltitos carbonosos com camadas de carvão. Vazões em torno de 2 m³/h.

- Sistema Aquífero Guarani: constituiu-se de sedimentos finos, em geral avermelhados pertencentes a Formação Botucatu e Formação Rosário do Sul, intercalado em depósitos mais grosseiros de paleo-canais. O aquífero é constituído por arenitos originados de deposição eólica em um ambiente desértico, cuja característica principal é a presença de espessos pacotes arenosos com estratificação cruzada de grande amplitude. Vazões mais frequentes, até 20m³/h podendo chegar a 60 m³/h.
- Sistema Aquífero Basáltico: constituiu-se de uma rocha basáltica de cor cinza a cinza-escuro, pertencentes a Formação Serra Geral, comportando-se como um aquífero fraturado, com características de heterogeneidade e anisotropia pronunciadas, em que as descontinuidades que não são preenchidas por minerais secundários são condutos que permitem o fluxo da água.
- Sistema Aquífero Litorâneo: este sistema compreende todos os aquíferos relacionados com a deposição sedimentar em ambiente litorâneo durante o período quaternário. Na região da bacia ocorrem dois subsistemas principais – subsistema Guaíba e subsistema Itapuã.
- Subsistema Guaíba: é composto por sedimentos holocênicos originados em ambiente deltáico e estuarino, influenciados por águas rasas de origem marinha que penetravam pelo vale do rio Gravataí. Vazões que podem alcançar 30 m³/h.
- Subsistema Itapuã: este subsistema é formado por litologias representantes de depósitos sedimentares litorâneos de barreira marinha, que recobrem formações geológicas pré existentes. As espessuras são muito variáveis podendo alcançar 140 metros. A sedimentação predominante é de origem eólica, arenosa e de granulometria fina, bastante uniforme. Quando os teores de argila não são altos, este subsistema comporta-se como o melhor aquífero da bacia do Rio Gravataí. Vazões entre 10 e 25 m³/h.

MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos computacionais são ferramentas utilizadas para representar uma versão simplificada da realidade. A fase preliminar do estudo consiste no desenvolvimento do modelo conceitual do problema, onde toda complexidade do meio poroso com diversas propriedades hidráulicas, é substituída por um meio equivalente composto por camadas distintas, de forma a satisfazer às equações diferenciais parciais de fluxo e às condições iniciais e de contorno a elas impostas. Desta forma, os modelos só podem ser utilizados como ferramentas eficientes quando há disponibilidade

de dados de campo suficientes para a adequada calibração dos mesmos e conhecimento claro do problema.

A modelagem das águas subterrâneas envolve fases distintas que permitem uma aproximação adequada do sistema real através da elaboração do modelo conceitual. Estas fases incluem a compilação das informações históricas, levantamento dos dados de campo, seleção e implementação do modelo e calibração para verificação do modelo. As condições de contorno a serem utilizadas no modelo são definidas conforme a área a ser estudada e os objetivos da simulação. Com base no citado, a seguir é feita a descrição do modelamento realizado.

Equação de Fluxo Subterrâneo

Na simulação do fluxo subterrâneo foram feitas algumas simplificações alicerçadas no conhecimento do contexto hidrogeológico da região. Considerou-se as águas subterrâneas pertencendo a um sistema de aquíferos não confinado.

Nesta situação, a equação do fluxo horizontal no regime permanente para duas dimensões é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm Q(x, y) = 0 \quad (1)$$

onde: K = condutividade hidráulica; h = carga hidráulica e $Q(x, y)$ = fluxo volumétrico de retiradas (-) e entradas(+) por unidade de superfície de área do aquífero.

A modelagem do fluxo de água efetuada com o uso do Flowpath emprega o método de diferenças finitas para resolver a equação 1. O sistema aquífero é então discretizado para representar o domínio de interesse. A discretização consiste em sobrepor uma malha de células (células de diferenças finitas) associada a um arranjo de “nós” nos quais são calculadas as cargas hidráulicas.

Velocidade do Fluxo das Águas Subterrâneas

A velocidade do fluxo das águas subterrâneas obtida corresponde à velocidade linear média (velocidade de percolação) definida a partir da Lei de Darcy que relaciona as propriedades do meio poroso, o gradiente hidráulico e o fluxo das águas subterrâneas. Assim, tem-se:

$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2)$$

onde: q_x, q_y = componentes do fluxo de Darcy (velocidade de Darcy) nas direções x, y, com dimensional (LT^{-1}).

$$\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} = \text{gradiente hidráulico nas direções } x, y$$

A velocidade linear média das águas subterrâneas em x, y é dada então por:

$$v_x = \frac{q_x}{\theta}, v_y = \frac{q_y}{\theta} \quad (3)$$

onde: θ = porosidade efetiva (adimensional).

Definição do Domínio do Modelamento de fluxo

A região utilizada para modelagem do fluxo de água compreende uma área com 72 km de comprimento e 54 km de largura onde está compreendida a bacia hidrográfica do rio Gravataí. Esta área foi discretizada por uma malha regular com células de 500 m x 500 m constituindo, assim, o domínio horizontal do modelo. O domínio vertical foi estabelecido discretizando-se uma camada aquífera superficial com 20 metros de espessura e delimitando-a lateralmente, junto aos terrenos com cotas altimétricas inferiores a 80 metros. Esta camada aquífera é formada por sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares pertencentes as formações geológicas Quinta e Serra de Tapes. As regiões situadas em altitudes superiores a 80 metros, como o caso do escarpamento da Serra Geral, o maciço granítico da região de Porto Alegre e a área da Coxilhas das Lombas foram consideradas áreas de não ocorrência da camada aquífera.

As condições de contorno estabelecidas no domínio do modelo, consideraram as células externas a camada aquífera como regiões de não-fluxo ou inativas, e foram desativadas no modelamento.

Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno para a área do modelamento foram estabelecidas com base no conhecimento hidrogeológico dessa região. Considerou-se que o sistema de drenagem superficial - formado pelo rio Gravataí e os arroios Feijó, Demétrio, Alexandrina, arroio do Pinto, Passo Grande, Chico Lomã e região do Banhado Grande - representariam a porção aflorante das águas subterrâneas. A partir disso, então, foram atribuídas as cargas hidráulicas obtidas através de registros em 13 estações linigráficas situadas no rio Gravataí, tributários e região do Banhado Grande. Estas informações permitiram fixar uma condição de contorno de carga hidráulica constante ao longo destes cursos de água e junto ao perímetro do Banhado Grande. Os valores de carga hidráulica foram tomados considerando o menor valor do nível de água registrado no mês de janeiro de 2001. Foram empregados os seguintes valores de cargas constantes para o rio Gravataí e tributários : 12,11 m na estação Guará; 7,98 m na estação Albatroz; 16,27 m no arroio Feijó; 16,60 m no arroio Demétrio e 15,81 m no arroio Alexandrina. Na região do Banhado Grande foram

empregados os seguintes valores de cargas constantes: 28,75 m no arroio Passo Grande; 21,54 m na borda nordeste do banhado; 21,19 m na confluência com o arroio Chico Lomã e 13,93 m na borda sudoeste deste banhado.

Uma outra condição de contorno estabeleceu a condição de fronteira impermeável (região de não-fluxo) para as áreas com cotas altimétricas superiores a 80 metros.

Dados hidrológicos e hidrogeológicos empregados

A execução da simulação exigiu a implementação no modelo de um conjunto de dados que incluiu a designação das propriedades hidráulicas (condutividade hidráulica, porosidade efetiva), altitude da base da camada aquífera e condições de recarga.

A porosidade efetiva para os materiais geológicos do sistema aquífero foi atribuída com base nas características composicionais e texturais dos litotipos mapeados na região. Ressaltam-se os seguintes valores de porosidade efetiva para as unidades geológicas da bacia hidrográfica: 20% para os materiais geológicos do extremo sudoeste da bacia onde ocorrem rochas cristalinas; 25% para os materiais da porção central da bacia nas áreas de ocorrências de sedimentos quaternários (Formações Quinta e Serra de Tapes); 30% para os materiais da borda sudeste na região da Coxilha das Lombas (Formação Itapuã); 20% na borda norte, região de ocorrência das litologias mesozóicas; e 12% para os sedimentos da região do Banhado Grande.

A condutividade hidráulica na área de modelagem foi atribuída tomando como referência valores consagrados na literatura para os tipos litológicos semelhantes encontrados na bacia hidrográfica. Foram, então, atribuídas as seguintes ordens de grandeza para a condutividade hidráulica: 10^{-3} cm/s aos materiais geológicos das regiões de rochas cristalinas da porção sudoeste; 10^{-2} cm/s para os materiais da borda sudeste (Formação Itapuã) e porção central da bacia (formações Quinta e Serra de Tapes); 10^{-3} cm/seg para os materiais da borda norte (formações mesozóicas); e 10^{-5} cm/s para os materiais da região do Banhado Grande. Os valores de condutividade hidráulica obtidos acima propiciaram o melhor ajuste para a modelagem do fluxo. Tais valores são razoavelmente compatíveis com os dados pontuais de condutividade hidráulica obtidos através dos ensaios de permeabilidade executados a campo e testes de piezômetros. A ordem de grandeza da condutividade hidráulica nos pontos observados varia de 10^{-5} cm/s a 10^{-7} cm/s para os materiais geológicos da região do Banhado Grande e de 10^{-3} cm/s a 10^{-4} cm/s para os materiais da porção central da bacia e as áreas marginais à região da Coxilha das Lombas. A condutividade hidráulica nos pontos observados corresponde a valores associados a materiais sílticos e areno-siltosos, Freeze e Cherry (1979).

O modelo de fluxo foi abastecido também com a profundidade da base da camada aquífera. Considerou-se uma espessura de 20 metros para a camada saturada estimada a partir de informações de poços cacimbas e piezômetros perfurados na região.

As condições de recarga do aquífero na modelagem foram então estabelecidas definindo-se a taxa com que esta se processa. As taxas de precipitação (expressa em mm/ano) empregadas foram derivadas dos mapas de isoietas elaborados a partir de dados de precipitação média anual no período de 1991 a 1999. Foram também empregados critérios que consideraram a topografia do terreno, cobertura de solos e substrato geológico para a definição das áreas de recarga. Considerou-se a região topograficamente deprimida da porção central da bacia hidrográfica como possuidora de taxas de recarga de 6 mm/ano. Dentro destas regiões as áreas dos banhados, como o Banhado Grande e Banhado dos Pachecos, possuem taxas de recargas ainda menores, respectivamente, 0,05 mm/ano e 1 mm/ano. Nesta modelagem de fluxo, estas regiões se identificariam preferencialmente, com os locais onde ocorre a saída das águas subterrâneas. As maiores taxas de recarga foram atribuídas a região das Coxilhas das Lombas e a borda norte da bacia hidrográfica com 100 mm/ano e a região de rochas cristalinas da porção sudoeste com 50 mm/ano. O ajuste da simulação das condições de fluxo foi feito mantendo constantes todos os outros parâmetros da modelagem e fazendo variar as condições de recarga.

Resultados obtidos

O resultado da modelagem, sob o regime de fluxo permanente, pode ser observado na Figura 2 que fornece o mapa piezométrico da bacia hidrográfica, permitindo a visualização da superfície freática do aquífero obtida na simulação. Neste mapa observa-se o controle do escoamento subterrâneo pela drenagem superficial. O padrão regional de fluxo subterrâneo na bacia tem característica aproximadamente centrípeta com relação ao eixo da bacia representado pelo rio Gravataí. Este padrão de escoamento ocorre, preferencialmente, no sentido das encostas que margeiam o divisor de águas da bacia para a região do Banhado Grande e o rio Gravataí, acompanhando a trajetória deste corpo d'água desde a localidade do Guará até o limite oeste da área. Localmente podem ser observados escoamentos subterrâneos secundários convergindo para o interior das sub-bacias drenadas pelos arroios Demétrio, Arroio Grande, Arroio do Pinto e Alexandrina. No Banhado Grande, o padrão de escoamento subterrâneo é convergente para esta região mostrando a influência, pelo menos, da porção livre dos aquíferos no suprimento de água para estes mananciais. Desta forma, a modelagem do fluxo expõe um quadro onde às descargas subterrâneas ocorrem junto à calha do rio Gravataí, aos tributários principais e na região do Banhado Grande. As zonas de recargas são representadas pelas áreas próximas ao divisor de águas

da bacia hidrográfica e junto às encostas superiores dos vales formados pelos principais tributários do rio Gravataí.

O balanço hídrico em toda a área de modelagem, efetuado no regime de fluxo permanente, mostrou que as perdas globais de água para o sistema de drenagem superficial (224.968,03 m³/dia) foram equilibradas pelas entradas de água devido a recarga natural (218.187,57 m³/dia) e os fluxos provenientes das drenagens com condição de carga constante (11.642,17 m³/dia). A área considerada neste balanço de massa abrangeu a região ativa do modelamento do fluxo com uma extensão de, aproximadamente, 1.600 km². O erro total no balanço de massa foi de 2,115%, sendo considerado aceitável para as condições desta modelagem, situando-se dentro do limite de tolerância. O valor da recarga encontrado na modelagem corresponde a $1,4 \times 10^{-4}$ m/dia sendo compatível com os valores de recarga obtidos no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Caicedo (1998). A contribuição dos mananciais subterrâneos da porção livre do aquífero para a drenagem superficial, para toda à área modelada e nas condições da simulação, é equivalente a uma descarga de 2,66 m³/s. Esse valor de referência perfaz 7,7% do valor estimado da vazão das águas superficiais (média da média anual no período 91 a 96), obtido a partir de observações no posto Passo das Canoas (área de aproximadamente 1.600 km²).

Verificação dos resultados

Para alcançar os resultados acima apresentados, foi necessária a realização de várias simulações. O produto obtido em cada uma delas, um mapa da superfície piezométrica, era avaliado comparando-se a distribuição das cargas hidráulicas calculadas (modelo simulado) com as cargas hidráulicas observadas (medidas) nos piezômetros e poços cacimbas. Através do método de tentativas e erros, procurou-se obter um produto com uma distribuição de cargas hidráulicas semelhante à obtida com as informações de campo. Estas operações foram também, acompanhadas, verificando-se o ajuste da reta de regressão formada pelos valores das cargas hidráulicas calculadas versus cargas hidráulicas observadas (piezômetros e poços cacimbas). Idealmente todas as observações deveriam estar posicionadas exatamente sobre a linha com 45° de inclinação. Os desvios da linha representariam, portanto, a imprecisão do resultado da simulação. A figura 3 mostra a reta de regressão da simulação. Constam também os valores obtidos do erro quadrático médio (raiz quadrada do somatório da diferença elevada ao quadrado entre cargas hidráulicas calculada e observada, dividida pelo número de cargas hidráulicas observadas) que expressa a qualidade do ajuste, com valores menores traduzindo ajustes melhores. Foi obtido valor de 8,45 metros para o erro quadrático médio para os valores de cargas hidráulicas do modelamento. Esses valores mostram que os resultados da simulação representam razoavelmente bem as condições do fluxo das águas subterrâneas nas áreas abrangidas na modelagem e são compatíveis com o

conhecimento que se dispõe destas regiões. Deve ser ressaltado que à medida que novas informações estejam disponíveis para abastecer este modelo de fluxo, pode-se promover o refinamento do resultado da modelagem, diminuindo, assim, o componente de incerteza nas condições da simulação.

QUALIDADE ATUAL DAS ÁGUAS DO LENÇOL FREÁTICO

A bacia hidrográfica do rio Gravataí apresenta duas regiões com características de ocupação distintas, uma com intensa atividade agropecuária, predominante no curso superior do rio, e outra no trecho inferior do rio, com uso urbano e industrial. Na zona rural é comum a utilização de poços chamados cacimba cuja água captada advém do aquífero livre.

Com a intenção de estabelecer um diagnóstico da qualidade da água desta fonte foram realizadas análises de amostras de água subterrânea em 10 piezômetros sendo analisados parâmetros físico-químicos no próprio local. Estes parâmetros foram: pH, condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido, temperatura e salinidade.

O potencial de hidrogênio, pH, que expressa a concentração de íons hidrogênio de uma solução, apresentou valores situados entre 4,4 e 6,7. Estes valores mostraram uma característica levemente ácida, abaixo dos limites admissíveis de pH que variam entre 5,5 e 9,5. Foi observado também que, a medida que o ponto de observação se afasta do banhado Grande, a água se torna mais ácida.

A condutividade que expressa a habilidade da água em conduzir a corrente elétrica, devido à presença de substâncias ionizadas dissolvidas, apresenta na água amostrada, valores situados entre $20\mu\text{S}/\text{cm}$ e $267\mu\text{S}/\text{cm}$, com o limite superior acima do valor característico das águas naturais de $150\mu\text{S}/\text{cm}$, porém tolerável, pois as águas para abastecimento público raramente excedem o valor de $750\mu\text{S}/\text{cm}$.

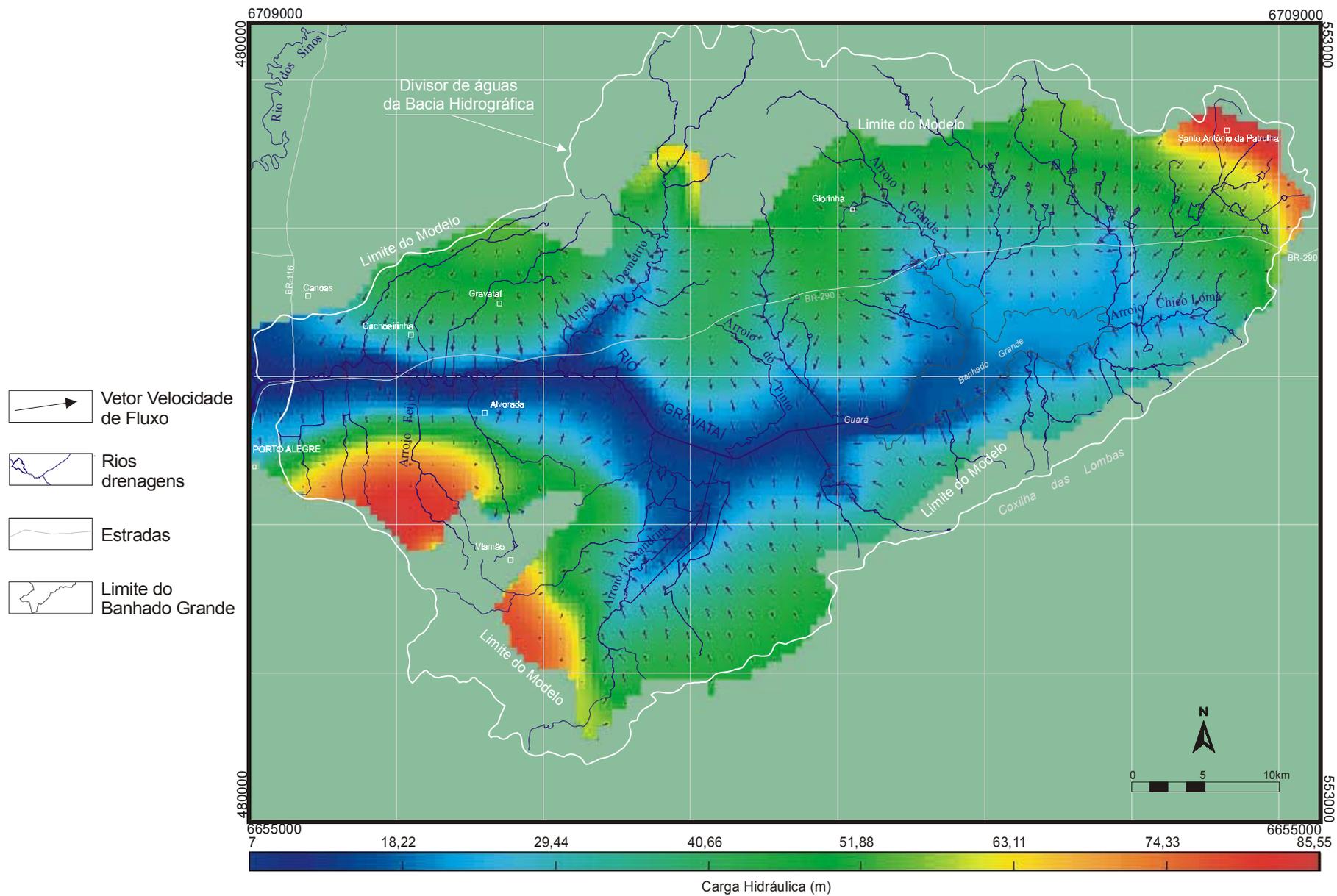


Figura 2 - Mapa piezométrico da bacia hidrográfica do rio Gravataí.

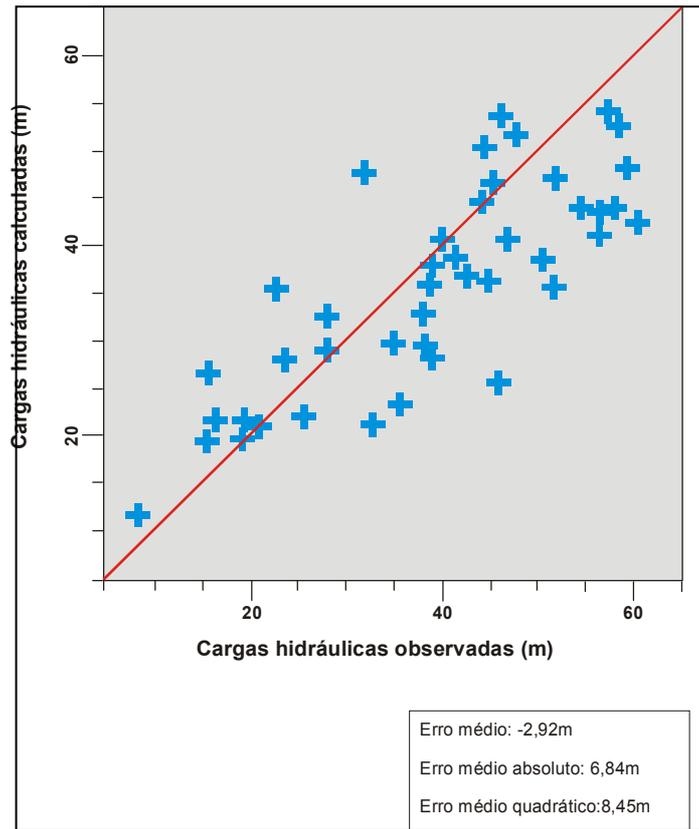


Figura 3 – Gráfico da calibração mostrando as cargas observadas versus cargas calculadas.

A turbidez decorrente da presença de substâncias em suspensão, orgânicas e inorgânicas em estado coloidal que absorvem e dispersam os raios luminosos, apresenta na água amostrada altos teores, bem acima do padrão de uma unidade, 1 NTU, usado para fins de potabilidade.

O oxigênio dissolvido apresenta valores que oscilam entre 1,09 mg/L e 10,29 mg/L, com predominância de valores inferiores a 5,0 mg/L. Estes valores são característicos de águas subterrâneas. As temperaturas da água subterrânea se apresentam satisfatórias para o abastecimento, inferiores a 26°C. Não foi detectada salinidade nas amostras coletadas.

A matéria sólida das amostras de água, que corresponde a toda matéria que permanece como resíduo após evaporação e secagem, apresenta em todas as amostras analisadas, valores inferiores a 1.000 mg/L, que é o valor máximo permissível.

A alcalinidade devida à presença de bicarbonatos, predomina nas águas coletadas junto ao Banhado Grande com valores em torno de 50 mg/L. Estes valores caracterizam as águas naturais. As águas mais afastadas do banhado Grande são menos bicarbonatadas do que as mais próximas, com teores de alcalinidade em torno 6 mg/L e 100 mg/L, respectivamente. As águas mais próximas do banhado são mais alcalinas, provavelmente, devido a presença de agrotóxicos.

A dureza, característica conferida a água pela presença de sais de metais alcalino terrosos (cálcio, magnésio, etc.) e alguns outros metais, em menor intensidade, caracterizam as águas

subterrâneas desta região como águas moles, por terem teores inferiores a 75 mg/L de CaCO₃.

O nitrito e o nitrato constituem o nitrogênio total oxidado. O nitrito nunca aparece em concentrações superiores a 0,1 mg/L. O limite de 10 mg/L de nitratos é imposto em águas de consumo para evitar a cianose. Todas as amostras satisfazem as limitações acima estabelecidas.

A quantidade de íons sulfatos na água é devida as reações da água com rochas sulfatadas e a oxidação bioquímica de sulfetos e outros compostos de enxofre. Todas as amostras apresentam valores inferiores a 250 mg/L, que é o máximo permissível.

Os cloretos ocorrem em águas naturais com variadas concentrações. Na maioria dos corpos de água, seus conteúdos são normalmente pequenos quando comparados a outros componentes principais. As amostras analisadas apresentam teores bem abaixo do limite de 250 mg/L.

Nas amostras de água subterrânea, foram determinados os teores de metais por Espectrofotometria de Absorção Atômica. Os valores encontrados, foram comparados com os valores recomendados pela Resolução CONAMA Nº 20/86 para águas de abastecimento de Classe 3. Os valores mostraram que as águas subterrâneas são satisfatórias em relação ao: Cromo (Cr), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn).

Em relação a Razão de Adsorção de Sódio (SAR), os valores encontrados para cada tipo geoquímico de água subterrânea foram os seguintes: a) para as 14 amostras cloratadas sódicas o SAR variou de 0,02 até 11,16; b) para as 6 amostras bicarbonatadas sódicas o SAR variou de 0,08 até 3,77; e c) para as 2 amostras bicarbonatadas cálcicas, o valor médio do SAR foi de 0,50. Finalmente, para a amostra cloratada cálcica o valor do SAR foi de 0,39. Conforme estes resultados, pode-se concluir que as águas subterrâneas analisadas são aptas para o uso em irrigação, entretanto, dependendo do tipo de cultura que se pretenda irrigar e do tipo de composto químico que se pretenda usar, é necessária a realização de um balanço químico apropriado para estabelecer a viabilidade química da água subterrânea desta região.

Quanto ao diagrama de Piper (Figura 3), as amostras foram agrupadas em quatro tipos geoquímicos: a) 14 amostras cloratadas sódicas, b) 6 amostras bicarbonatadas sódicas, c) 2 amostras bicarbonatadas cálcicas, e d) uma amostra cloratada cálcica. A diferença de comportamento geoquímico, acredita-se ser devido ao arcabouço ácido das rochas predominantes na região.

Como conclusão a estes resultados pode-se dizer que a água do aquífero livre são aptas apenas para dessedentação animal e uso agrícola ficando restrita sua utilização para consumo humano devido a alta concentração de ferro e turbidez elevada.

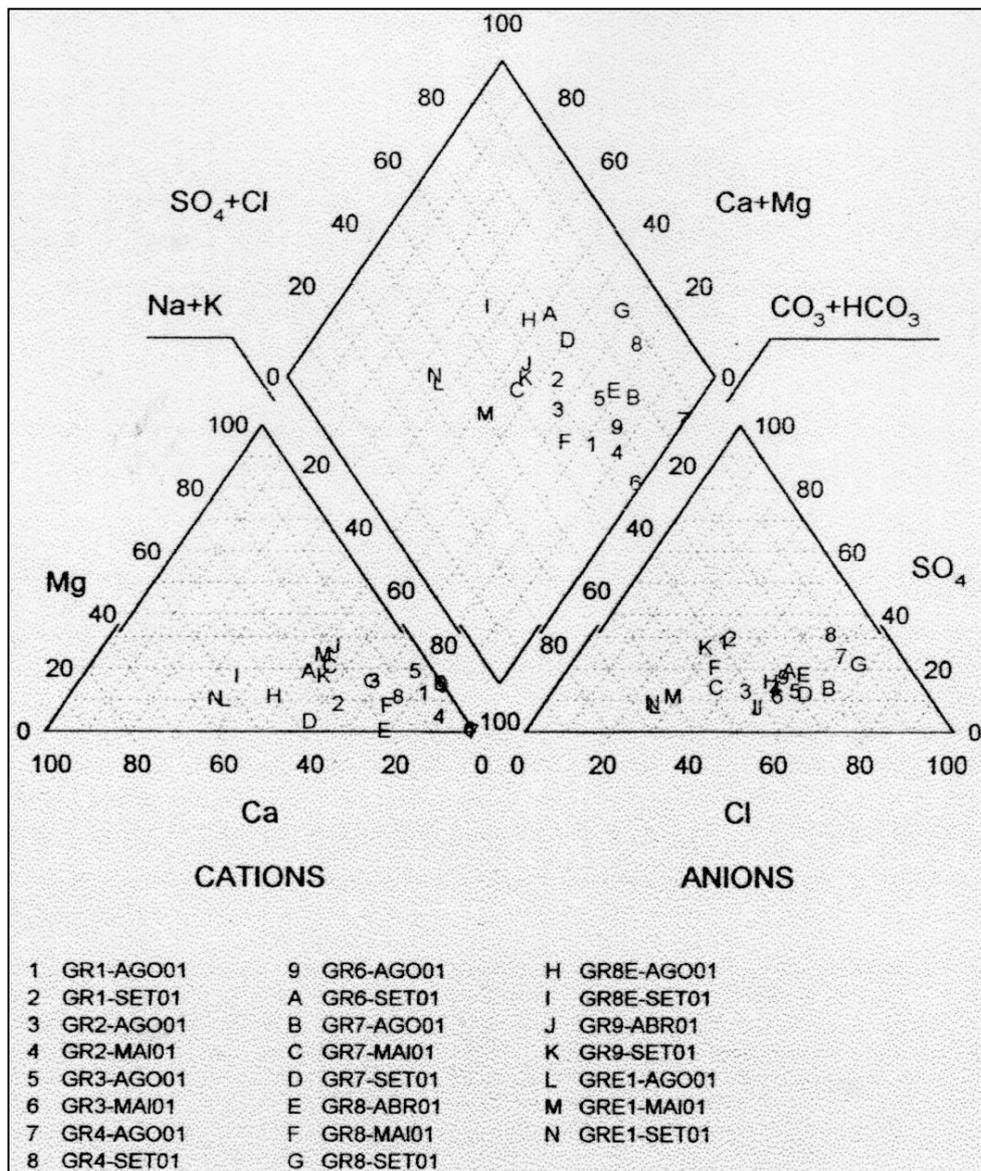


Figura 3 – Diagrama de Piper.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem apresentou a contribuição do aquífero livre para a drenagem superficial equivalente a uma descarga de $2,66 \text{ m}^3/\text{s}$ o que corresponde a 7,7% do valor estimado da vazão das águas superficiais.

Ressalta-se que a obtenção de um quadro mais completo sobre contribuição das águas subterrâneas aos mananciais superficiais demanda a realização de estudos adicionais. Recomenda-se que tais estudos possam contemplar uma investigação mais detalhada sobre o comportamento das águas subterrâneas no terço inicial da bacia hidrográfica compreendendo a região do Banhado Grande. A modelagem do fluxo abrangendo essa porção da bacia poderia enfocar, também, à parte confinada dos aquíferos, estabelecendo a contribuição desta parcela do fluxo subterrâneo as águas superficiais.

Conforme análise dos aspectos qualitativos da água dos aquíferos dessa região, pode-se dizer que essas águas podem ser consideradas aptas ao consumo, principalmente, agrícola e pastoril. Em relação ao consumo humano, há ressalvas decorrentes da alta turbidez (acima de 1 NTU) e da forte presença de ferro (acima de 0,3 mg/L). Esses problemas poderão ser corrigidos, em parte, quando a exploração da água subterrânea for adequadamente realizada através de poços especialmente construídos para esta finalidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de externar o seu agradecimento ao coordenador do projeto “Identificação das Alternativas Possíveis e Prováveis para Regularização das Vazões do Rio Gravataí”, Lawson Beltrame pela autorização da utilização de dados do citado trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAR UND HYDROTECHNIK GMBH. 1971. *Planejamento Hidrológico e Estudo de Desenvolvimento Regional da Bacia do Rio Cai*. Vol. I-V. Essen.
- CAICEDO, N.O.L. 1998. *Hidrogeologia do Litoral Norte do Rio Grande do Sul*. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais. ABAS/SP.
- CORSAN. 1990b. Projeto de Barragem da “Olaria Velha” no Rio Gravataí. Estudos Geológicos e Geotécnicos. Magna Engenharia Ltda.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hal, Inc. New Jersey, 604p.
- GUIGUER, N., FRANZ, T. 1998. *Flowpath II version 1.0 for Windows 95/NT, User Guide*. Waterloo Hydrogeologic, inc. Waterloo, Ontario, Canada.
- HAUSMAN, A. 1980. *Avaliação Qualitativa de Aquíferos Fissurados*. Anais do I Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recife-PE. P.537-544.
- HAUSMAN, A. 1995. *Províncias Hidrogeológicas do Estado do rio Grande do Sul - RS*. Acta Geológica Leopoldensia - Série Mapas: Mapa nº 2.
- IBGE. 1986. *Levantamento de Recursos Naturais*. v 33.
- IPH:CPRM. 2002. *Identificação das Alternativas Possíveis e Prováveis para Regularização das Vazões do Rio Gravataí*.
- McWHORTER, D.B., SUNADA, D.K. 1977. *Groudwater Hidrology and Hydraulics*. Wiley e Sons, New York.
- NIELSEN, S.D.; CAIMI, G. 1994. *Isodeclividade da Bacia do Rio Gravataí Gravataí - RS*. Projeto PROTEGER. Porto Alegre: METROPLAN e CPRM.

- RISSO, A.; GIUGNO, N.B. 1994. *Áreas de Inundação, Banhados e Alagamentos da Região Metropolitana de Porto Alegre*. Projeto PROTEGER. Porto Alegre: METROPLAN e CPRM.
- SOP-AGRAR. 1971. *Estudos Básicos e Pesquisas Especiais na Região do Rio Gravataí*. Secretaria de Obras Públicas do Estado do Rio Grande do Sul (SOP) e Agrar-und hydrotechnik GMBH.
- SPH-RS. 1999. *Nível de redução (“Zero da Harmonia”) e correlações entre diversos “data”*. Informação No. 26/99 Diretoria de Hidrovias, Superintendência de Portos e Hidrovias, Governo do Estado do Rio Grande do Sul.
- TRAININI, D.R. et alii. 1994b. *Geomorfologia da bacia da Bacia do Rio Gravataí - RS*. Projeto PROTEGER. Porto Alegre: METROPLAN e CPRM.