



ESTIMATIVA DE RECARGA SUBTERRÂNEA A PARTIR DA
SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO DE BASE NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO IBICUÍ (AMÉRICA DO SUL)

*ESTIMATING RECHARGE RATES WITH BASEFLOW SEPARATION IN THE
IBICUÍ WATERSHED (SOUTH AMERICA)*

Camila Dalla Porta Mattiuzi¹; Roberto Kirchheim²; Walter Collischonn³;
Fernando Mainardi Fan⁴

Artigo recebido em: 24/07/2015 e aceito para publicação em: 18/01/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i3.28487>

Resumo: Este estudo se propõe a estimar as taxas de recarga subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, localizada no Estado do Rio Grande do Sul, a partir da utilização do método de separação do escoamento de base. O principal aquífero da Bacia é o Sistema Aquífero Guarani (SAG), nas suas áreas de confinamento (Oeste) e afloramento (Central). A separação do escoamento de base foi realizada por meio do filtro numérico de Eckhardt (2005) com dados de séries históricas de vazão disponibilizados pela Agência Nacional das Águas. As estimativas de recarga foram comparadas com as características geológicas, hidrogeológicas e pedológicas encontradas na área de estudo. As taxas de recarga variaram de 88 mm/ano a 378,7 mm/ano (13% a 47%, respectivamente da precipitação efetiva nas sub-bacias, e 6% a 21% da precipitação total). Os resultados mostraram que as maiores taxas de recarga ocorreram nas unidades geológicas com transmissividades mais elevadas e solos mais permeáveis, e também com precipitações médias mais elevadas. Por outro lado, as sub-bacias com baixas taxas de recarga apresentaram unidades geológicas permeáveis e unidades cristalinas impermeáveis, solos com altos teores de argila e precipitações médias reduzidas.

Palavras-chave: Escoamento de base. Filtro de Eckhardt. Recarga aquífera.

Abstract: This study aims to estimate the groundwater recharge rates in the Ibicuí Watershed, in the state of Rio Grande do Sul, using baseflow separation method. The watershed's main aquifer is the Guarani Aquifer System, in its confined areas (West) and outcrop (Central). The baseflow separation was made with the Eckhardt (2005) numerical filter, with historical streamflow data released by the National Water Agency. The recharge estimates were compared with the geological, hydrogeological and soil found in the study area. Recharge rates ranged from 88 mm/year to 378.7 mm/year (13% and 47% respectively of the effective precipitation in the sub-watersheds, and 6% to 21% of total precipitation). The results showed that the higher recharge rates were found in the geological units with higher transmissivity and more permeable soils, and with higher average precipitation. On the other hand, sub-watersheds with low recharge rates showed permeable geologic units and crystal units, soils with high clay content and low average precipitation.

Keywords: Base flow. Eckhardt's filter. Aquifer recharge.

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um componente importante em diversos sistemas hídricos, contribuindo para o abastecimento da população, usos agrícolas e industriais, além da manutenção de corpos d'água e serviços ambientais. Para um planejamento e gestão adequados, condição fundamental para o uso sustentável dos recursos hídri-

cos, é necessário o conhecimento detalhado das disponibilidades e demandas hídricas.

A quantificação das disponibilidades hídricas subterrâneas é fundamental para promover uma operação coordenada e integrada dos recursos hídricos. Para realizar essa quantificação existem diversos méto-

¹⁻² Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais – CPRM (camila.mattiuzi@cprm.gov.br, roberto.kirchheim@cprm.gov.br)

³⁻⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (collischonn@uol.com.br, fernando.fan@ufrgs.br)

dos, como o balanço hídrico, variação do nível d'água, traçadores químicos e separação de escoamento de base (HEALY, 2010; COELHO *et al.*, 2015).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estimar as taxas de recarga subterrânea utilizando o método de separação de escoamento de base. A partir deste método são identificadas as parcelas direta e indireta do escoamento; a parcela indireta possui origem subterrânea, podendo corresponder à capacidade de recarga dos aquíferos existentes na área de contribuição (COLLISCHONN e FAN, 2013; HEALY, 2010).

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (BHib), localizada no Rio Grande do Sul. A BHib está inserida na Região Hidrográfica do Rio Uruguai e situa-se no sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul. A Bacia possui uma área de drenagem de 47.320 km², e contém 29 municípios, totalizando uma população de 921.000 habitantes. (MMA, 2006; PROFILL, 2011).

Com relação ao uso e cobertura do solo da bacia, destaca-se o predomínio do uso para a agropecuária (46%), seguidos de vegetação nativa – campos (38%), orizicultura (6,7%) e mata ciliar (6,5%). Os principais usos consuntivos de água na bacia são: abastecimento público, criação animal, irrigação e abastecimento industrial (PROFILL, 2011). A região possui uma vasta disponibilidade e potencialidade hídrica subterrânea: considerando as reservas reguladoras, tem-se disponível 4.256 hm³/ano, quase três vezes o consumo total anual da Bacia (da ordem de 1.500 hm³) (PROFILL, 2011).

O clima na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí é classificado como Cfa e Cfb, segundo a classificação climática de Köppen. Em ambos os casos comporta-se como uma região de Clima Temperado, onde a temperatura do mês mais frio oscila entre -3°C a 18°C, apresentando chuvas em to-

das as estações. Nas áreas de relevo mais baixo, próximas ao Rio Uruguai, onde a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, o clima é classificado como subtropical – Cfa; nas áreas onde a temperatura do mês mais quente é inferior a 22°C, ou seja, nas partes altas da bacia, o clima é classificado como temperado – Cfb. A precipitação média na bacia é de 1540 mm/ano (MMA, 2006).

Os solos presentes na BHib possuem composições que variam entre argilosas e arenosas, sendo rasos a profundos, bem a mal drenados. A cobertura de solo é essencialmente composta por Planossolo háplico Eutrófico (34%), Argissolo vermelho Distrófico (23%) e Neossolo litólico Eutrófico (22%), também existindo Latossolo vermelho Distrófico (9%), Argissolo vermelho-amarelo Distrófico (6%), Chernossolo ebânico Órtico (5%), Plintossolo háplico Distrófico (0,4%) e Nitossolo vermelho Eutrófico (0,3%) (IBGE, 2013).

Da base para o topo da coluna estratigráfica, a BHib é composta pelo pacote sedimentar gonduânico correspondente à Formação Pirambóia, do Grupo Passa Dois; às Formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita, do Grupo Rosário do Sul; à Formação Guará, e à Formação Botucatu. Essas sequências sedimentares são confinadas, em parte, pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, além de sedimentos da Formação Tupaciretã e depósitos aluvionares quaternários distribuídos ao longo de drenagens (CPRM, 2010).

A BHib apresenta um total de 1.189 poços tubulares de captação de água subterrânea, sendo estes, em grande parte, muito produtivos e de altas capacidades específicas, variando em torno de 3m³/h/m. Em toda sua extensão o Sistema Aquífero Guarani (SAG) ocorre de forma confinada e/ou aflorante, formando zonas de recarga e descarga regional. Os principais usos de água subterrânea na BHib estão relacionados ao abastecimento doméstico urbano e rural (Figura 1).

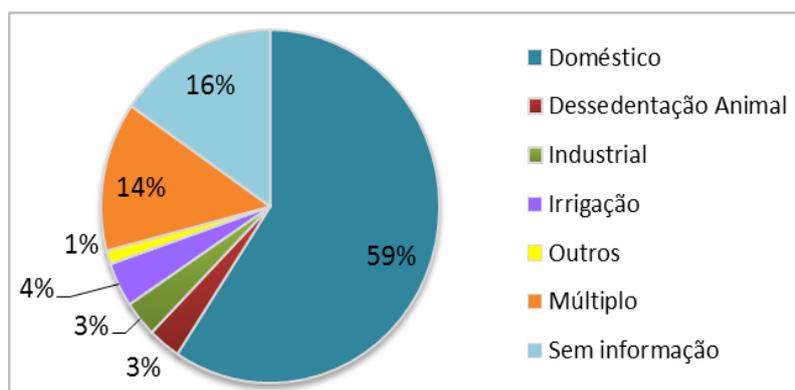


Figura 1 - Demandas de água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí
Figure 1 - Groundwater demands on the Ibicuí River watershed

Destaca-se o expressivo uso da água para irrigação (4% do total das demandas) proporção maior do que o observado para o restante do Estado do RS. As sub-bacias de montante da BHib evidenciam um perfil de uso mais associado a pequenas propriedades rurais (KIRCHHEIM *et al.*, 2013).

3 METODOLOGIA

Existem diversos métodos para estimar recarga aquífera, como a variação da superfície livre d'água, traçadores hidroquímicos e isótopos, balanço hídrico, separação de escoamento de base (HEALY, 2010). A separação do escoamento de base é um método que utiliza dados de séries históricas de vazão para determinar as parcelas direta e indireta do escoamento, a partir da análise da aplicação de filtros numéricos. Um exemplo é o filtro de Eckhardt (2005), o qual foi utilizado neste trabalho.

A aplicação do filtro de separação de escoamento de base e a posterior análise dos resultados seguem os seguintes passos: seleção de estações pluviométricas e fluviométricas representativas, aplicação do filtro, cálculo da recarga aquífera, e comparação com dados de poços piezométricos.

3.1 Postos fluviométricos e respectivas bacias

Neste trabalho foram selecionados 15 postos fluviométricos da Rede Hidrológica Nacional através da plataforma SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, da Agência Nacional das Águas (ANA, 2013). A partir da obtenção das séries de vazão foi realizada uma análise do histórico de medição destes dados, sendo importante ressaltar que os mesmos estão consistidos até o ano de 2009. Na Tabela 1 estão listados os postos utilizados e a escala temporal das séries históricas de dados, que variou de 9 a 73 anos de dados, compreendendo os anos de 1940 a 2013.

Um dos critérios para seleção dos postos fluviométricos foi a discretização da BHib em sub-bacias, com o intuito de que estas sub-bacias abrangessem poucas unidades geológicas. Dessa forma, pode-se relacionar melhor a influência da geologia nos resultados de estimativa de recarga.

Foi obtido um MDE (Modelo Digital de Elevação) no Laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (WEBER *et al.*, 2004). As bacias hidrográficas foram delimitadas utilizando a ferramenta ArcHydro do software ArcMap (HGE, 2013). Foram utilizados como exutórios das bacias os postos fluviométricos selecionados para este estudo.

Tabela 1 - Estações fluviométricas selecionadas
Table 1 - Selected gauging stations

Código ANA	Nome	Latitude	Longitude	Série histórica	Rio	Precipitação (mm/ano)	Área de drenagem (km ²)
76750000	Alegrete	-29,7686	-55,7872	1940-2013	Rio Ibirapuitã	1.545	5.940
76370000	Azevedo Sodré	-30,1056	-54,6375	2004-2013	Rio Cacequi	1.607	1.220
76085000	Cachoeira dos Cinco Veados	-29,4289	-54,0542	1976-2013	Rio Toropi	1.794	1.540
76460000	Ernesto Alves	-29,3625	-54,7353	1958-2013	Rio Jaquarizinho	1.893	926
76500000	Jacaqua	-29,6853	-55,1981	1942-2013	Rio Ibicui	1.634	27.800
76440000	Jaguari	-29,4989	-54,6892	1941-2013	Rio Jaguarí	1.840	2.320
76560000	Manoel Viana	-29,5942	-55,4814	1967-2013	Rio Ibicui	1.638	29.400
76650000	Passo da Cachoeira	-29,3094	-55,7058	1962-2013	Rio Itu	1.776	2.560
76260000	Passo do Gutierrez	-30,8444	-54,5442	1976-1989	Arroio Taquarembó	1.566	576
76742000	Passo do Osório	-29,9503	-55,6025	1977-2013	Arroio Cavera	1.527	1.160
76700000	Passo dos Britos	-29,9731	-55,7478	1971-2000	Rio Ibirapuitã	1.632	3.200
76800000	Passo Mariano Pinto	-29,3092	-56,0547	1944-2013	Rio Ibicui	1.495	42.500
76300000	Ponte Ibicui da Armada	-30,2808	-54,9031	1967-2013	Rio Ibicui Da Armada	1.502	6.010
76310000	Rosário do Sul	-30,2428	-54,9169	1967-2013	Rio Santa Maria	1.801	12.100
76100000	Vila Clara	-29,5561	-54,3422	1941-2013	Rio Toropi	1.569	2.790

3.2 Aplicação do Filtro de Eckhardt

O método utilizado para realizar a separação de escoamento de base foi o Filtro Digital Recursivo de Eckhardt (2005). Este método foi escolhido pois consiste em uma metodologia generalista de filtro de escoamento de base, ou seja, outros filtros usados são casos especiais desta forma geral (ECKHADRT, 2005; COLLISCHONN e FAN, 2013), e também pois um dos propósitos deste trabalho é testar o filtro de Eckhardt com as considerações propostas por Collishonn e Fan (2013). Outros motivos que levaram à escolha deste método foram a sua simplicidade de aplicação, e a disponibilidade

dos dados necessários para o uso do método.

O Filtro de Eckhardt é um algoritmo utilizado para calcular o fluxo de base em cursos d'água e que realiza a separação da vazão do rio em duas componentes: escoamento superficial (direto) e escoamento de base (indireto), conforme a Equação 1.

$$y_i = f_i + b_i \quad \text{Equação 1}$$

Onde y é vazão do rio; f é o escoamento superficial; b é o escoamento de base, e i é o intervalo de tempo.

Eckhardt (2005) demonstrou que diversos filtros poderiam ser equacionados

de forma genérica (Equação 2) com uma restrição de que a vazão de base em qualquer tempo deve ser menor ou igual a vazão total do rio no mesmo tempo, ou seja, $b_i \leq y_i$.

$$b_i = A \times b_{i-1} + B \times y_i \quad \text{Equação 2}$$

Onde b é o escoamento de base; y é a vazão do rio; A e B são os parâmetros de cálculo, e i é o intervalo de tempo.

Para o cálculo da constante de recessão “ a ” deve-se inicialmente analisar o hidrograma do posto fluviométrico em busca de períodos característicos de recessão. O intervalo de tempo e seus respectivos valores de vazão são utilizados no cálculo da constante do período característico “ k ”, conforme Equação 3; este cálculo pressupõe que os períodos de recessão de um curso d’água podem ser descritos matematicamente como uma relação linear entre o armazenamento de água no aquífero e o escoamento de base (Maillet, 1905). Em seguida o valor de “ k ” é utilizado para o cálculo da constante “ a ” (Equação 4). Neste trabalho foi determinado um período de recessão para cada posto fluviométrico, baseado na premissa de que as recessões são periódicas.

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_{(t)}}\right)} \quad \text{Equação 3}$$

$$a = e^{-\frac{\Delta t}{k}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde k é a constante do período característico; Q é a vazão, e a é a constante de recessão.

A constante de recessão “ a ” está relacionada com a descarga em um intervalo de tempo definido em períodos de recessão; nestes períodos não há entrada por precipitação e, portanto, o escoamento superficial (direto) é nulo, havendo uma descarga natural do aquífero. Dessa maneira a recarga aquífera pode ser estimada por meio destas análises de recessões (DOMENICO e SCHWARTZ, 1990).

O parâmetro BFI (*Base Flow Index* – Índice de Escoamento de Base) é a razão, a longo prazo, entre o fluxo de base e a vazão total, conforme a Equação 5. Já o BFI_{max} é um fator que restringe o BFI e é utilizado para o cálculo do algoritmo. É importante ressaltar que este parâmetro pode ser influenciado pela geologia local (COLLISCHONN e FAN, 2013).

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde BFI é o Índice de Escoamento de Base; b é o escoamento de base, e y é a vazão do rio.

Eckhardt (2005) definiu que os parâmetros A e B apresentados na Equação 2 podem ser expressos em função da constante de recessão “ a ” e do parâmetro BFI_{max} (*Base Flow Index Maximum* – Índice Máximo de Escoamento de Base), de acordo com as Equações 6 e 7:

$$B = \frac{(1-a) \times BFI_{max}}{1-a \times BFI_{max}} \quad \text{Equação 6}$$

$$A = \left(\frac{1-BFI_{max}}{1-a \times BFI_{max}} \right) \times a \quad \text{Equação 7}$$

A equação de Eckhardt para o filtro digital tem a seguinte forma (Equação 8), para $b_i \leq y_i$.

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) \times a \times b_{i-1} + (1-a) \times BFI_{max} \times y_i}{1-a \times BFI_{max}} \quad \text{Equação 8}$$

Eckhardt (2005) propõe valores predefinidos para o parâmetro BFI_{max}, com base na natureza do curso d’água (perene ou efêmero) e da característica hidrogeológica do aquífero (poroso ou confinado). Estes valores foram determinados a partir da comparação de resultados de separação de escoamento de base por diversos métodos em diversos locais.

Collischonn e Fan (2013) propuseram outra forma para estimar o parâmetro BFI_{max}, baseada na relação das vazões fluviométricas com permanência de 90%

(Q90) e 50% (Q50). Esta razão foi utilizada para calcular o BFImax em 15 estações localizadas na região central e sul do Brasil, sendo obtidos resultados adequados. A partir disso foi realizada uma correlação e então obtida uma Equação (9) que relaciona o BFImax com a razão Q90/Q50; para $BFImax < 1$.

$$BFImax = 0,8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0,2146$$

Equação 9

Esta equação está ajustada para as regiões sul e central do Brasil; como a nossa área de estudo está localizada na região sul, este método foi utilizado na estimativa do parâmetro BFImax no presente estudo.

Foram inicialmente calculadas as vazões (Q90, Q50, Qmín, Qmáx, Qmed) através das séries históricas diárias para cada estação fluviométrica selecionada. A seguir selecionou-se um período de recessão no hidrograma, para o cálculo da Constante de Período “k” e a Constante de Recessão “a”. A partir das vazões Q90 e Q50 obteve-se o valor de BFImax conforme Equação 9. Foi calculada a vazão de base por meio do Filtro de Eckhardt (Equação 8), os valores médios da vazão de base obtidos para cada estação fluviométrica foram posteriormente utilizados no cálculo da taxa de recarga aquífera.

Para a obtenção do valor médio de precipitação das bacias delimitadas foi utilizado o software ArcMap com os dados do Mapa de Isoietas de Precipitações Médias Anuais do Brasil do Atlas Pluviométrico do Brasil, que apresenta os resultados de precipitação média para o período de 1977 a 2006 (CPRM, 2013).

Foi realizado o cálculo do Coeficiente de Escoamento (CE) de cada sub-bacia para possibilitar uma comparação com os resultados obtidos de taxa de recarga aquífera (Equação 10):

$$CE = \frac{Q_{med}}{P_{med}}$$

Equação 10

Onde CE é o coeficiente de escoamento; Q med é a vazão média (mm/ano), e P med é a precipitação média (mm/ano).

Os valores de evapotranspiração (Et) para cada sub-bacia da Bacia do Rio Ibicuí foram obtidos conforme a Equação 11, derivada do balanço hídrico (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013):

$$Et = \frac{1-CE}{P_{med}}$$

Equação 11

Onde CE é o coeficiente de escoamento, e P med é a precipitação média (mm/ano).

3.3 Taxa de Recarga Aquífera

Para o cálculo da Taxa de Recarga Aquífera (mm/ano) são necessários os valores da vazão de base média para cada estação fluviométrica e a área de drenagem em cada sub-bacia, de acordo com a Equação 12.

$$TR = \frac{\bar{b}}{A} \times 1000 \times 31622400$$

Equação 12

Onde TR é a taxa de recarga aquífera (mm/ano); b é a média dos valores de vazão de base (m³/s), e A é a área da bacia (m²).

O cálculo da taxa de recarga é baseado na hipótese de que a recarga é igual ao escoamento de base do rio. Entretanto, é importante ressaltar que essa é uma aproximação, sendo que a componente da recarga não é exatamente igual ao escoamento de base, existindo outras variáveis que aqui foram negligenciadas, como entradas e saídas de água subterrânea da bacia, evaporação de água subterrânea (RUTLEDGE, 2005).

3.4 Comparação com dados de poços piezométricos

Os resultados de vazão de base obtidos foram comparados com dados de nível d'água de dois poços piezométricos localizados nas sub-bacias do Passo da

Cachoeira (4300020119) e de Azevedo Sodré (4300020125). Estes poços de monitoramento foram instalados pela CPRM através do Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), que tem como objetivo a medição horária, permanente e contínua do nível d'água em aquíferos livres (CPRM, 2013).

Também foi realizada uma comparação com a vazão do rio, utilizando os dados dos postos fluviométricos da ANA Azevedo Sodré (76370000) e Passo da Cachoeira (76650000), e com a precipitação, utilizando os postos pluviométricos

da ANA Bom Retiro (02954033) e Cachoeira Santa Cecília (02955002). O período de avaliação foi de 2010 a 2012, determinado em função da disponibilidade de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Filtro de Eckhardt para a separação de escoamento de base foi aplicado em 15 sub-bacias da BHib (Figura 2). Os resultados e as variáveis utilizadas na aplicação do filtro são apresentados na Tabela 2.

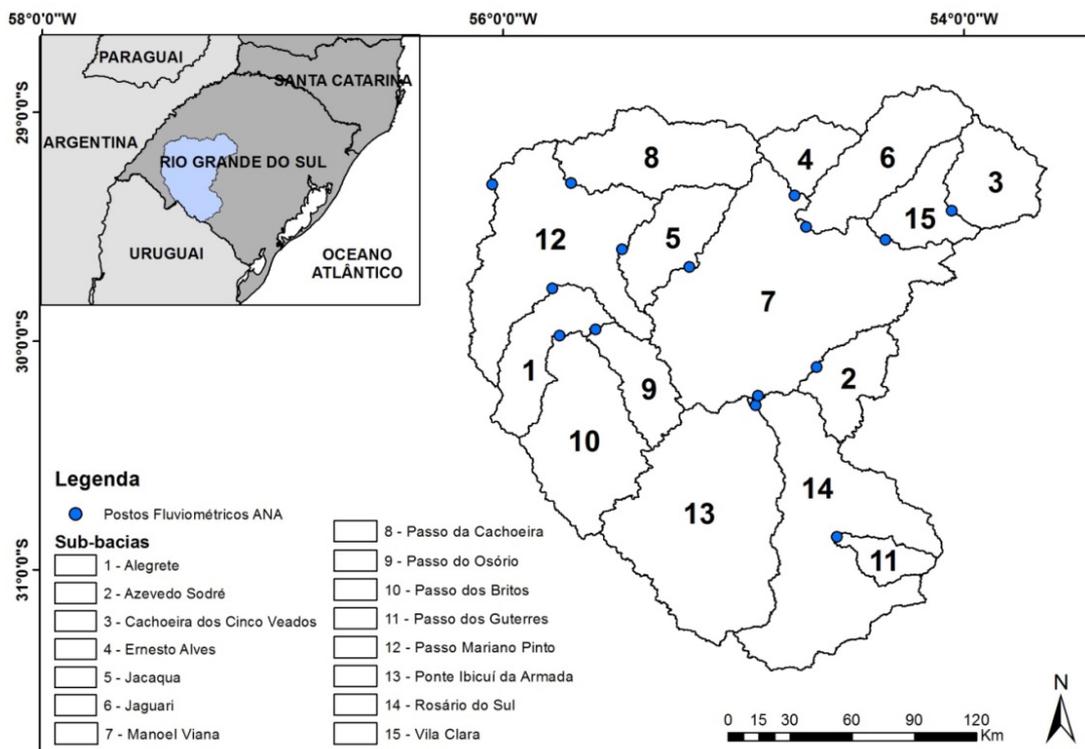


Figura 2 - Localização das Sub-bacias
Figure 2 - Location of the Sub-watershed

Tabela 2 - Estimativa do escoamento de base nas sub-bacias

Table 2 - Baseflow estimative on the sub-watersheds

Sub-bacia	Precipitação (mm/ano)	Área (km ²)	k	a	Vazão média (m ³ /s)	Vazão de base média (m ³ /s)
Alegrete	1.545	5.943	18,67176	0,94785	121	32,8
Azevedo Sodré	1.607	1.220	82,78401	0,98799	19,2	3,24
Cachoeira dos Cinco Veados	1.794	1.542	46,92872	0,97892	42,9	8,55
Ernesto Alves	1.893	922	13,80639	0,93013	28,1	9,18
Jacaqua	1.634	27.373	32,99476	0,97015	582	139,7
Jaguari	1.840	2.326	47,72492	0,97926	60,4	15,1
Manoel Viana	1.638	28.922	61,484	0,98387	660	202
Passo da Cachoeira	1.776	2.564	149,8994	0,99335	65,7	30,7
Passo do Osório	1.566	1.165	15,64227	0,93807	32,2	7,66
Passo dos Britos	1.527	3.197	73,63898	0,98651	69,1	8,93
Passo Mariano Pinto	1.632	42.108	47,1068	0,979	923,8	270
Ponte Ibicuí da Armada	1.495	6.004	22,41221	0,95636	103,1	30,9
Rosário do Sul	1.502	12.092	27,35014	0,9641	228,9	61,5
Vila Clara	1.801	2.798	24,05139	0,95927	61,9	17,4
Passo dos Guterres	1.569	574	21,38076	0,95431	16,1	3,08

Foram calculadas, para cada sub-bacia, as taxas de recarga (mm/ano), a evapotranspiração (mm/ano), o coeficiente de escoamento, e as porcentagens de recarga a partir da chuva total (TR/P) e da precipitação efetivamente disponível para recarga (TR/Pefe, sendo que a precipitação efetiva é precipitação total subtraída a evapotranspiração); os resultados estão na Tabela 3.

Os valores de porcentagem de recarga com relação à precipitação efetiva variaram entre 13% (88,4 mm/ano) e 47% (378,7 mm/ano): algumas sub-bacias apresentaram recargas baixas, como é o caso de Passo dos Britos (88,4 mm/ano - 13%) e Azevedo Sodré (84 mm/ano - 17%); outras sub-bacias apresentaram elevadas recargas, como Manoel Viana (221,9 mm/ano - 31%), Ernesto Alves (314,9 mm/ano - 33%) e Passo da Cachoeira (378,7 mm/ano - 47%); as outras bacias se mantiveram com valores de recarga intermediários, entre 19% e 29%.

4.1 Análise a partir do Agrupamento Geológico

As sub-bacias com arcabouço geológico semelhante foram subdivididas em três categorias (Figura 3):

- Sub-bacias de arcabouço geológico pouco permeável (são majoritariamente compostas por derrames vulcânicos, embasamento cristalino, pelitos Triássicos e Permeanos), nas quais a porcentagem de unidades pouco permeáveis varia de 67% a 96%: Cachoeira dos Cinco Veados, Passo dos Guterres, Ernesto Alves, Jaguari, Vila Clara, Passo dos Britos, Alegrete.
- Sub-bacias de arcabouço geológico com permeabilidade intermediária, ou seja, que apresentam porcentagem de unidades com permeabilidade intermediária, variando de 48% a 54%: Cachoeira dos Cinco Veados, Passo dos Guterres, Ernesto Alves, Jaguari, Vila Clara, Passo dos Britos, Alegrete.

Tabela 3 - Estimativa das componentes hidrológicas: taxa de recarga, evapotranspiração e coeficiente de escoamento superficial para as sub-bacias**Table 3** - Estimative of the hydrological compounds: recharge rate, evapotranspiration and runoff coefficient for the sub-watersheds

Sub-bacia	Precipitação (mm/ano)	Evapotranspiração (mm/ano)	Precipitação efetiva (P-Et) (mm/ano)	Coeficiente de escoamento	Tempo de Retorno (mm/ano)	Recarga %P	Recarga %Pefe	Área (km ²)
Alegrete	1.545	902,1	642,8	0,42	174,6	11%	27%	5.943
Azevedo Sodré	1.607	1.111,8	495,6	0,31	84	5%	17%	1.220
Cachoeira dos Cinco Veados	1.794	916,9	877,9	0,49	175,3	10%	20%	1.542
Ernesto Alves	1.893	930,3	962,6	0,51	314,9	17%	33%	922
Jacaqua	1.634	962,7	671,2	0,41	161,3	10%	24%	27.373
Jaguari	1.840	1.021	818,9	0,45	204,8	11%	25%	2.326
Manoel Viana	1.638	917,9	720	0,44	221,9	14%	31%	28.922
Passo da Cachoeira	1.776	968,1	807,8	0,45	378,7	21%	47%	2.564
Passo do Osório	1.566	694,6	871,2	0,56	208,1	13%	24%	1.165
Passo dos Britos	1.527	845,6	681,31	0,45	88,4	6%	13%	3.197
Passo Mariano Pinto	1.632	940,1	691,8	0,42	202,8	12%	29%	42.108
Ponte Ibicui da Armada	1.495	953,6	541,3	0,36	162,5	11%	30%	6.004
Rosário do Sul	1.502	905	596,9	0,40	160,9	11%	27%	12.092
Vila Clara	1.801	1.102,2	698,7	0,39	196,7	11%	28%	2.798
Passo dos Guterres	1.569	681,1	887,8	0,57	169,7	11%	19%	574

Recarga %P: Recarga a partir da precipitação

Recarga %Pefe: Recarga a partir da precipitação efetiva

- Sub-bacias de arcabouço geológico bastante permeável (são majoritariamente compostas por arenitos, coberturas Cretássicas e aluviões Quaternários), nas quais a porcentagem de unidades permeáveis varia de 21% a 35%: Azevedo Sodré, Ponte Ibicuí da Armada, Passo da Cachoeira, Passo do Osório.

As sub-bacias com arcabouço geológico pouco permeável apresentaram valores intermediários de recarga, variando entre 88,4 mm/ano e 314,9

mm/ano (13% e 33% da precipitação efetiva, respectivamente), com valores de precipitação efetiva variando entre 643 e 963 mm/ano. Ainda assim, as sub-bacias com a menor e a segunda maior recargas, Passo dos Britos (13%) e Ernesto Alves (33%), respectivamente, estão contidas nesta subdivisão geológica. Pode-se também perceber uma relação entre estes valores de recarga com as precipitações efetivas entre essas duas bacias, 681mm/ano e 963mm/ano, respectivamente. Contra-

riando o que era esperado, a porcentagem de unidades pouco permeáveis é superior na sub-bacia do Ernesto Alves (95%) do que na sub-bacia do Passo dos Britos (80%). Isso sugere que o ar-

cabouço geológico pode não ser a única variável que influencia na relação do escoamento de base, ou seja, na interface rio/aquífero.

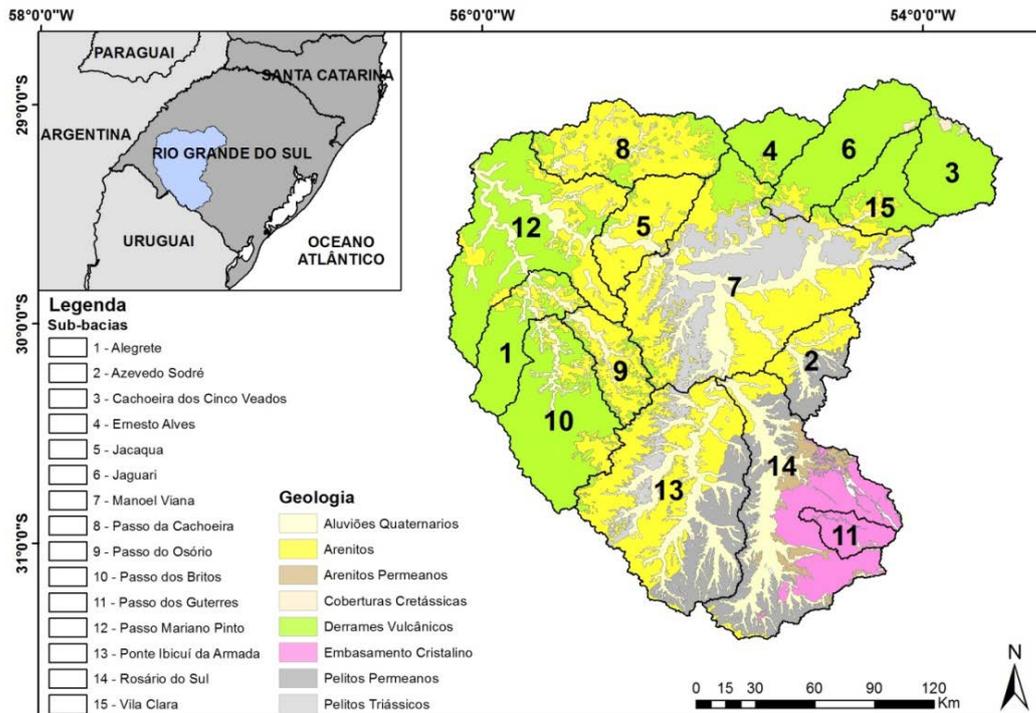


Figura 3 - Sub-bacias e agrupamento das Unidades Geológicas
Figure 3 - Sub-watersheds and groups of Geologic Units

As sub-bacias com arcabouço geológico de permeabilidade intermediária são as mais expressivas em área, e apresentam uma composição geológica homogênea; apresentam recargas entre 161,3 mm/ano e 221,9 mm/ano (24% e 31% da precipitação efetiva), o que está correlacionado com os próprios valores de precipitação efetiva, que variaram de 597 a 720 mm/ano.

As sub-bacias com arcabouço geológico permeável apresentaram recargas entre 84 mm/ano e 378,7 mm/ano (17% e 47% da precipitação efetiva); novamente percebe-se uma correlação com a precipitação efetiva, que variou entre 496 e 871 mm/ano. A sub-bacia do Azevedo Sodré foi a que apresentou os menores valores de recarga e de precipitação efetiva, 17% e 496 mm/ano, respectivamente. Nesta divisão também está a sub-bacia de Passo da Cachoeira, que apresentou a maior re-

carga efetiva de toda a Bacia do Rio Ibicuí, com 47%, sendo a precipitação efetiva 808 mm/ano. A parcela de rochas permeáveis presente na sub-bacia do Passo da Cachoeira é de 78%, sendo 71% arenitos, que possuem uma alta capacidade de armazenamento e transmissividade, e 7% aluviões, que, embora sejam permeáveis e porosos, possuem uma capacidade de regularização inferior a do arenito.

A existência de uma correlação entre a recarga aquífera e a distribuição espacial das unidades geológicas no âmbito de bacias hidrográficas é possível, hipótese esta que, entretanto, não se confirma a partir deste trabalho. Para isso seria necessário um detalhamento geológico maior, e a comparação de bacias localizadas sobre uma mesma unidade geológica, com semelhantes características de precipitações. Além disso, pode-se realizar outros agrupamentos geológicos para este mesmo

fim. Ressalta-se que a região estudada, no caso a Bacia do Rio Ibicuí, vem sendo alvo de recentes mapeamentos e, espera-se que a distribuição espacial das unidades geológicas venha a ser alterada.

4.2 Análise a partir da Tipologia de Solos

Dentre as tipologias de solo

encontradas na BHib, grande parte possui características de baixas permeabilidade com presença de argila. Solos argilosos podem apresentar uma elevada porosidade, o que mantém a água no solo, mas não tem a capacidade de transmissão dessa água, possuindo assim baixas capacidades de regularização de vazão. Na Figura 4 está apresentado o mapa de solos da BHib.

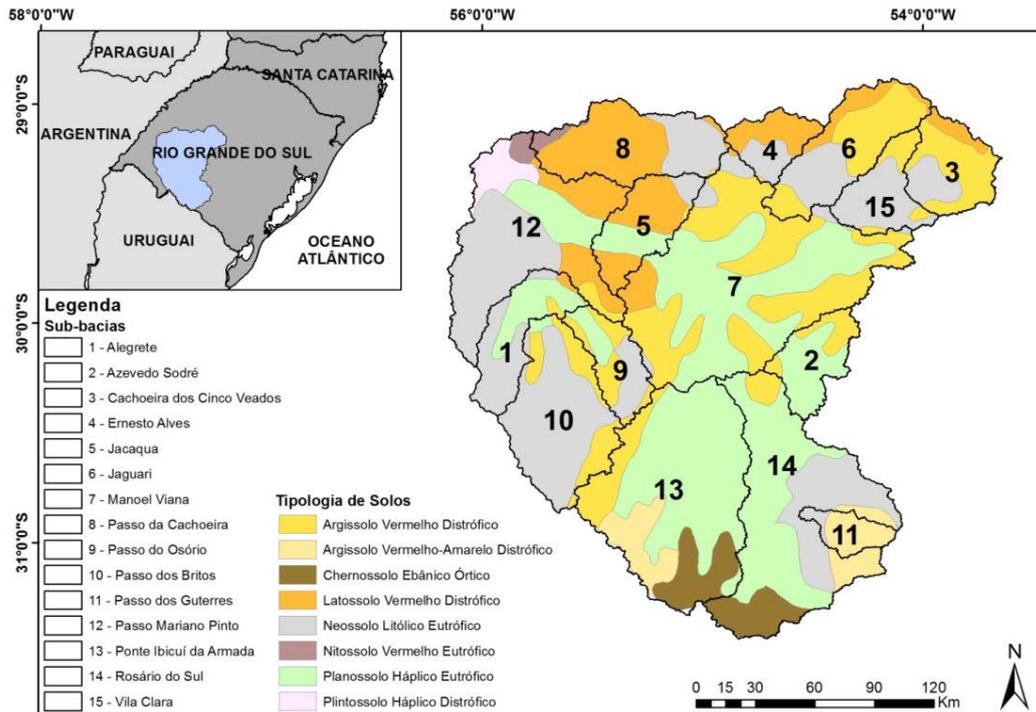


Figura 4 - Sub-bacias e tipologia de solos
Figure 4 - Sub-watersheds and type of soils

A maior parte das sub-bacias possui como solo principal os argissolos, neossolos e planossolos, que são de composição majoritariamente argilosa. Entretanto, as duas sub-bacias cuja principal tipologia de solo é o latossolo (com composição arenosa, e possuindo boas permeabilidades e transmissividades) são Ernesto Alves e Passo da Cachoeira, 62% e 66%, respectivamente; estas são as duas sub-bacias com os maiores valores de recargas obtidos no presente estudo, 33% e 47%, respectivamente. Dessa forma, a tipologia do solo pode ser um fator explicativo para as altas recargas obtidas em ambas as sub-bacias.

Para um estudo mais aprofundado seriam necessárias outras informações, como a espessura dos solos nessa região. Também deve ser levada em consideração a questão de escala uma vez que estes dados foram obtidos a partir de um mapa de solo regional.

4.3 Análise da Variação do Nível d'Água

Na Figura 5 pode ser visto o gráfico comparando a vazão do rio (m^3/s), a vazão de base (m^3/s), o nível d'água (m), e a precipitação (mm) para a sub-bacia de Azevedo Sodré. O nível d'água subterrânea é medido a partir da superfície, ou

seja, quanto menor for o valor do NA, maior será a altura do freático. Pode-se visualizar uma defasagem entre os picos do NA e de vazão máxima; com relação a precipitação, pode-se também notar uma possível relação de defasagem, na qual ocorre o evento de precipitação e posteriormente se dá o aumento do NA. A defa-

sagem entre os eventos de precipitação, de chegada de água até o freático e de recarga do aquífero livre ocorre em razão de diversos fatores, como intensidade da precipitação, tipo de solo e suas características, tipologia de rocha da qual é formado o aquífero, entre outros. (LUCAS *et al.*, 2012)

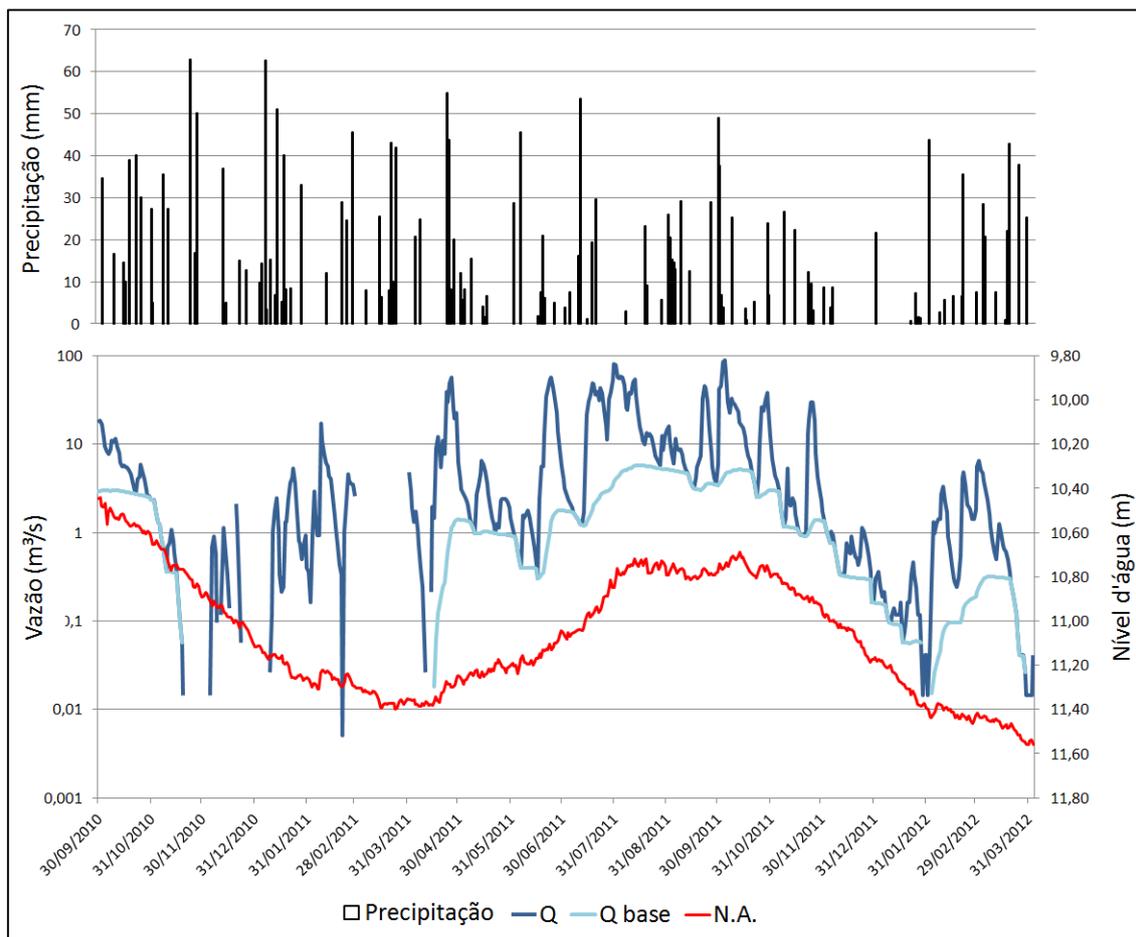


Figura 5 - Vazão, vazão de base, nível d'água e precipitação na sub-bacia de Azevedo Sodré

Figure 5 - Streamflow discharge, baseflow, water-table level and precipitation on the sub-watershed of Azevedo Sodré

Na sub-bacia do Passo da Cachoeira (Figura 6) também pode ser observada a existência de uma possível relação de resposta entre a vazão do rio e o nível d'água medido no piezômetro, pois vários picos estão sobrepostos; na comparação do NA com a precipitação também se verifica esse comportamento.

Estes resultados estão em concordância com os resultados obtidos pela separação do escoamento de base. Como foi reportado anteriormente, a bacia do

Passo da Cachoeira foi a que apresentou o maior valor de recarga aquífera (47%); além disso, o arcabouço geológico da bacia é majoritariamente permeável, composta por arenitos e aluviões quaternários (78%); e ainda, a bacia possui uma tipologia de solo pouco argilosa, ou seja, muito permeável e bem drenada (66% de latossolos). Todas essas características apontam que a bacia possui uma boa capacidade de regularização de vazão e de resposta em casos de eventos de precipitação ou

recessão. Da mesma forma, a bacia de Azevedo Sodré apresentou a segunda menor recarga aquífera de todas as sub-bacias da BHib (17%): embora sua constituição geológica seja majoritariamente permeável (65%), a cobertura de solo é

essencialmente argilosa (29% argissolo e 71% planossolo); dessa forma, esta sub-bacia apresenta características de baixa capacidade de regularização de vazão, e uma lenta resposta a eventos de precipitação.

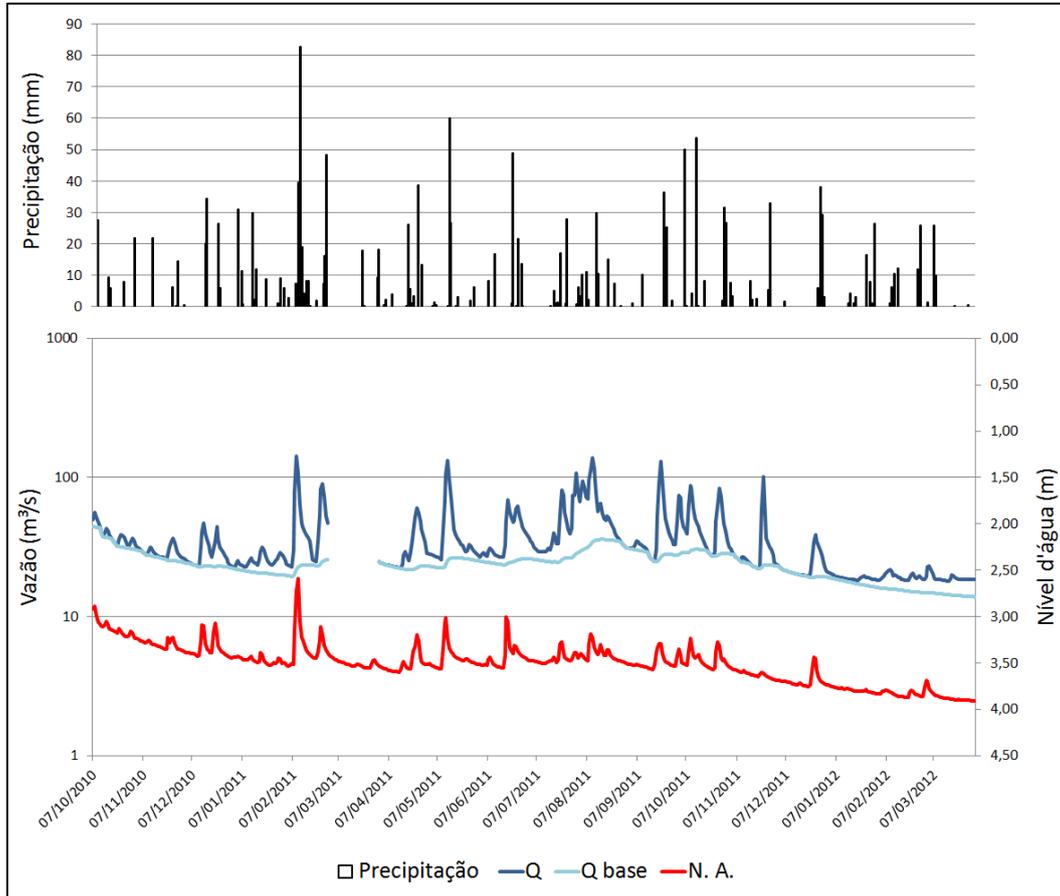


Figura 6 - Vazão, vazão de base, nível d'água e precipitação na sub-bacia de Passo da Cachoeira

Figure 6 - Streamflow discharge, baseflow, water-table level and precipitation on the sub-watershed of Passo da Cachoeira

A análise realizada acima é uma abordagem inicial do uso de medições contínuas de nível d'água para investigar o comportamento da água subterrânea e suas interações. É importante ressaltar que deve ser realizada uma investigação mais aprofundada deste método.

4.4 Comparação com outros estudos

O método da variação do nível d'água foi utilizado por Martelli (2012) para estimar as taxas de recarga em afloramentos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na região do município de Cace-

qui, no Rio Grande do Sul. Os valores obtidos variaram de 180 a 218 mm/ano, que estão em concordância com o valor da taxa de recarga calculado no presente estudo para a sub-bacia de Manoel Viana, que abrange o município de Cacequi, cujo valor foi de 221,9 mm/ano.

Dambrós e Silva (2013) também utilizaram o método da variação do nível d'água para estimar a recarga aquífera na região do município de Rosário do Sul, obtendo valores que variaram de 142 a 170 mm/ano. No presente estudo, para a sub-bacia de Rosário do Sul, que abrange este município, foi obtida uma taxa de

recarga de 160,9 mm/ano, valor semelhante ao encontrado no referido estudo.

O estudo de Rabelo e Wendland (2009) utilizou um modelo calibrado a partir do escoamento de base e dos níveis estáticos dos poços na área de uma bacia na região do Estado de São Paulo. Neste trabalho, a área correspondente à Formação Serra Geral apresentou taxa de recarga de 215 mm/ano; no presente estudo, as sub-bacias cujas formações geológicas são majoritariamente derrames vulcânicos (Cachoeira dos Cinco Veados, Jaguari, Vila Clara, Alegrete, Passo dos Britos, Passo dos Guterres e Ernesto Alves) apresentaram taxas de recarga variando de 88 mm/ano a 315 mm/ano, mas se concentrando em torno de 200 mm/ano.

No mesmo trabalho (Rabelo e Wendland, 2009), as formações Botucatu e Pirambóia apresentaram uma taxa de recarga de 465 mm/ano, enquanto que no presente estudo as sub-bacias cujas unidades geológicas predominantes são os arenitos e os pelitos Permeanos (Manoel Viana e Ponte Ibicuí da Armada), com taxas de recarga variando entre 162,5 a 221,9 mm/ano. Essa não correspondência pode ser explicada através de diferenças na cobertura das bacias, bem como diferenças climáticas, já que a região geográfica não coincide.

O estudo de Simon (2014) estimou as taxas de recarga aquífera para seis poços de monitoramento do Projeto RIMAS da CPRM (Rede Integrada de Monitoramento de Água Subterrânea) na Bacia do Rio Ibicuí pelo método da variação do nível d'água. Os resultados obtidos em ambos os estudos foram de magnitudes semelhantes: três poços obtiveram porcentagens de recarga a partir da precipitação variando entre 11,5 e 13,2%, e no presente estudo as sub-bacias nas quais estão localizados estes poços de monitoramento obtiveram recargas de 11 a 13%; os outros três poços de monitoramento apresentaram resultados variando de 15,5 a 30,2%, enquanto que os resultados neste estudo para as respectivas sub-bacias foram de 11

a 21%. Essas diferenças podem ser explicadas em razão da abrangência de cada método, enquanto a separação de escoamento de base neste estudo foi realizada para sub-bacias de vários tamanhos e arcabouços geológicos variados, o método da variação dos níveis d'água estima a recarga para regiões próximas ao poço de monitoramento (SIMON, 2014).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da realização deste trabalho foi possível verificar que o método de separação de escoamento de base utilizando o Filtro de Eckhardt (Eckhardt, 2005) com o cálculo do parâmetro BFI_{max} através da metodologia proposta por Collischonn e Fan (2013) é uma metodologia eficaz e rápida para o dimensionamento das taxas de recarga aquíferas. Este método utiliza dados que estão disponíveis, o que facilita a sua aplicação.

Os resultados obtidos de taxa de recarga aquífera variaram entre 13% e 47%, mas se concentraram em torno de 27%. Nas sub-bacias com altas taxas de recarga em relação à média foi possível relacionar estes resultados com unidades geológicas com transmissividades mais elevadas e solos mais permeáveis, além de altas precipitações médias. As sub-bacias com baixas taxas de recarga em relação à média são constituídas por unidades geológicas permeáveis e unidades cristalinas impermeáveis, solos com altos teores de argila e precipitações médias reduzidas.

A partir da comparação visual dos resultados obtidos pela separação de escoamento de base com os dados de nível d'água do Projeto RIMAS foi possível notar uma correlação nas variações de vazão de base, nível d'água e precipitação, sendo também possível verificar a possível influência dos aspectos geológicos e pedológicos no comportamento destes parâmetros.

Os resultados deste trabalho forneceram uma estimativa de recarga aquífera

de maneira discretizada, o que possibilitou uma melhor avaliação da influência geológica e pedológica na recarga aquífera. Estes dados são importantes já que existe uma escassez de trabalhos de estimativa de recarga na região estudada. É importante ressaltar que devem ser realizados

estudos mais aprofundados com relação à caracterização da área de estudo, principalmente nas questões geológicas (aflorentamentos, características diferenciadas das unidades) e de solos (espessura e materiais presentes nas camadas de solo, zona saturada).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br>>. Acesso em: setembro, 2013.
- COELHO, G.; PONTES, L. M.; BATISTA, M. L.; MELLO, R.; SILVA, A. M. Relação entre o Escamamento de Base e os Diferentes Sistemas Hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 257-267, 2015.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Editora ABRH, 350p, 2013.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Flow Filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2013.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Programa Geologia do Brasil. Porto Alegre/RS, 254p, 2010.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Isoietas Anuais na escala 1:5.000.000**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1351&sid=9>>. Acesso em: setembro, 2013.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. RIMAS – **Rede Integrada de Monitoramento de Água Subterrânea**. Disponível em: <<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: outubro, 2013.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. John Wiley & Sons, Singapore, 824p., 1990.
- DAMBRÓS, C.; SILVA, J. L. S. Aplicação do Método WTF para Determinação de Estimativas de Recarga de Aquífero: Comparação entre duas Sub-Bacias Hidrográficas. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves/RS, 2013.
- ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for base flow separation. **Hydrological Process**, v.19, p. 507-515, 2005.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Ferramenta Facilitadora do Trabalho com Dados Hidrológicos Disponibilizados pela ANA. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Unipampa**, v.1, n.1, 2009.
- HEALY, R.W. **Estimating Groundwater Recharge**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 244p, 2010.
- HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA – HGE. **Delimitação de Bacias**. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/hge/>>. Acesso em: setembro 2013.
- HIRATA, R.; ZOBBI, J.; OLIVEIRA, F. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial. In: Bicudo, C.; Tundisi, J; Scheuenstuhl, M. (Org.). **Águas do Brasil: análises estratégicas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Botânica, v.1, p. 144-164, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Solos do Brasil**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm>. Acesso em: setembro 2013.
- KIRCHHEIM, R. E.; MATTIUZI, C. D. P.; FIGUEIRA, S. V. Uso do SIAGAS como Ferramenta para o Diagnóstico das Águas Subterrâneas na Bacia do Rio Ibicuí/RS. In: **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves/RS, 2013.
- LUCAS, M. C.; GUANABARA, R. C.; WENDLAND, E. Estimativa de Recarga Subterrânea em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, p. 311-323, 2012.

- MAILLET, E. **Essais d'hydraulique souterraine et fluviale**. Librairie Sci., A. Hermann, Paris, 218p, 1905.
- MARTELLI, G. V. **Monitoramento da Flutuação dos Níveis de Água em Aquíferos Freáticos para Avaliação do Potencial de Recarga em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani em Cacequi-RS**. Dissertação de Mestrado, UFSM, 151p, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Rio Uruguai**. Brasília/DF, 132p, 2006.
- PROFILL. **Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, Fases A e B**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul, 93p, 2011.
- RABELO, J. L.; WENDLAND, E. Assessment of Groundwater Recharge and Water Fluxes of the Guarani Aquifer System, Brasil. **Hydrogeology Journal**, v.17, 1733-1748, 2009.
- RAMESH, H.; MAHESHA, A. Conjunctive Use of surface Water and Groundwater for sustainable Water Management. In: Ghenai, C. **Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies** - Manufacturing and Environment, 264p, 2002.
- ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKIEGEL, E. W.; VERDUN, R.; NARDIN, D. Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Proposta de Classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, 2010.
- RUTLEDGE, A. T. The Appropriate Use of the Rorabaugh Model to Estimate Ground Water Recharge. **Ground Water**, v. 43, n. 3, p. 292-293, 2005.
- SIMON, F. W. **Estimativa de Recarga do Aquífero Guarani na Bacia do Rio Ibicuí (RS), com Base na Aplicação do Método da Variação dos Níveis de Água**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS, 69p, 2014.
- TODD, D. K. **Groundwater Hydrology**. 3. ed, John Wiley and Sons, Inc. Nova York, 1956.
- WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. S. 2004. **Adaptação do modelo digital de elevação da SRTM para o Sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>