

Estimativas de recarga aquífera com uso de filtros digitais em sub-bacias hidrográficas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul

Taison Anderson Bortolin*, Pedro Antonio Roehe Reginato†, Marco Antonio Presotto* e Vania Elisabete Schneider*

Resumo

A estimativa de recarga aquífera possui grande relevância nos estudos de águas subterrâneas e cálculo de disponibilidade hídrica em diferentes regiões. Este estudo teve por objetivo estimar a recarga de águas subterrâneas a partir de 3 diferentes métodos através da estimativa de parâmetros de escoamento de base em 11 sub-bacias, inseridas no Sistema Aquífero Serra Geral localizadas no estado do Rio Grande do Sul a partir de dados diários de 30 anos de vazão (1977/2006). Para tal foram utilizados filtros recursivos digitais como métodos de separação de escoamento de base como o proposto por Eckhardt, onde é possível obter o fluxo de base nos cursos d'água através da separação da vazão em dois elementos: escoamento superficial (direto) e escoamento de base (indireto). O resultado dessa separação é definido por um índice de escoamento de base (BFI), sempre restringido a um valor máximo (BFImax). Para este fim, foram aplicados 3 valores de BFImax: um predefinido por Eckhardt conforme geologia local, um obtido através da razão das vazões de permanência Q90/Q50 e outro através da utilização de um filtro inverso proposto por Collischonn e Fan (2013). Após, calculou-se as taxas de recarga (TR), relacionando os valores da vazão de base média obtidos em cada estação fluviométrica analisada e as áreas de drenagem de cada sub-bacia. Pode-se constatar que para a região de estudo os parâmetros predefinidos de Eckhardt apresentam valores mais baixos na maior parte das bacias se comparado aos outros. Os resultados encontrados demonstraram que há diferenças estatisticamente significativas no emprego de diferentes métodos. Para as 11 sub-bacias do Sistema Aquífero Serra Geral, foram encontradas recargas que variaram entre 9,23% utilizando o método 2 até 35,87% da precipitação com o emprego do método 3. Destaca-se, entretanto, que as diferenças nos valores, além de depender dos parâmetros e métodos utilizados podem estar associadas a uma série de fatores fisiográficos e climatológicos da bacia, sendo de suma importância sua avaliação na estimativa de recarga.

Palavras-chave

Recursos Hídricos, Recarga Aquífera, Separação do Escoamento de Base, Filtros Recursivos Digitais

Estimates of aquifer recharge with the use of digital filters in sub-basins of Serra Geral Aquifer System in the state of Rio Grande do Sul

Abstract

The aquifer recharge measurement has a large effect on groundwater studies and hydric availability calculations in different regions. The objective of this study was to estimate the groundwater recharge from 3 different methods by estimating base flow parameters in 11 sub-basins, located in the Serra Geral Aquifer System located in the state of Rio Grande do Sul from daily data of 30 years of flow (1977/2006). For this, recursive digital filters were used as baseflow separation methods such as those proposed by Eckhardt (2005), where it is possible to obtain the baseflow in the watercourses by separating the flow into two elements: surfaceflow (direct) and baseflow (indirect). The result of this separation is defined by a baseflow index (BFI), always restricted to a maximum value (BFImax). To this end, 3 values of BFImax were applied: one predefined by Eckhardt according to local geology, one obtained through the ratio of the Q90 / Q50, and another through the use of a reverse filter proposed by Collischonn and Fan (2013). After that, the recharge rates (TR) were calculated, relating the values of the average base flow obtained in each analyzed fluviometric station and the drainage areas of each sub-basin. It can be observed that for the study region the predefined Eckhardt parameters present lower values in most of the basins when compared to the others. The results showed that there are statistically significant differences in the use of different methods. For the 11 sub-basins of the Serra Geral aquifer system, recharge rates ranged from 9.23% using method 2 to 35.87% of precipitation using method 3. It is noteworthy, however, that the differences in values, besides being dependent on the parameters and methods used, may be associated to a series of physiographic and climatologic factors of the basin, being extremely important its evaluation in the estimation of recharge.

Keywords

Water Resources, Groundwater Recharge, Baseflow Separation, Recursive Digital Filters

*Universidade de Caxias do Sul, Instituto de Saneamento Ambiental, Caxias do Sul, Brasil; †Universidade Federal do Rio Grande do Sul
E-mails: tabortol@ucs.br, pedro.reginato@ufrgs.br, marcopresotto@hotmail.com, veschnei@ucs.br

Data de envio: 20/05/2018
Data de aceite: 17/09/2018

<http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v6iss2p21>

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por águas subterrâneas tem aumentado expressivamente tanto no Brasil, como em outros países do mundo. Estima-se que, no mundo, cerca de 2 bilhões de pessoas usem as águas subterrâneas como sua principal fonte de abastecimento [1]. Apesar de sua importância, o conhecimento sobre a disponibilidade destes sistemas é limitado em comparação com a água superficial [2].

Para uma exploração racional e sustentável das águas subterrâneas, as taxas de retirada e de recarga devem ser conhecidas de modo que seja possível gerenciar o regime de bombeamento até, no máximo, o limite da disponibilidade hídrica, sendo que esta depende da recarga e das características do próprio aquífero [3]. A recarga é um mecanismo importante do ciclo hidrológico, a qual pode ser definida como o fluxo de água através da zona não saturada do solo, que alcança o nível freático e se adiciona ao reservatório de água subterrânea [4], [5], [6].

Na região de estudo, localizada na metade norte do Rio Grande do Sul, os recursos hídricos subterrâneos possuem papel fundamental, visto que a maior parte dos municípios se utilizam destas águas para o abastecimento da população [7]. Desta forma, a gestão adequada das reservas de água subterrânea pelos órgãos competentes é de extrema importância para evitar problemas de abastecimento público no futuro. De acordo com [8], a gestão dos recursos hídricos subterrâneos tem-se destacado em virtude da falta de água em diversos locais do planeta Terra. [9] destaca que a estimativa da recarga aquífera é um dos fatores determinantes em estudos de caracterização hidrogeológica, sendo útil também no gerenciamento das explorações de água subterrânea, podendo assim se definir um valor adequado de exploração, garantindo a vida útil do aquífero a longo prazo. Destaca-se também que sua estimativa é imprescindível em estudos de balanço hídrico de uma determinada bacia hidrográfica, tendo em vista que a recarga é um dos principais componentes do ciclo hidrológico.

A estimativa de recarga aquífera pode ser obtida por meio de diversos métodos conforme as características da área, sendo necessário identificar as parcelas direta (escoamento superficial) e indireta (escoamento de base) do escoamento total. [10] destacam que o fluxo superficial de um rio, normalmente, se decompõe em um fluxo subsuperficial e em um fluxo subterrâneo, onde este último é alimentado pela infiltração profunda, equivalente à recarga subterrânea.

Dentre os métodos mais utilizados no cálculo de estimativa de recarga, podem ser citados o modelo do balanço hídrico [11], [12], [13], [14], variação do nível da água [15], [16], [17]; técnica de traçadores [18], [19], [20]; análise da curva de recessão do hidrograma [21], [22]; e uso de algoritmos de filtros digitais recursivos [23], [24], [25], [26], [27].

Neste estudo, optou-se em utilizar a separação do escoamento de base por meio de um filtro digital e recursivo, pois trata-se de uma técnica de separação onde é possível

automatizar os cálculos em planilha eletrônica de forma bastante rápida, visto que se utilizam somente de dados de vazão.

O objetivo principal deste trabalho, foi estimar a recarga de águas subterrâneas a partir de 3 diferentes métodos por meio da estimativa de parâmetros de escoamento de base (BFI – baseflow index) em 11 sub-bacias. Para tal foi utilizado o filtro recursivo e digital sugerido por Eckhardt [27], que formulou um método de separação de escoamento de base onde o parâmetro BFI é restringido a um índice de escoamento de base máximo (BFImax), definido conforme as características geológicas e hidrogeológicas da região estudada.

Neste estudo, além deste parâmetro pré-definido por meio da situação geológica da área de inserção da sub-bacia, foram utilizados outros dois valores de BFImax que foram substituídos na metodologia de Eckhardt [27] para análise dos resultados. O primeiro BFImax testado foi o uso somente da razão das vazões Q90/Q50, enquanto o segundo, foi a utilização de um BFImax obtido através de um filtro recursivo inverso proposto por Collischonn e Fan [28]. Posteriormente, com os resultados da separação de escoamento, foi possível realizar uma estimativa das taxas de recarga aquífera nas 11 sub-bacias e relacioná-las com as precipitações médias anuais em cada sub-bacia.

II. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa abrange 11 sub-bacias inseridas no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) localizadas no estado do Rio Grande do Sul conforme apresentado na Figura 1.

Este sistema aquífero ocupa uma extensa área no nordeste do planalto Rio Grandense, o qual está associado com os derrames da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral. Suas litologias são predominantemente riolitos, riodacitos e em menor proporção, basaltos fraturados [29].

Conforme [30] e [31], o Sistema Aquífero Serra Geral representa um típico aquífero fraturado, estando associado às rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, cuja circulação de águas subterrâneas está diretamente ligada com esta estruturação tectônica fraturada.

O aquífero fraturado é caracterizado como heterogêneo, descontínuo e instável [32], [33] e possui uma forte anisotropia, vazões variáveis, além de capacidades específicas e transmissividades baixas [34].

[35] comentam que os mecanismos de recarga neste tipo de aquífero ocorrem preferencialmente por dois condicionamentos distintos: infiltração de águas pluviais a partir de rupturas regionais cobertas por manto de alteração e solo; e infiltração de água armazenada nas coberturas sedimentares pós-basálticas, quando estas são existentes. Além disso, outro aspecto que possui grande influência é o clima e distribuição das chuvas [6].

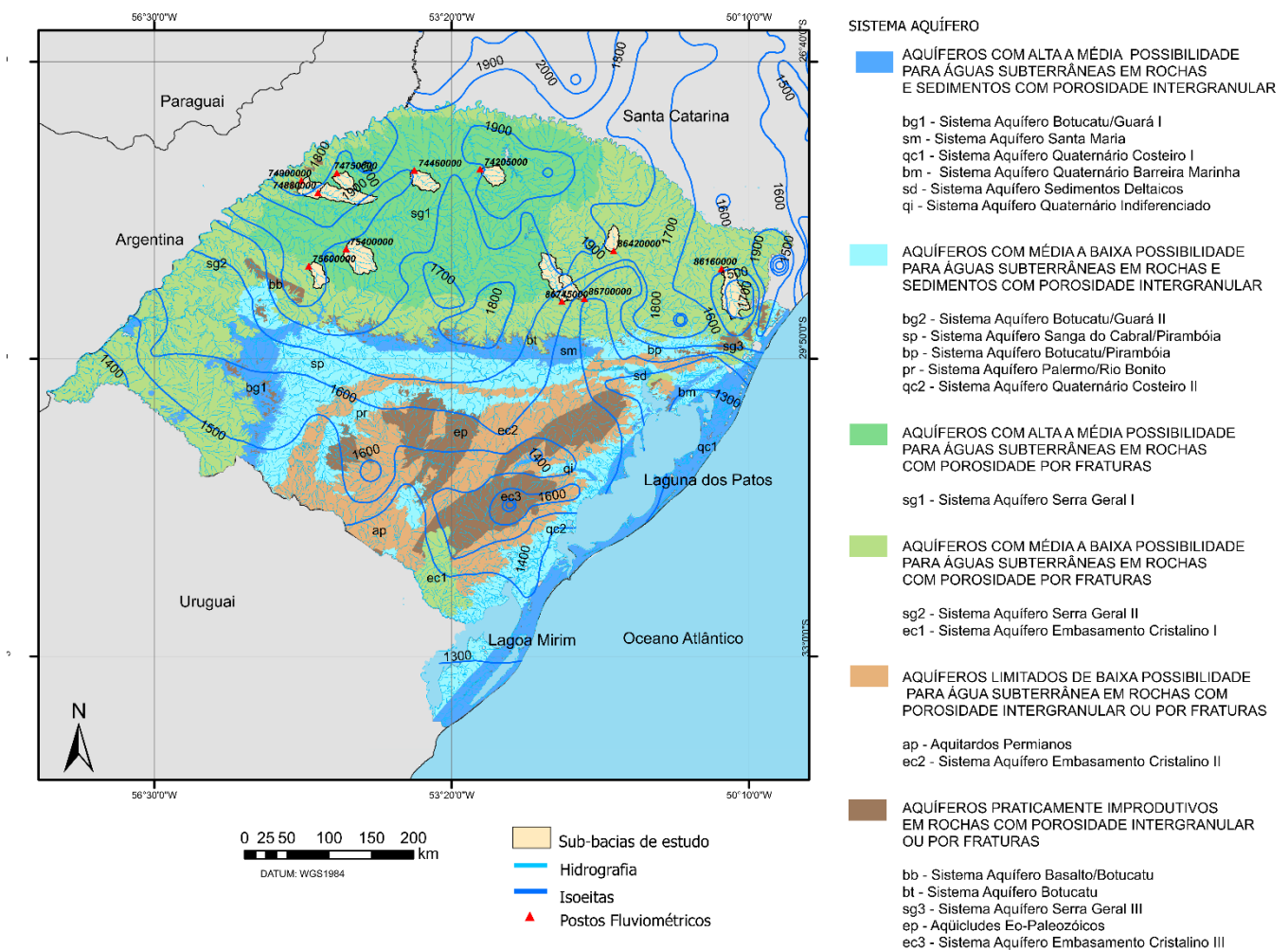


Fig. 1: Localização da área de estudo

III. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram selecionados 11 postos fluviométricos da Rede Hidrológica Nacional através da plataforma do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, denominado Portal Hidroweb, da Agência Nacional das Águas - ANA [1], correspondendo aos seguintes números de estações: 74205000, 74460000, 74750000, 74880000, 74900000, 75400000, 75600000, 86160000, 86420000, 86700000 e 86745000.

Em cada uma das séries históricas de vazão das estações fluviométricas, aplicou-se o método de filtros digitais para obter os índices de escoamento de base e as respectivas taxas de recarga aquífera. Os resultados foram comparados com dados de precipitação obtidos a partir das isoietas disponibilizadas pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Todos os estudos realizados correspondem às vazões compreendidas entre os anos de 1977 e 2006, sendo os resultados obtidos a partir do software *Microsoft Excel*.

- Métodos utilizados

A metodologia aplicada para efetuar a separação do escoamento de base foi o Filtro Digital Recursivo de Eckhardt [27], sendo este escolhido por se tratar de um método generalista e de fácil aplicação. Este filtro recursivo se refere

a um algoritmo empregado para calcular o fluxo de base em cursos de água, por meio da separação da vazão dos rios em duas componentes: escoamento superficial (*direct runoff* - direto) e escoamento de base (*baseflow* - indireto), conforme apresentado na Equação 1.

$$y_i = f_i + b_i \quad (1)$$

Onde:

- y = vazão do rio (m³/s)
- f = escoamento superficial (m³/s)
- b = escoamento de base (m³/s)
- i = intervalo de tempo

Para [27] múltiplos filtros poderiam ser equacionados de forma genérica, já que a vazão de base sempre deve ser igual ou menor à vazão total do rio no mesmo período de tempo. De acordo com o autor, uma constante de recessão (a) e um parâmetro de escoamento de base máximo (BFImax) seriam suficientes para definir o escoamento de base.

Conforme [36], a constante de recessão “a” citada, está associada com a descarga em um determinado espaço de tempo definido em períodos de recessão, sendo que nestes períodos não há entrada por precipitação e, conseqüentemente, o escoamento superficial (*direct runoff*) é nulo, ocorrendo desta forma uma descarga do aquífero de

forma natural. Para encontrar esta constante, deve-se inicialmente analisar com atenção o hidrograma do posto fluviométrico procurando por períodos de recessão. Este espaço de tempo e os valores de vazão referentes são aplicados no cálculo da constante do período característico “k”, conforme apresentado na Equação 2 e a partir do valor de “k” é possível calcular a constante “a”, conforme Equação 3.

Para este trabalho, a constante do período característico (k) para cada uma das séries foi definida com base na análise dos vários períodos de recessão com mais de 25 dias a fim de encontrar um valor médio para cada posto fluviométrico.

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q(t+\Delta t)}{Q(t)}\right)} \quad (2)$$

$$a = e^{-\frac{\Delta t}{k}} \quad (3)$$

Onde:

- k = constante do período característico (ad.)
- Q = vazão (m³/s)
- a = constante de recessão (ad.)

O parâmetro BFI (Índice de Escoamento de Base) é a razão, a longo prazo, entre o escoamento de base e a vazão total do rio, conforme apresentado na Equação 4.

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (4)$$

Onde:

- BFI = índice de escoamento de base (ad.)
- b = escoamento de base (m³/s)
- y = vazão do rio (m³/s)

Segundo [27], a equação do filtro digital para determinação do escoamento de base pode ser configurada conforme Equação 5.

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1-a) \cdot BFI_{max} \cdot y_i}{1-a \cdot BFI_{max}} \quad (5)$$

Onde:

- b = escoamento de base (m³/s)
- BFI_{max} = parâmetro que limita o escoamento de base (ad.)
- y = vazão do rio (m³/s)
- a = constante de recessão (ad.)

O parâmetro BFI_{max} é um fator que limita o parâmetro BFI e pode ser influenciado pelas características geológicas e hidrogeológicas do local. Para este estudo foram aplicados três diferentes parâmetros BFI_{max} ao filtro recursivo de Eckhardt, sendo aqui chamados de método 1, método 2 e método 3, os quais são limitados a BFI_{max} < 1 [27].

a) Método 1 (BFI_{max} Eckhardt)

Após diversos estudos realizados na Pennsylvania, Maryland, Illinois e Alemanha, [27] concluiu que o parâmetro BFI_{max} é diferente conforme o cenário geológico e hidrogeológico presente no local de estudo. Com isso, foram propostos valores preestabelecidos para este parâmetro máximo, sendo que em situações de rios perenes com aquíferos porosos o BFI_{max} vale 0,8; no caso de rios efêmeros com aquíferos porosos, este parâmetro vale 0,5; e onde há ocorrências de rios perenes com aquíferos cristalinos o BFI_{max} decresce para o valor de 0,25.

A partir destas informações, foi aplicado ao filtro recursivo um BFI_{max} de 0,25 devido ao contexto hidrogeológico da área em que as sub-bacias abordadas neste trabalho estão inseridas.

b) Método 2 (Vazões de Permanência)

Para este método, o parâmetro máximo BFI_{max} foi obtido através da razão entre as vazões de permanência Q₉₀ e Q₅₀ (Equação 6) obtidas para o período de 1977 a 2006.

$$BFI_{max} = \frac{Q_{90}}{Q_{50}} \quad (6)$$

Com os valores das vazões de permanência obtidos em cada posto fluviométrico e os parâmetros BFI_{max} calculados para cada sub-bacia foi possível aplicá-los no filtro recursivo de Eckhardt para obtenção do escoamento de base.

c) Método 3 (Filtro Inverso)

Apresentado por [28], este método utilizado para definir o parâmetro máximo BFI_{max} (Equação 7) é conhecido por filtro inverso, e se utiliza de um procedimento objetivo e inverso para calcular o parâmetro BFI, que será aplicado diretamente como BFI_{max} no filtro recursivo de Eckhardt.

$$BFI_{max} = \frac{\sum_{i=1}^N b'_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (7)$$

Através do filtro recursivo proposto por Eckhardt [27] a constante de recessão “a” relaciona uma descarga com um intervalo de tempo definido em períodos de recessão (Equação 8) sendo que através desta equação é possível obter o escoamento do tempo anterior (b_{i-1}).

$$b_i = a \cdot b_{i-1} \quad (8)$$

A partir desta equação (Equação 8), [28] constataram que poderia ser feito um filtro regressivo que resultaria em uma estimativa prévia do maior valor possível do fluxo de base:

$$b'_{i-1} = \frac{b'_i}{a} \quad (9)$$

O processo de cálculo começa pelo último dia da série analisada, quando se considera que a vazão do rio esteja composta apenas pelo fluxo de base, visto que para este filtro inverso ser aplicado (Equação 9) é necessário que a série termine em recessão para que se possa assumir que y_n = b_n.

Com os parâmetros BFI_{max} definidos para cada sub-bacia e limitados a 1, juntamente com as séries históricas de vazão para cada sub-bacia foi calculado o parâmetro BFI para o método 3 através da equação 4, além do escoamento de base médio para todas as 11 sub-bacias.

- Estimativa de Recarga Aquífera

Segundo [37], as maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões onde se tem relevo acidentado e que não possuem cobertura vegetal estando sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre de forma mais lenta e de modo limitado. No entanto, para [5], estas estimativas das taxas de recarga possuem um elevado grau de incerteza e podem variar conforme a definição da metodologia adotada e a disponibilidade de informação existente.

Para se obter a estimativa de recarga aquífera foi utilizada a Equação 10, considerando o fluxo de base como uma aproximação da recarga [38].

$$TR = \frac{\bar{b}}{A} \cdot 1000 \cdot 31622400 \quad (10)$$

Onde:

- TR = taxa de recarga aquífera (mm/ano)
- \bar{b} = média dos valores de fluxo de base (m³/s)
- A = área de drenagem (m²)

Para avaliar a diferença dos resultados obtidos com o uso dos três métodos foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis. E para a comparação de diferenças significativas entre os métodos (par a par) foi empregado o método de MannWhitney. Os dois testes foram aplicados a um nível de significância de 1%.

IV. RESULTADOS

Os valores da constante de recessão e os parâmetros BFI_{max} para os três métodos utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Índices de escoamento de base máximos (BFI_{max}) para as 11 sub-bacias analisadas.

Sub-Bacia	Área (km ²)	a	BFI _{max} Método 1	BFI _{max} Método 2	BFI _{max} Método 3
74205000	436,02	0,9485	0,25	0,29	0,48
74460000	501,28	0,9867	0,25	0,41	0,75
74750000	326,37	0,9739	0,25	0,32	0,54
74880000	822,43	0,9691	0,25	0,32	0,55
74900000	1265,87	0,9688	0,25	0,32	0,45
75400000	932,64	0,9759	0,25	0,30	0,43
75600000	377,04	0,9441	0,25	0,15	0,23
86160000	1117,4	0,9658	0,25	0,22	0,39
86420000	316,99	0,9636	0,25	0,27	0,49
86700000	435,14	0,9508	0,25	0,18	0,29
86745000	790,54	0,9729	0,25	0,27	0,52

Observa-se que o BFI_{max} previamente estabelecido por Eckhardt [27] que define este valor somente através da situação geológica e hidrogeológica na qual a sub-bacia hidrográfica se insere, foi o parâmetro com valor mais baixo para 63,63% das sub-bacias (7 das 11 bacias). Em relação aos parâmetros obtidos pelos métodos 2 e 3, (Equações 6 e 7) que calculam este levando em consideração a vazão presente no rio, foi possível evidenciar que os resultados na grande maioria dos casos são superiores ao BFI_{max} pré-estabelecido por Eckhardt, chegando ao valor de 0,41 para o método 2 e 0,75 no método 3, ambos para a sub-bacia 74460000.

Os resultados obtidos para escoamento de base médio (Tabela 2), demonstraram que os maiores valores de escoamento de base, comparando os três métodos utilizados, se concentraram nos métodos 2 e 3, assim como já havia se verificado anteriormente com o parâmetro BFI_{max}. Os valores variaram entre 2,36 a 9,78 m³/s para o método 1, 1,91 a 12,17 m³/s para o método 2 e 2,71 a 15,59 m³/s para o método 3.

Tabela 2: Escoamento de base médio (\bar{b}) para as 11 sub-bacias analisadas.

Sub-Bacia	Q médio (m ³ /s)	\bar{b} Método 1	\bar{b} Método 2	\bar{b} Método 3
74205000	10,96	3,31	3,84	5,66
74460000	15,25	3,79	6,23	10,82
74750000	10,00	2,42	3,06	4,77
74880000	21,42	6,14	7,68	12,34
74900000	35,18	9,78	12,17	15,59
75400000	32,34	7,70	9,05	12,67
75600000	16,28	3,51	2,31	3,28
86160000	26,59	6,72	5,95	9,89
86420000	9,73	2,36	2,50	4,21
86700000	11,65	2,42	1,91	2,71
86745000	28,32	7,52	7,92	13,96

Tabela 3: Índices de escoamento de base (BFI) para as 11 sub-bacias analisadas.

Sub-Bacia	BFI Método 1	BFI Método 2	BFI Método 3
74205000	0,248	0,289	0,424
74460000	0,250	0,413	0,716
74750000	0,248	0,313	0,488
74880000	0,249	0,312	0,500
74900000	0,248	0,309	0,396
75400000	0,240	0,282	0,395
75600000	0,204	0,135	0,191
86160000	0,241	0,213	0,354
86420000	0,247	0,262	0,442
86700000	0,214	0,169	0,240
86745000	0,247	0,261	0,459

Com os dados obtidos de escoamento de base médio e de vazão média nas 11 sub-bacias (Tabela 2), foi possível calcular o parâmetro BFI (Tabela 3) que é definido pela razão entre o escoamento de base médio e o volume total (vazão) em um intervalo de tempo. As sub-bacias hidrográficas apresentaram índices de escoamento de base (BFI) para o método 1, que variaram entre 0,214 e 0,25, para o método 2 entre 0,169 e 0,413 e para o método 3 entre 0,24 e 0,716, dependendo do comportamento hidrológico e fisiográfico de cada bacia.

A Tabela 4 apresenta as estatísticas dos testes de Kruskal-Wallis (KW) e Mann Whitney (MW) para os métodos empregados. Apesar dos valores obtidos serem de mesma grandeza, observa-se pelo teste estatístico de KW que há diferença significativa entre os métodos aplicados ($p < 0,01$). Isso também se confirma ao avaliar as diferenças par a par entre os métodos pelo teste de MW, o qual demonstra que há diferenças significativas entre 2 e 3 e entre 1 e 3, sendo que os métodos 1 e 2 não possuem diferenças significativas ($p > 0,01$).

Tabela 4: Índices de escoamento de base (BFI) para as 11 sub-bacias analisadas.

Métodos	Estatística o teste (*Kruskal –Wallis; ** Mann-Whitney)	Significância
1,2,3	11,148*	0,004
1,2	32**	0,061
1,3	20**	0,008
2,3	20**	0,008

Conforme [28], o método 3 apresenta os melhores resultados que o BFI_{max} pré-definido (método 1) e o BFI_{max} da curva de permanência (método 2), pois na análise visual da Figura 2, observa-se que a separação do escoamento por estes métodos é sempre menor que o hidrograma observado, mesmo durante recessões mais longas.

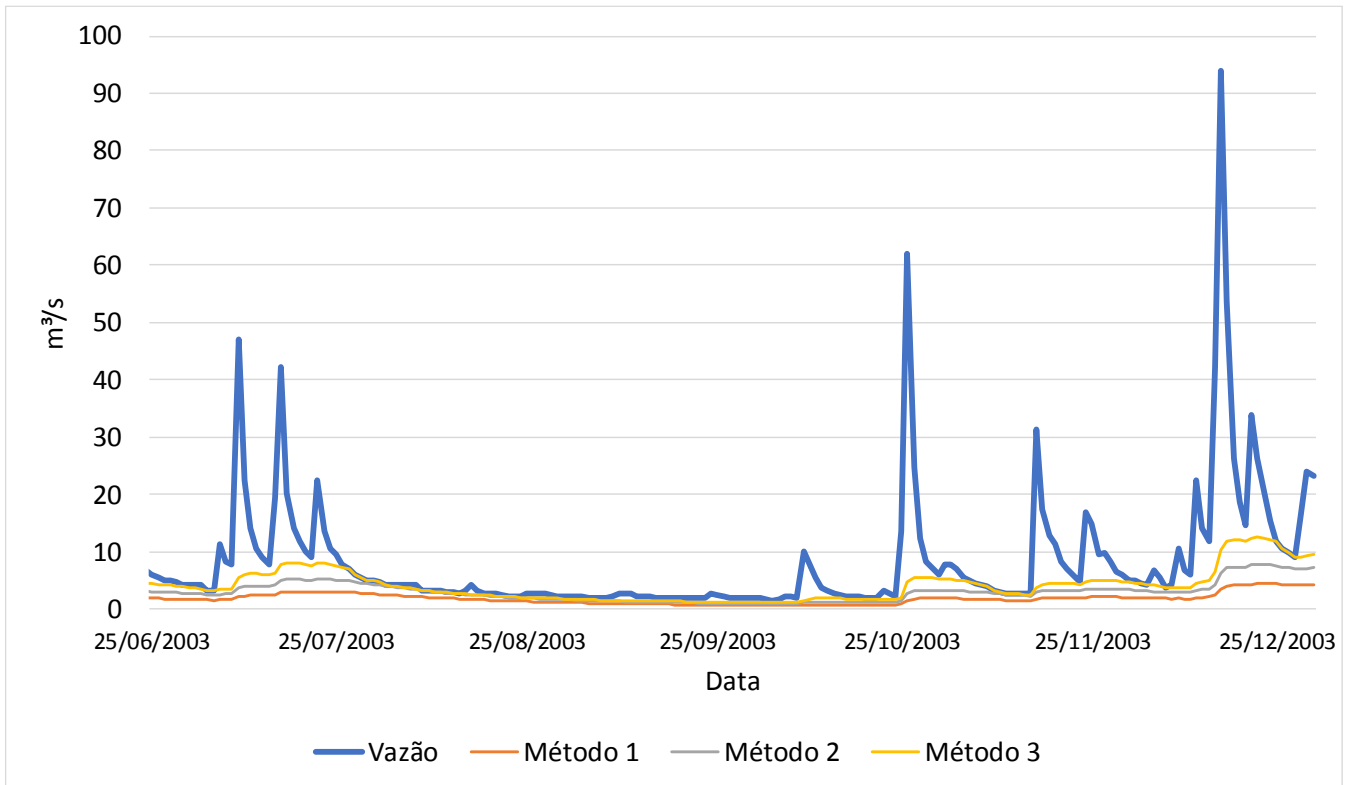


Fig. 2: Exemplo de trecho do hidrograma e separação do escoamento subterrâneo para os três métodos.

Em relação as taxas de recarga (Tabela 5), os resultados obtidos mostram valores variando entre 175,55 mm/ano na sub-bacia 86700000 e 300,44 mm/ano na sub-bacia 86745000 para o método 1; entre 138,51 mm/ano na sub-bacia 86700000 e 392,74 mm/ano na sub-bacia 74460000 para o método 2; e entre 196,81 mm/ano na sub-bacia 86700000 e

681,47 mm/ano para a bacia 74460000 no método 3. Tais valores mostram que as bacias com maiores taxas de recarga mudam conforme o método empregado, assim como o percentual em relação a precipitação total, como mostra o figura 3.

Tabela 5: Taxas de Recarga Aquífera (TR) em mm/ano nas 11 sub-bacias.

Sub-Bacia	Precipitação (mm/ano)	TR Método 1	TR Método 2	TR Método 3
74205000	1900	239,76	277,96	409,83
74460000	1910	238,89	392,74	681,47
74750000	1830	232,74	294,44	458,25
74880000	1853	237,68	297,68	477,79
74900000	1800	245,50	305,37	391,29
75400000	1830	261,47	307,03	429,96
75600000	1854	293,49	193,48	274,43
86160000	1610	189,73	167,92	279,14
86420000	1900	235,29	249,73	420,35
86700000	1500	175,55	138,51	196,81
86745000	1500	300,44	316,61	558,01

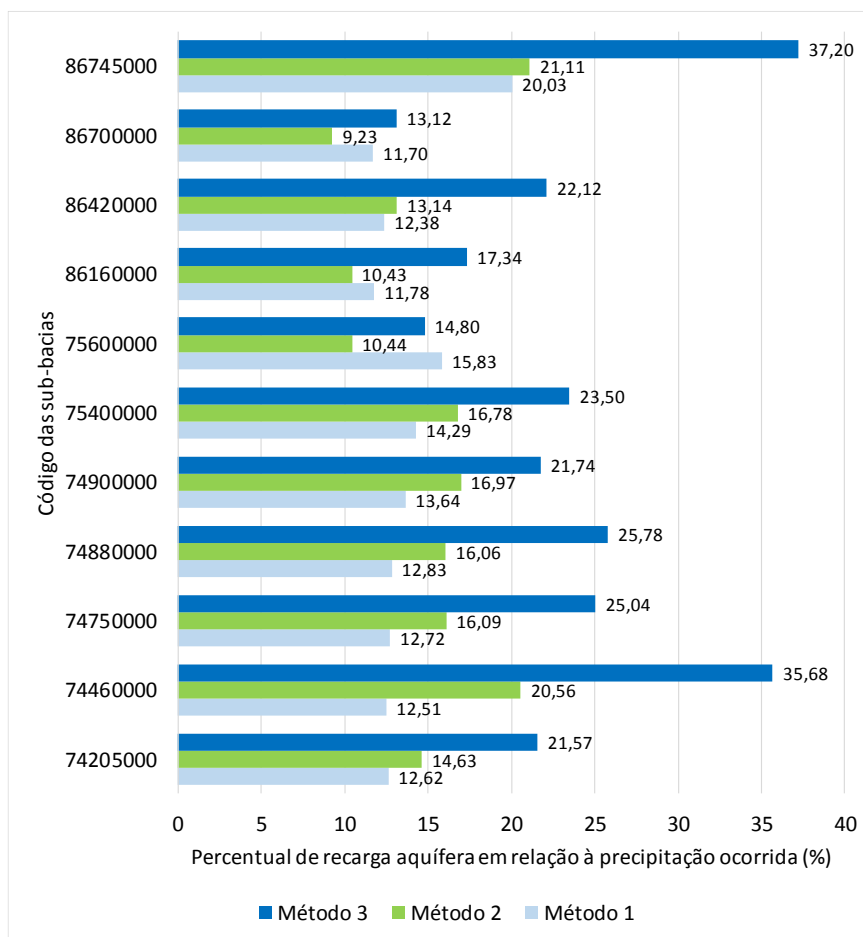


Fig. 3 – Percentual de Recarga Aquífera em relação à precipitação nas Taxas de Recarga Aquífera (TR) nas 11 sub-bacias.

Para um BFI_{max} de 0,25 como o proposto por [14], foram obtidas taxas de recarga que variaram de 11,70% a 16,69% da precipitação total ocorrida nas bacias. Para o método 2, estes valores são semelhantes, sendo a variação de 9,23% a 17,59%, enquanto que para o método 3, os valores percentuais são maiores, cuja variação é de 13,12% a 35,87%. Na média, a bacia com menor taxa de recarga em relação a precipitação total considerando os três métodos foi a bacia 86160000, enquanto a bacia 74460000 apresentou as maiores taxas de recarga.

Ao analisar as 11 sub-bacias conjuntamente, estima-se uma taxa de recarga média de 240,96 mm/ano para o método 1, enquanto para os métodos 2 e 3 as estimativas de recarga aquífera são 267,4 mm/ano e 416,12 mm/ano, representando percentuais de 13,72%, 15,22% e 23,7%, respectivamente, em relação à precipitação média ocorrida nas 11 sub-bacias (1756 mm/ano). Um estudo de sub-bacias com arcabouço geológico pouco permeável da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí [40] encontrou valores semelhantes de recarga, com variações entre 88,4 mm/ano e 314,9 mm/ano (13% e 33% da precipitação efetiva, e 6 e 17% da precipitação total, respectivamente). Outro estudo [41] encontrou valores na faixa de 11 a 32% da precipitação total anual em bacias do SASG na região do Paraná, corroborando também com os dados encontrados neste estudo. Também, [42], chegaram a valores de 17 a 20% na bacia do Paraná usando os métodos aplicados neste artigo.

Salienta-se que caso ocorra diminuição das precipitações, o escoamento de base também diminuirá, ocasionando menores estimativas de recarga aquífera, portanto, a avaliação contínua do percentual de recarga nas sub-bacias se faz

essencial para se ter um uso adequado destas águas nas atividades industriais, agrícolas e no abastecimento da população quando necessário.

V. CONCLUSÕES

Como a taxa de recarga nunca é totalmente conhecida com 100% de certeza para cada região, é importante a aplicação de vários métodos de recarga para sua estimativa e comparação. Conforme [39], nenhum método pode ser considerado como o melhor para estimar a recarga devido a: variabilidade espacial e temporal nas várias variáveis independentes; limitações inerentes de cada modelo; limitações na disponibilidade dos dados de entrada da área analisada; e variabilidade nos usos e aplicações da recarga estimada.

Neste estudo a aplicação do método de separação do escoamento de base aplicando o Filtro de Separação de Escoamento de Eckhardt, alterando o parâmetro BFI_{max} na equação, se tornou um recurso eficaz para estimar as taxas de recarga, mas ao mesmo tempo demonstrou que o emprego de diferentes parâmetros e métodos resultam em taxas de recarga distintas, com diferenças estatisticamente significativas.

Para as 11 sub-bacias do Sistema Aquífero Serra Geral, foram encontradas recargas que variaram entre 9,23%

utilizando o método 2 até 35,87% da precipitação com o emprego do método 3. Destaca-se, entretanto, que as diferenças nos valores, além de depender dos parâmetros e métodos utilizados podem estar associadas a uma série de fatores fisiográficos e climatológicos da bacia, sendo de suma importância sua avaliação na estimativa de recarga.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] KUNDZEWICZ, Z. W.; DOLL, P. Will groundwater ease freshwater stress under climate change?. *Hydrological Sciences Journal*, v. 54, n. 4, p. 665-675, 2009.
- [2] FOSTER, S. S. D.; CHILTON, P. J. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 358, n. 1440, p. 1957-1972, 2003.
- [3] KUNZLER, J. C. S. Estimativa da recarga da bacia sedimentar do rio do Peixe através da modelagem matemática do fluxo subterrâneo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 86 f. 2007.
- [4] FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. 2nd ed. New Jersey, Prentice Hall, Eaglewood, Cliff, pp. 87. 1979.
- [5] SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of estimation problems and recente developments. In: N.S. Robins, ed. *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability*. Geological Society, London, Special Publications, 130, 107-115, 1998.
- [6] HEALY, R. W. *Estimating groundwater recharge*. RU: Cambridge University Press, 245 p. 2010.
- [7] REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre do manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Ambiente, Taubaté*, v. 7, n. 2, p. 143-162, 2012.
- [8] HENKES, S. L. *Gestão de Recursos Hídricos: Acertos e Erros na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí/SC*. 167 p. 2002. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2002.
- [9] BERTOL, G. A. *Avaliação da Recarga Anual no Aquífero Bauru no Município de Araguari, Minas Gerais*. 111 p. 2007. Dissertação de Mestrado (Geologia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.
- [10] CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrologia subterrânea*. Omega. Barcelona. 1 ed. 2350p. 1976.
- [11] MEIRESONNE, L.; SAMPSON, D. A.; KOWALSKI, A. S.; JANSSENS, I. A.; NADEZHINA, N.; CERMAK, J.; VAN SLYCKEN, J.; CEULEMANS, R. Water flux estimates from a Belgian Scots pine stand: a comparison of different approaches. *Journal of Hydrology* 270: 230-252, 2003.
- [12] EILERS, V. H. M. Estimativa de recarga de águas subterrâneas utilizando o método do balanço hídrico. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá/MS, 20p. 2004.
- [13] LADEKARL, U. L.; RASMUSSEN, K. R.; CHRISTENSEN, S.; JENSEN, K.H.; HANSEN, B. Groundwater recharge and evapotranspiration for two natural ecosystems covered with oak and heather. *Journal of Hydrology*, v. 300, n. 1-4, p. 76-99, 2005.
- [14] BARRETO, C. E. A. G. *Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa*. 2006. 149 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [15] OLIVEIRA, A. C. V., LIMA, A.S.. Spatial variability in the stable isotopes of modern precipitation in the northwest of Iberia. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 46(1), 13–26., 2010.
- [16] CARVALHO, V. E. C.; REZENDE, K. S.; PAES, B. S. T.; BETIM, L. S. ; MARQUES, E. A. G.; Estimativa da Recarga em uma Sub-bacia Hidrográfica Rural Através do Método da Variação do Nível D'Água (VNA). *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 19 n.1 –Jan/Mar 2014, 271-280
- [17] CAI, Z.; OFTERDINGER, U.; Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology* 535 (2016) 71–84.
- [18] MINARDI, P.S.P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; BOMTEMPO, V. L. I Relatório de avanço técnico e financeiro apresentado à secretaria geral do Projeto Sistema Aquífero Guarani – SAG. UFMG. CDTN/CNEN, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2004.
- [19] PALMER, M., ALLAN, J. D., MEYER, J.; BERNHARDT, E. S. River restoration in the Twenty-First Century: data and experiential knowledge to inform future efforts. *Restoration Ecology*, v. 15, n.3, p. 472-481, 2007.
- [20] BOUCHAOU L.; MICHELOT J. L., VENGOSH A.; HSISSOU Y.; QURTOBI M.; GAYE C. B.; BULLEN T. D.; ZUPPI G. M. Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss–Massa aquifer, southwest of Morocco. *Journal of Hydrology* 352, págs. 267– 287. 2008.
- [20] KUMAR, M.; RAMANATHAN, A. L.; KESHARI, A. K. Understanding the extent of interactions between groundwater and surface water through major ion chemistry and multivariate statistical techniques. *Hydrological Processes*, v. 23, n. 2, p. 297-310, 2009.
- [21] COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n. 3, p. 173-183, 2010.
- [22] ALBUQUERQUE, A. C. L. S.; CHAVES, H. M. L. Estimates of the recharge in the Femeas River basin by manual and automatic methods. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 11, p. 1123-1129, 2011.
- [23] LYNE, V.D., HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall runoff modeling. *Hydro. and Water Resources Symposium Institution of Engineers, Perth, Australia*, pp. 89–92, 1979.
- [24] NATHAN, R.J., AND MCMAHON. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses: *Water Resources Research*, v. 26, no. 7, p. 1465–1473. , 1990.
- [25] ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M. Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *Journal of the American Water Resources Association* 35, 411–424, 1999.
- [26] CHAPMAN T. A comparison of algorithms for stream flow recession and base flow separation. *Hydrological Processes* 13: 701–714, 1999.
- [27] ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Process*, v. 19, n. 2, p. 507–515, 2005.
- [28] COLLISCHONN, W.; FAN, F. Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Flow Filter. *Hydrological Processes*, 27, 2012.
- [29] MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. Projeto Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: escala 1:750.000; relatório final. Porto Alegre: CPRM, 2005.
- [30] REGINATO, P. A. R.; AHLERT S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. Águas Subterrâneas*, v. 27, n. 2, p. 32-46, 2013.
- [31] REGINATO, P. A. R.; AHLERT S.; SCHNEIDER, V. E. Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, v. 27, n. 1, p. 65-78, 2013.
- [32] MOBÛS, G. Análise estrutural e hidrogeológica do aquífero fraturado da Formação Serra Geral-Região noroeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1987. IPHUFGRS. Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. 124 p.. Dissertação de Mestrado.
- [33] NANNI, A. S. O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico. 2008. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008
- [34] REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, Adelir José. Caracterização Hidrogeológica e Potencialidades dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004, Cuiabá. ANAIS DO

- XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. SÃO PAULO: ABAS, 2004. v. 1.
- [35] FRAGA, C.G e REBOUÇAS, A.C. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. Revista Água Subterrânea nº 12. Agosto de 1988. p 30-55.
- [36] DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Singapore, 824p, 1990.
- [37] REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUDINISI, J. G. Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Escrituras, 702 p., 2002.
- [38] SZILAGYI, J., HARVEY, F. E., AYERS, J. F., Regional estimation of base recharge to ground water using water balance and a base-flow index: Ground Water, v. 41, no. 4, p. 504-513. 2003
- [39] DELIN, G.; HEALY, R.; LORENZ, D.; NIMMO, J. Comparison of Recharge Estimation Methods Used in Minnesota. Home Messages. 2007.
- [40] MATTIUZI, C. D. P., KIRCHHEIM, R., COLLISCHONN, W., & FAN, F. M. (2016). Estimativa de recarga subterrânea a partir da Separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí (América do Sul). *Águas Subterrâneas*, 29(3), 285.
- [41] MELATI, M. D., FAN, F. M., & ATHAYDE, G. B. (2017). Estudo Das Interações Entre As Águas Superficiais E Subterrâneas Na Bacia Do Paraná 3 Utilizando Modelagem Hidrológica E Separação Do Escoamento De Base Study of the Interactions Between Runoff and Groundwater in the Paraná 3 Basin Using Hydrological Mode. *Anais Do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, (July 2018), 1–8.
- [42] BORGES, V. M., FAN, F. M., REGINATO, P. A. R., & ATHAYDE, G. B. (2017). Groundwater recharge estimating in the Serra Geral aquifer system outcrop area - Paraná State, Brazil. *Águas Subterrâneas*, 31(4), 338.