



Estimativa das reservas explotáveis da bacia hidrográfica do rio Novo por meio de separação do escoamento de base de hidrogramas de vazões observadas

Rafael Rezende Novais¹, Luana Lavagnoli Moreira², Bruno Peterle Vaneli³, Pablo Medeiros Jabor⁴

¹Agência Estadual Recursos Hídricos/AGERH. E-mail: rafael.rezende.novais@gmail.com

²Instituto Jones dos Santos Neves/IJSN. E-mail: lavagnoliluana@gmail.com

³Instituto Jones dos Santos Neves/IJSN. E-mail: brunopvaneli@gmail.com

⁴Instituto Jones dos Santos Neves/IJSN. E-mail: pmjabor@gmail.com

Resumo

Apesar de estar contemplada na Política Nacional de Recursos Hídricos, a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas tem sido negligenciada pelos gestores e usuários desses recursos. Dentre as causas dessa inadequação pode-se citar a escassez de estudos hidrogeológicos no Brasil e a falta de políticas públicas voltadas para o setor. Neste contexto, esse estudo se propõe a estimar as reservas subterrâneas renováveis da bacia hidrográfica do rio Novo, localizada no estado do Espírito Santo, visando auxiliar no processo de planejamento e implementação de seu Plano de Recursos Hídricos. O cálculo das reservas foi realizado por meio da separação do escoamento de base das duas estações fluviométricas existentes na bacia, a partir do Filtro Digital Recursivo de Eckhardt. Como resultado a bacia apresentou uma reserva explotável de $1,81 \times 10^8$ metros cúbicos por ano para o período de análise compreendido entre os anos de 1972 e 1990.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas. Filtro de Eckhardt. Gestão de Recursos Hídricos.

Área Temática: Recursos Hídricos

Safe yield estimation in Novo river basin by baseflow separation in observed flow hidrogram

Abstract

Although contemplated in the National Water Resources Policy, the integrated management of surface and groundwater has been neglected by managers and users of these resources. Among the causes of this inadequacy can be mentioned the lack of hydrogeological studies in Brazil and the non-existence of public policies for the sector. In this context, this article aims to estimate the safe yield of the Novo river basin, to assist the planning process and the Water Resources Plan implementation. The reservoir calculation was carried out by base flow separation of two fluviometric station from the study area using Eckhardt's Recursive Digital Filter. As results the safe yields in the basin was $1,81 \times 10^8$ cubic meters per year for the analysis period between 1972 and 1990.

Key words: Groundwater. Eckhardt's Filter. Water Resources Management.

Theme Area: Water Resources



1 Introdução

Os recursos hídricos subterrâneos constituem relevante fonte de água para diversas atividades humanas, desde o abastecimento de sistemas públicos até os usos agrícolas e industriais. Entretanto, no Brasil, a pesquisa e a gestão dos recursos hídricos têm negligenciado as reservas hídricas subterrâneas, desconsiderando o fato das águas superficiais e subterrâneas serem diferentes parcelas de um mesmo sistema (USGS, 2012). Com isso, ainda que na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97) (BRASIL, 1997) esteja explícita a visão da gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, gestores e usuários, na prática, ainda contemplam esses recursos de forma dissociada (HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010). Dessa maneira, levando em consideração a carência de estudos hidrogeológicos, associada à falta de políticas públicas para o setor, a exploração da água subterrânea de forma não planejada tem ocasionado a subestimação das reservas subterrâneas, ou em outro extremo, provocado a superexploração e distorções no equilíbrio natural de recarga e descarga do aquífero (REJANI et al., 2008).

Dito isso, para a implantação de uma gestão integrada e eficaz dos recursos hídricos há a necessidade da compreensão das interações entre as águas superficiais e subterrâneas de forma não dissociada. Nesse sentido, para o adequado planejamento é de fundamental importância a quantificação das reservas hídricas subterrâneas em uma bacia hidrográfica.

No entanto, os diferentes conceitos de reservas hídricas subterrâneas ainda não são uma unanimidade. Segundo Castany (1963) apud Feitosa et al. (2008), as reservas de água subterrânea podem ser divididas em quatro grandes categorias: reservas renováveis; reservas geológicas; reservas naturais; e reservas exploráveis.

As reservas renováveis, também denominadas reservas reguladoras, são associadas ao balanço hídrico das águas subterrâneas e tem ligação direta com a rede de drenagem superficial. Por sua vez, as reservas geológicas são definidas como as águas armazenadas durante longos períodos de tempo e que não sofrem variação em função das precipitações, encontrando-se abaixo da zona de descarga natural. Já a soma das reservas renováveis com as reservas geológicas é denominada reserva natural e representa a totalidade da água armazenada em um aquífero.

Por fim, a reserva explorável é a parcela responsável pela manutenção do equilíbrio de longo prazo entre a quantidade de água subterrânea retirada anualmente e a quantidade anual da recarga do aquífero. Dessa forma, a reserva explorável pode ser vista como a quantidade de água subterrânea extraída, com o mínimo de comprometimento do equilíbrio natural do ciclo hidrológico. Contudo, esse conceito tem sido debatido há longo tempo na literatura sem ainda um consenso (SOPHOCLEOUS, 1997; SOPHOCLEOUS, 2000). Isso pois, o rebaixamento dos níveis de água em um aquífero é uma condição inerente à sua utilização (BATISTA, 2015). Ainda nesse sentido, Hirata, Zoby e Oliveira (2010) reforçam que para definir a superexploração do aquífero é necessário contabilizar os custos dos impactos ecológicos, sociais e econômicos que essa extração de água irá ocasionar.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho consiste em estimar as reservas hídricas subterrâneas exploráveis na bacia hidrográfica do rio Novo, no Estado do Espírito Santo, a partir da separação do escoamento de base dos hidrogramas observados nas estações fluviométricas da área em estudo.

O resultado dessa pesquisa faz parte do projeto de pesquisa intitulado “Diagnóstico e Prognóstico das Condições de Uso da Água nas Bacias Hidrográficas dos Rios Itabapoana (parte capixaba), Itapemirim, Itaúnas (parte capixaba), Novo e São Mateus (parte capixaba) como subsídio fundamental ao Enquadramento e Plano de Recursos Hídricos”, conduzido pelo Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN) e pela Agência Estadual de Recursos Hídricos



(AGERH), em parceria com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEAMA) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES).

2 Metodologia

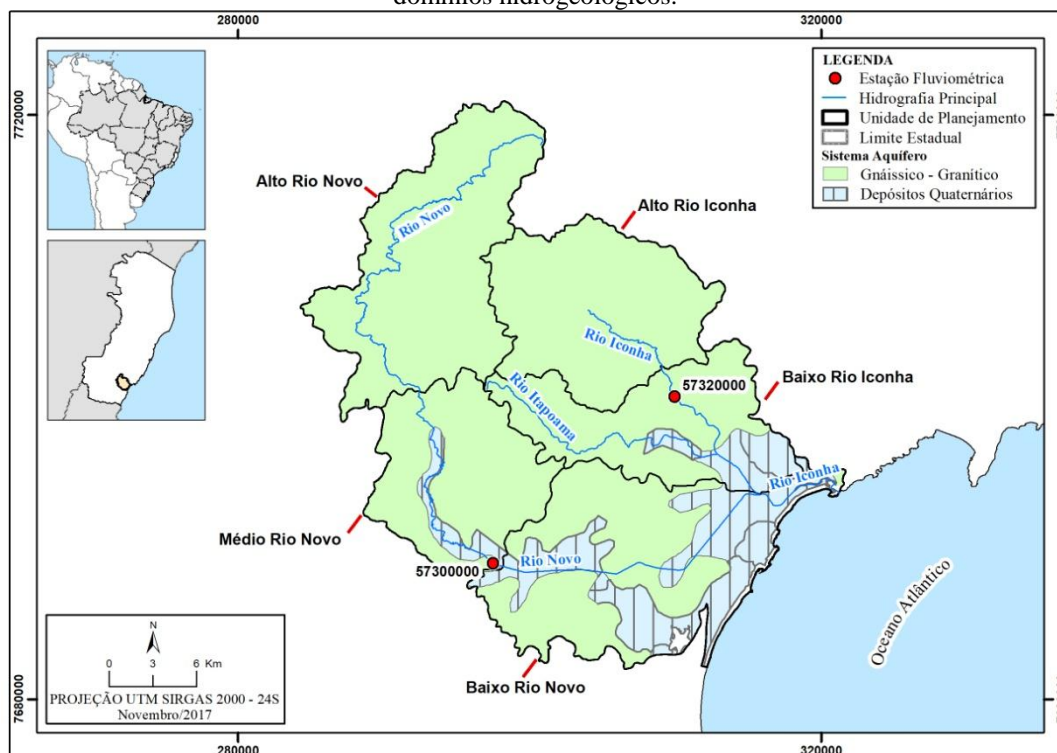
2.1 Área de Estudo

Esse estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Novo, localizada no sul do estado do Espírito Santo (Figura 1), com área de drenagem de 777 km² e que compreende totalmente os municípios de Rio Novo do Sul e Iconha e parcialmente os municípios de Piúma, Vargem Alta e Itapemirim.

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima na região é enquadrado como tropical úmido (Af) e a precipitação anual na bacia varia de 1121 mm.ano⁻¹ a 1742 mm.ano⁻¹, com valor médio de aproximadamente 1.432 mm.ano⁻¹ (IEMA, 2009).

Do ponto de vista hidrogeológico a bacia pode ser dividida em dois domínios. Em sua porção litorânea, e distribuídos ao longo da rede de drenagem, encontram-se os depósitos quaternários, de formação mais recente e caracterizados pelos sedimentos argilo-arenosos de deltas dominados por processos fluviais e aluvionares (CPRM, 2015a). Já nas porções medianas e mais elevadas da bacia surgem os sistemas Gnáissico-Graníticos característicos das regiões montanhosas do centro-sul do Espírito Santo (CPRM, 2015b) (Figura 1).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Novo com destaque para suas unidades de planejamento e os domínios hidrogeológicos.



Como pode ser observado na Figura 1, a bacia hidrográfica está subdividida em cinco Unidades de Planejamento (UPs): Alto Rio Novo; Médio Rio Novo; Baixo Rio Novo; Alto Rio Iconha; e Baixo Rio Iconha. Essas divisões foram estabelecidas no âmbito da elaboração do seu Plano de Recursos Hídricos. Dessa maneira, os resultados desse artigo são expostos em



função das UPs, o que permitirá auxiliar o planejamento sustentável e integrado dos seus recursos hídricos.

2.2 Estações fluviométricas

Para a separação e análise do escoamento de base foram selecionadas as duas estações fluviométricas da Rede Hidrológica Nacional presentes na bacia, com dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA). O início do ano hidrológico foi estabelecido no mês de outubro, com o objetivo de coincidir com o fim do período de estiagem da região. Já a definição do período de análise teve como critério de escolha o intervalo de dados com maior extensão sem falhas, em comum para as duas estações.

No Quadro 1 são apresentadas as estações fluviométricas utilizadas e seus respectivos períodos de análise.

Quadro 1 – Estações fluviométricas selecionadas para a separação do escoamento de base.

Estação	Código ANA	Área de Drenagem (km ²)	Período de Análise	Latitude	Longitude
Pau D'alho	57300000	304	1972-1990	-20,89	-40,95
Iconha - Montante	57320000	148	1972-1990	-20,78	-40,83

2.3 Separação do escoamento de base dos hidrogramas de vazão diária

Uma das formas de se estimar as reservas hídricas subterrâneas renováveis de uma bacia hidrográfica é através da quantificação do escoamento de base (FEITOSA et al., 2008). Com isso, para a quantificação dessas reservas foi utilizada a metodologia proposta por Eckhardt (2005) e adaptada por Collischonne Fan (2013). O método consiste na aplicação de um filtro numérico capaz de separar a parcela do escoamento de base, do escoamento total observado nos hidrogramas de vazões.

A escolha do método baseou-se em sua simplicidade numérica e por necessitar de poucos dados de entrada. Contudo, apesar dessas características, bons resultados têm sido alcançados com sua aplicação (COELHO et al., 2015; ECKHARDT, 2008; MATTIUZI et al., 2016).

Nesse método, o filtro numérico é definido matematicamente pela Equação 1.

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{k}} \cdot b_{i-1} + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{k}}\right) \cdot BFI_{max} \cdot y_i}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{k}} \cdot BFI_{max}} \quad (1)$$

Onde i é um intervalo de tempo qualquer; b_i é o escoamento de base ($m^3.s^{-1}$) no instante i ; BFI_{max} é o máximo percentual de escoamento subterrâneo que o filtro pode calcular (adimensional); Δt é o intervalo de tempo (dias) entre $i-1$ e i ; k é constante de recessão do escoamento superficial (dias); y_i é a vazão total do hidrograma ($m^3.s^{-1}$). Caso a aplicação dessa equação resulte em valores de b_i maiores que y_i , fixa-se o valor de $b_i = y_i$.

O valor de BFI_{max} (Base Flow Index Maximum - Índice Máximo de Escoamento de Base) pode ser calculado por meio da relação de dois valores obtidos da curva de permanência de vazões, a $Q_{90\%}$ e $Q_{50\%}$. A fórmula que expressa o valor de BFI_{max} é representada pela Equação 2.

$$BFI_{max} = 0,8344 \cdot \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0,2146 \quad (2)$$



2.4 Estimativa das reservas exploráveis

Após a aplicação do filtro e a definição do escoamento de base para as estações fluviométricas selecionadas, os valores calculados foram transformados em deflúvio subterrâneo médio anual (Q_m), que representa o volume total de água transferido do aquífero para a rede de drenagem em um ano.

Para a estimativa dos deflúvios subterrâneos médios anuais das UPs foi realizado o cálculo do deflúvio subterrâneo específico de cada estação fluviométrica. Esse parâmetro corresponde à relação entre o deflúvio subterrâneo médio anual e a área de drenagem das respectivas estações, e é expresso segundo a Equação 3.

$$Q_{esp} = \frac{Q_m}{Ad} \times 3,17 \times 10^{-5} \quad (3)$$

Onde Q_{esp} é o deflúvio subterrâneo específico ($L.s^{-1}.km^{-2}$); Q_m é o deflúvio subterrâneo médio anual ($m^3.ano^{-1}$); Ad a área de drenagem da estação fluviométrica (km^2).

Dessa forma, para cada UP foi assumido o deflúvio subterrâneo específico da estação fluviométrica mais próxima de seu exutório. Por fim, a estimativa dos recursos subterrâneos renováveis foi realizada de acordo com a Equação 4.

$$R_r = Q_{esp} \times Ad_{UP} \times 31536 \quad (4)$$

Onde R_r representa os recursos subterrâneos renováveis ($m^3.ano^{-1}$); Q_{esp} é o deflúvio subterrâneo específico ($L.s^{-1}.km^{-2}$); Ad_{UP} é a área de drenagem da UP (km^2).

Tomando como base os valores dos recursos subterrâneos renováveis, foram estimados os recursos exploráveis (associados às reservas de exploração). Como esse conceito é controverso e de difícil determinação (SOPHOCLEOUS, 2000), para esse estudo assumiu-se como recurso explorável a fração de 50% dos recursos renováveis, para tentar garantir um fluxo residual de 50% do escoamento de base. Tal percentual foi considerado, uma vez que a Agência Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo (AGERH) determina como vazão residual mínima 50% da vazão de referência (Q_{90}), e essa, por sua vez, está intimamente ligada ao escoamento de base (GARCIA, 2016).

Para efeitos de estimativa, não foram diferenciadas as reservas subterrâneas oriundas do sistema Granítico-Gnáissico, daquelas oriundas dos depósitos quaternários. Já que, uma vez que o cálculo foi realizado baseado no fluxo de água subterrânea para a rede de drenagem superficial, não foi possível distinguir a contribuição de cada tipo de aquífero, mas sim o total de água proveniente das reservas subterrâneas.

3 Resultados e discussões

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos deflúvios médios subterrâneos e dos deflúvios subterrâneos específicos das estações fluviométricas analisadas, além de suas respectivas constantes de recessão. Por sua vez, na Tabela 2 são apresentados os resultados para as reservas renováveis e exploráveis para cada uma das UPs da bacia hidrográfica do rio Novo.

Tabela 1 – Quantificação dos deflúvios médios nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Novo.

Estação	Código ANA	Área de Drenagem (km^2)	Constante de Recessão (k) (dias)	Deflúvio Médio	
				Subterrâneo ($m^3.ano^{-1}$)	Subterrâneo Específico ($L.s^{-1}.km^{-2}$)
Pau D'alho	57300000	304	119	$1,33 \times 10^8$	13,9



Tabela 1 – Quantificação dos deflúvios médios nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Novo.

Estação	Código ANA	Área de Drenagem (km ²)	Constante de Recessão (k) (dias)	Deflúvio Médio	
				Subterrâneo (m ³ .ano ⁻¹)	Subterrâneo Específico (L.s ⁻¹ .km ⁻²)
Iconha-Montante	55320000	148	79	7,65 x 10 ⁷	16,4

Tabela 2 – Quantificação das reservas hídricas subterrâneas nas UPs da bacia hidrográfica do rio Novo.

UP	Área	Escoamento Subterrâneo Específico (L.s ⁻¹ .km ⁻²)	Reserva Renovável (m ³ .ano ⁻¹)	Reserva Explotável (m ³ .ano ⁻¹)
Alto Rio Novo	184	13,9	8,07 x 10 ⁷	4,04 x 10 ⁷
Médio Rio Novo	120	13,9	5,26 x 10 ⁷	2,63 x 10 ⁷
Baixo Rio Novo	208	13,9	9,10 x 10 ⁷	4,55 x 10 ⁷
Alto Rio Iconha	143	16,4	7,38 x 10 ⁷	3,69 x 10 ⁷
Baixo Rio Iconha	122	16,4	6,29 x 10 ⁷	3,15 x 10 ⁷
Total	777	-	3,61 x 10⁸	1,81 x 10⁸

As reservas subterrâneas, assim determinadas, devem ser consideradas com cautela, devido às limitações e incertezas do método, como a presença de descontinuidades geológicas no terreno, o próprio filtro numérico utilizado, além de outras variáveis. Logo, o objetivo dessa estimativa é determinar uma ordem de grandeza para as reservas subterrâneas explotáveis, no intuito de auxiliar o planejamento racional e sustentável dos recursos hídricos (IRRIGART, 2003).

Dito isso, nota-se que a ordem de grandeza da reserva subterrânea explotável na bacia hidrográfica do rio Novo é de 1,81 x 10⁸ m³ por ano. Em relação às UPs, a que possui a menor reserva explotável é a Médio Rio Novo com 2,63 x 10⁷ m³ por ano, enquanto a UP Baixo Rio Novo, mais próxima à foz da bacia, possui as maiores reservas, na ordem de 4,55 x 10⁷ m³ por ano. Entretanto, de uma forma geral os valores das reservas explotáveis em todas as UPs são muito similares. Tendo em vista o uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas, nota-se a importância de considerá-las de forma efetiva na gestão dos recursos hídricos dessa bacia.

Por fim, há de se considerar que as estimativas realizadas para esse estudo são referentes aos aquíferos livres, aqueles em que as interações com o ciclo hidrológico ocorrem de forma direta, o que garante a reposição dos recursos renováveis em um curto prazo (período de anos). Contudo, não são abordados nessa perspectiva os recursos subterrâneos provenientes dos aquíferos confinados. Esses últimos possuem interação mínima ou nula com a rede de drenagem, sendo o equilíbrio entre a recarga e a descarga natural do aquífero estabelecido ao longo do tempo geológico (FEITOSA *et al.*, 2008).

4 Conclusão

As reservas hídricas subterrâneas explotáveis nas unidades de planejamento da bacia hidrográfica do rio Novo foram calculadas por meio da separação do escoamento de base, através da utilização do Filtro Digital Recursivo de Eckhardt. Pela simplicidade matemática e por necessitar de poucos dados de entrada para a aplicação do modelo, a metodologia se mostrou eficaz, além de apresentar-se como ferramenta útil para o entendimento das interações entre as águas superficiais e subterrâneas e consequentemente para a gestão conjunta e integrada dos recursos hídricos. Como resultado de sua aplicação, estimou-se uma reserva explotável de 1,81 x 10⁸ metros cúbicos por ano na bacia hidrográfica do rio Novo.



Dessa maneira, a ordem de grandeza das reservas renováveis estimadas, além da compreensão dos elementos do ciclo hidrológico sem a dissociação dos mananciais superficiais e subterrâneos, deve ser considerada na gestão dos recursos hídricos dessa região e mostra-se como um dos caminhos para o enfrentamento das crises hídricas que vêm se tornando uma constante no norte capixaba.

5 Referências

BATISTA, J. C. **Superexploração de águas subterrâneas, o caso de Recife**. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015

BRASIL. **Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil

COELHO, G.; PONTES, L. M.; BATISTA, M. L.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais**. Águas Subterrâneas, 29(3), 257-267. 2015

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. **Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter**. Hydrological Processes, v. 27, n. 18, p. 2614–2622, 2013

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo**. Brasília, 2015a

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e Recursos Minerais do Espírito Santo: texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do estado do Espírito Santo**. Brasília, 2015b

ECKHARDT, K. **How to construct recursive digital filters for baseflow separation**. Hydrological Processes, v. 19, n. 2, p. 507–515, 2005

ECKHARDT, K. **A comparison of base flow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods**. Journal of Hydrology, v. 352, n. 1–2, p. 168–173, 2008

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ª. Ed. CPRM, Rio de Janeiro, 812pp. 2008

GARCÍA, D. E. G. **Modelo empírico linear para previsão da disponibilidade hídrica integrada em função da média móvel de precipitação**. 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2016

HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. **Água Subterrânea: Reserva Estratégia ou Emergencial**. In: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (Org). Águas do Brasil: Análises Estratégicas. São Paulo, Instituto de Botânica, 2010



IEMA. Instituto Estadual de Meio Ambiente. **Projeto de gerenciamento da poluição costeira e de águas do estado do espírito santo: estudo de regionalização de vazões e metodologia para determinação de vazões insignificantes para as 12 bacias hidrográficas do Estado do Espírito Santo.** Relatório 05-A. 2009

IRRIGART. **Relatório de Situação da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Jundiá e Capivari. Situação dos Recursos Hídricos 2002/2003 (Caracterização dos Recursos Hídricos).** 2003

MATTIUZI, C. D. P.; KIRCHHEIM, R.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. **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), 285-300. 2016

MOURÃO, M.; LIMA, J.; MONTEIRO, E. **Os sistemas aquíferos do norte do estado do Espírito Santo: potencial de exploração e diagnóstico atual de aproveitamento.** Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais...2002

REJANI, R.; JHA, M. K.; PANDA, S. N.; MULL, R. **Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India.** Water Resources Management, 22(1), 23. 2008

SOPHOCLEOUS, M. **Managing water resources systems: why “safe yield” is not sustainable.** Groundwater, v. 35, n. 4, p. 456, 1997

SOPHOCLEOUS, M. **From safe yield to sustainable development of water resources - the Kansas experience.** Journal of Hydrology, v. 235, n. 1–2, p. 27–43, 2000

USGS. United States Geological Survey. **Streamflow Depletion by Wells - Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow.** 2012