

# INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO: CONTRIBUIÇÃO DA DESCARGA DOS AQUÍFEROS NAS VAZÕES DOS RIOS CORUMBATAÍ E ATIBAIA

Lucas Vituri Santarosa<sup>1,2</sup>, Didier Gastmans<sup>2</sup>, Sebastian Balbin Betancur<sup>1,2</sup>, Ludmila Vianna Batista<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – UNESP/IGCE. Rio Claro (SP). [lucasviturisantarosa@gmail.com](mailto:lucasviturisantarosa@gmail.com); [sebastian.balbin.betancur@gmail.com](mailto:sebastian.balbin.betancur@gmail.com); [ludvbatista@yahoo.com.br](mailto:ludvbatista@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Centro de Estudos Ambientais – CEA/UNESP. Rio Claro (SP). [gastmans@rc.unesp.br](mailto:gastmans@rc.unesp.br)

**Palavras-Chave:** Interação Rio-Aquífero; Fluxo de base; Águas Subterrâneas

## INTRODUÇÃO

Muitas atividades humanas e ecológicas são dependentes da interação entre rios e aquíferos, e o entendimento do comportamento dessas variáveis no ciclo hidrológico pode ajudar na compreensão do armazenamento da água subterrânea e no regime do fluxo de base. (DAMS et al., 2012; SÁNCHEZ-MURILLO et al., 2015).

O fluxo de base pode ser definido como a parcela da vazão dos rios que é alimentada pelas descargas de água subterrânea e por fluxos provenientes da zona não saturada diretamente no canal do curso d'água (TALLAKSEN, 1995), sendo um componente importante do sistema subterrâneo do ciclo hidrológico, pois reflete a conexão entre a água subterrânea, o fluxo dos rios e a o escoamento proporcionado pela precipitação (HALL, 1968; ZHANG et al., 2017)

Mudanças no regime de fluxo de base podem interferir significativamente na qualidade e quantidade de água disponível. Caracterizar esse componente do ciclo hidrológico é importante para direcionar a gestão dos recursos hídricos, com a alocação de recursos e priorização da conservação da água em áreas com potencial para estiagens prolongadas ou com crescimento da demanda (SÁNCHEZ-MURILLO et al., 2015).

O fluxo de base apresenta diferentes comportamentos em determinadas condições climáticas, geológicas e geomorfologia. As oscilações sazonais ou mudanças nas características climáticas podem influenciar nas taxas de recargas dos aquíferos alterando os regimes de descarga (KIM; JACKSON, 2012). As condições hidrogeológicas podem influenciar diretamente no comportamento das taxas de recarga, armazenamento e descarga de água subterrânea para os rios (KNISEL, 1963; VOGEL; KROLL, 1992; ECKHARDT, 2005; BLOOMFIELD et al., 2009; SÁNCHEZ-MURILLO et al., 2015).

A análise da vazão dos rios mais utilizada está baseada na análise da curva de permanência ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ) que, nos períodos de estiagem, pode ser compreendido como descarga dos aquíferos que mantem o fluxo basal (NATHAN; MCMAHON, 1990; BRANDES et al., 2005). Outras formas de analisar a relação rio-aquífero é feita por meio de técnicas de separação de hidrogramas como, por exemplo, a utilização de filtros digitais (ECKHARDT, 2005, 2008; COLLISCHONN; FAN, 2013; ZHANG et al., 2017) ou pela análise de recessão (BRUTSAERT; NIEBER, 1977; TALLAKSEN, 1995).

Com o intuito de compreender o comportamento do fluxo de base em rios da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (UGRHI 5 - PCJ), o presente estudo, apresenta uma análise hidrológica baseada na interpretação da recessão, como forma de se avaliar a influência das condições hidrogeológicas sobre a descarga de águas subterrâneas nos rios Corumbataí e Atibaia.

## MATERIAL E MÉTODOS

A UGRHI 5 – PCJ apresenta um complexo quadro hidroestratigráfico, com ocorrência de afloramentos das unidades aquíferas: Sistemas Aquíferos Bauru (SAB), Guarani (SAG), Tubarão (SAT) e Pré-Cambriano (SPC) e o aquíclode Passa Dois. Foram selecionadas estações fluviométricas e pluviométricas dentro das

bacias hidrográficas do rio Corumbataí e o rio Atibaia. O rio Corumbataí drena áreas de afloramento do SAG e do aquíclude Passa Dois e o rio Atibaia sobre o SPC (Figura 1).

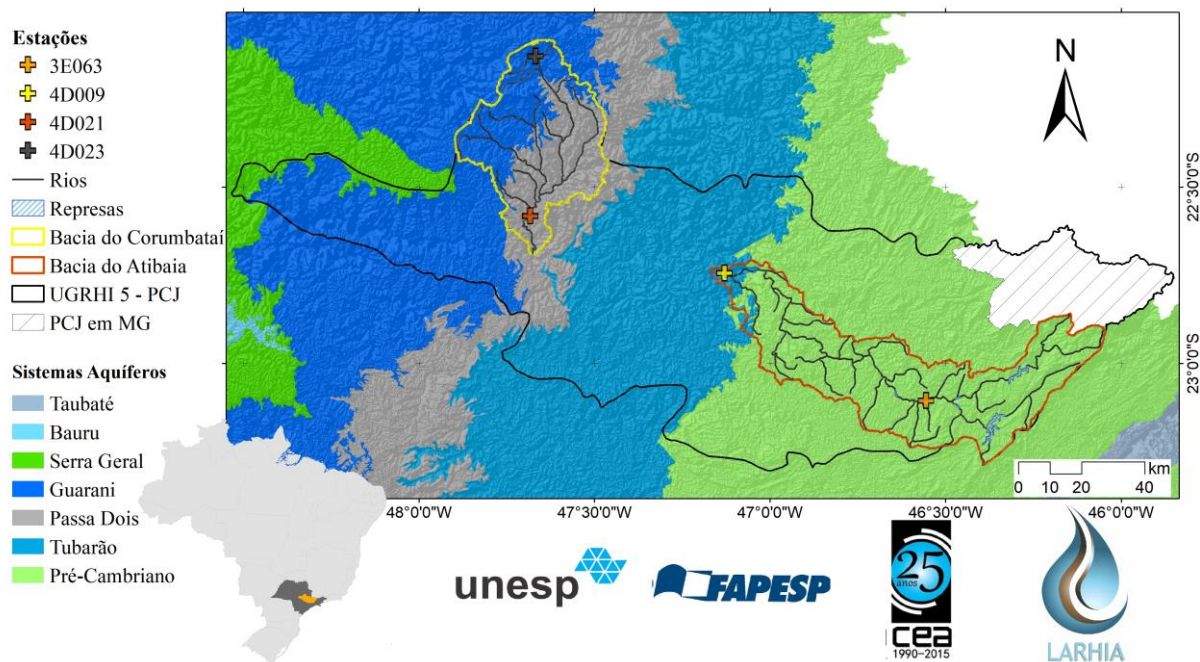


Figura 1. Localização das bacias hidrográficas, estações fluviométricas e sistemas aquíferos

Os dados fluviométricos (FLU) e pluviométricos (PLU) utilizados foram obtidas junto ao banco de dado do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Constituíram a análise duas estações em cada um dos rios, uma mais próxima da cabeceira e outra do exutório da bacia e as estações pluviométricas mais próximas das fluviométricas (Tabela 1).

Tabela 1. Informações sobre as estações pluviométricas e fluviométricas

Estação	Área de Contribuição (km <sup>2</sup> )	Bacia	Série de dados
FLU - 4D023	59	Corumbataí	1989-2016
FLU - 4D021	1581	Corumbataí	1972-2016
FLU - 3E063	1143	Atibaia	2002-2016
FLU - 4D009	2738	Atibaia	1947-2016
PLU - 4D035	---	Corumbataí	1937-2016
PLU - 4D012	---	Corumbataí	1936-2016
PLU - 4D044	---	Atibaia	1941-2016
PLU - 3D099	---	Atibaia	1946-2016

O coeficiente de armazenamento ( $k$ ) em dias, foi calculada pelo o método de Brutsaert e Nieber (1977), que consiste em plotar o declínio da descarga ( $-dQ/dt$ ) [ $L T^{-2}$ ] contra a descarga média ( $Q$ ) [ $L T^{-3}$ ] em escala logarítmica. A distribuição dos pontos reproduz a dependência do fluxo de base em relação ao comportamento hidrodinâmico do aquífero. Para determinar os valores de  $k$  foram utilizados quatro métodos de ajuste das retas (intercepto  $a$  e inclinação  $b$ ): *Lower Envelope* (LE) com inclinação  $b=1$  que representa a condição de descarga linear do aquífero; *Organic Correlation* (OC); *Ordinary Least Squares* (OLS); e *Inverse Least Squares* (ILS). Os métodos OC, OLS e ILS são regressões para todos os dados criteriosamente selecionados, os detalhes desses métodos estão descritos em Sanchez-Murillo et al. (2015).

O valor médio do coeficiente de armazenamento ( $k_{med}$ ) foi utilizado para calcular o coeficiente de recessão ( $r$ ) que junto com o índice do fluxo de base (BFI) foi utilizado para determinar o fluxo de base segundo o método de Eckhardt (2005) adaptado por Collischonn e Fan (2013), substituindo os valores pré-definidos pela equação do BFI baseado nas vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{50}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de  $k_{med}$  são apresentados na Tabela 2, assim como os valores de vazão e fluxo de base médios, a relação percentual entre o fluxo de base a vazão, as vazões de permanência ( $Q_{50}$  e  $Q_{90}$ ) e o BFI. A Figura 2 apresenta um exemplo do gráfico com as retas ajustadas da estação fluviométrica 4D-009, os valores de  $k$  foram utilizados para aplicação do filtro digital e realizar a estimativa do fluxo de base para cada estação. A Figura 3 representa a vazão total, fluxo de base e precipitação para os meses de novembro e dezembro de 2016 como demonstração dos resultados gerados pelo filtro digital para a estação 4D-009.

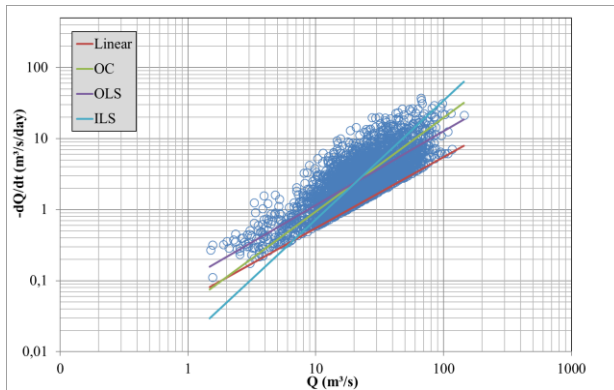


Figura 2. Retas de regressão obtidas para a estação fluviométrica 4D-009. (Vermelho) Linear = *Lower Envelope* (LE); (Verde) *Organic Correlation* (OC); (Roxo) *Ordinary Least Squares* (OLS); e (Azul) *Inverse Least Squares* (ILS)

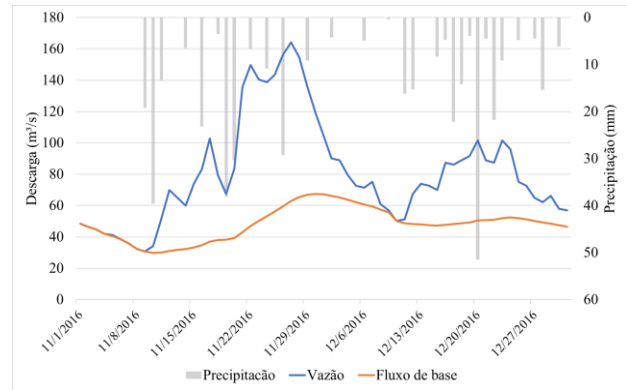


Figura 3. Fluxo de base pelo método de Eckhardt (2005) para os meses de novembro e dezembro de 2016 para a estação fluviométrica 4D-009 no rio Atibaia.

Tabela 2. Resultados de  $k$  médio ( $k_{med}$ ), BFI, vazão média ( $VZ_{med}$ ), vazão de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{50}$ ), fluxo de base médio ( $FB_{med}$ ) e relação percentual do fluxo de base e vazão do rio ( $FB/VZ$ ).

Estação	$k_{med}$ (dias)	$BFI_{max}$	$VZ_{med}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{90}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{50}$ ( $m^3/s$ )	$FB_{med}$ ( $m^3/s$ )	$FB/VZ$ (%)
4D-023	$11,5 \pm 3,0$	0,79	1,1	0,7	0,94	0,9	82%
4D-021	$13,9 \pm 4,4$	0,60	24,9	7,5	14,4	15,2	59%
3E-063	$18,8 \pm 7,2$	0,65	8,9	4,0	6,9	5,9	65%
4D-009	$16,7 \pm 5,3$	0,57	33,6	12,3	25,8	20,1	60%

Os resultados indicam contribuições distintas do fluxo de base, devido a diferença nas áreas de contribuição e posição relativa das estações fluviométricas dentro das bacias. As estações 4D-023 e 3E-063 por estarem nas cabeceiras dos seus respectivos rios aprestam os maiores valores de BFI e da porcentagem do fluxo de base em relação a vazão, o que permite concluir que nas porções elevadas das bacias o armazenamento de água em subsuperfície é fundamental na manutenção das vazões. Nota-se também nestas áreas maior proximidades entre a vazão do fluxo de base e os valores de permanência ( $Q_{90}$ ), reforçando a relevância da descarga da água subterrânea nestas áreas.

Os valores de  $k$  mostram que o comportamento hidrodinâmico nos diferentes aquíferos é relevante no tempo de armazenamento da água nos aquíferos. No rio Corumbataí a área sobre o SAG tem descargas mais rápidas com valores elevados da relação da vazão com o fluxo de base, 82% da vazão na cabeceira é proveniente do fluxo de base e no exutório 59%, este valor pode estar associado com a localização da estação fluviométrica sobre o aquíclode Passa Dois. No rio Atibaia o tempo de permanência é um pouco maior e a contribuição do fluxo de base é um pouco menor que no SAG, 65% na cabeceira e 60% no exutório. Este comportamento poder ser relaciona à vazão específica do SAG de 1 a 2  $m^3/h/m$  e do SPC com valores  $< 0,5$  a 1  $m^3/h/m$  (SÃO PAULO, 2013).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados corroboram com o entendimento da relação rio-aquífero em duas bacias importantes da UGRHI 5 – PCJ. São dados fundamentais para a gestão dos recursos hídricos, favorece o entendimento do ciclo hidrológico na região, pois demonstra a relação entre a água subterrânea, o fluxo dos rios e o escoamento proporcionado pela precipitação. Informações que podem ser analisadas e incorporadas no planejamento do uso dos recursos hídricos.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de estudos ao primeiro autor (Processo nº 2017/13576-9).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLOOMFIELD, J. P.; ALLEN, D. J.; GRIFFITHS, K. J. Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 1–2, p. 164–176, 2009. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.025>>. .
- BRANDES, D.; HOFFMANN, J. G.; MANGARILLO, J. T. Base Flow Recession Rates, Low Flows, and Hydrologic Features of Small Watersheds in Pennsylvania, Usa. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1177–1186, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03792.x>>. .
- BRUTSAERT, W.; NIEBER, J. L. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. **Water Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 637–643, 1977.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt’s digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614–2622, 2013. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.9391>>. Acesso em: 9/3/2018.
- DAMS, J.; SALVADORE, E.; VAN DAELE, T.; et al. Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 5, p. 1517–1531, 2012.
- 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 baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 1–2, p. 168–173, 2008.
- HALL, F. R. Base-Flow Recessions—A Review. **Water Resources Research**, v. 4, n. 5, p. 973–983, 1968.
- KIM, J. H.; JACKSON, R. B. A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 1, p. 0, 2012. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/vzj/abstracts/11/1/vzj2011.0021RA>>. .
- KNISEL JR., W. G. Baseflow Recession Analysis for Comparison of Drainage Basins and Geology. **J. Geophys. Res.**, v. 68, n. 12, p. 3649–3653, 1963. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/JZ068i012p03649>>. .
- NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v. 26, n. 7, p. 1465–1473, 1990.
- SÁNCHEZ-MURILLO, R.; BROOKS, E. S.; ELLIOT, W. J.; GAZEL, E.; BOLL, J. Baseflow recession analysis in the inland Pacific Northwest of the United States. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 2, p. 287–303, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10040-014-1191-4>>. .
- SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Universidade Estadual Paulista. **Águas subterrâneas no Estado de São Paulo: Diretrizes de Utilização e Proteção**. Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geociências e Ciências Exatas. Laboratório de Estudo de Bacias. São Paulo: DAEE/LEBAC, 2013
- TALLAKSEN, L. M. A review of baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, v. 165, n. 1–4, p. 349–370, 1995. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002216949402540R>>. Acesso em: 9/3/2018.
- VOGEL, R. M.; KROLL, C. N. Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. **Water Resources Research**, v. 28, n. 9, p. 2451–2458, 1992. Wiley-Blackwell. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/92WR01007>>. Acesso em: 3/5/2018.
- ZHANG, J.; ZHANG, Y.; SONG, J.; CHENG, L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 252–263, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.004>>.