



## ANÁLISE HIDROLÓGICA DE SÉRIES HISTÓRICAS DA BACIA DO RIO GRANDE (BA): CONTRIBUIÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA

### *HYDROLOGICAL ANALYSIS OF RIO GRANDE BASIN (BAHIA STATE) TIME SERIES: CONTRIBUTION OF URUCUIA AQUIFER SYSTEM*

Roger Dias Gonçalves<sup>1</sup>; Bruno Zanon Engelbrecht<sup>1</sup>; Hung Kiang Chang<sup>1</sup>

Artigo recebido em: 06/10/2015 e aceito para publicação em: 09/06/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i2.28514>

**Resumo:** A análise da variação do escoamento subterrâneo em conjunto com a análise pluviométrica ao longo de uma série histórica permite inferir impactos causados pelas variações climáticas e exploração de água subterrânea em um aquífero. Dada a importância do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), que constitui um manancial estratégico na região oeste da Bahia, procedeu-se ao estudo da influência desse aquífero na vazão da bacia hidrográfica do rio Grande, localizada à margem esquerda do rio São Francisco. Para tanto, foram analisadas as séries históricas de vazão e pluviometria no período de 1977 a 2013. Os métodos empregados para separação de escoamentos superficial e subterrâneo em hidrogramas foram Intervalo Fixo, Intervalo Móvel, Mínimos Locais e Médias Móveis. Os resultados obtidos revelam que o fluxo de base corresponde à principal componente da vazão dos rios que cortam o SAU, contribuindo com 81,75% a 93,06% da vazão total. A correlação entre as tendências da pluviometria e do fluxo de base mostra que a diminuição do escoamento subterrâneo tem relação com a queda nas taxas de precipitação. Entretanto, a taxa de diminuição do fluxo de base (0,75% a 3,04% ao ano) é mais acentuada do que a queda da pluviometria (0,07% a 0,88% ao ano), evidenciando assim que outros fatores, como superexploração do aquífero, são responsáveis pela queda do fluxo de base do rio Grande ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Fluxo de base. Separação de hidrogramas. Métodos de filtros digitais.

**Abstract:** The analysis of baseflow variation combined with the precipitation in a time series allows for inferences about the effects of climate change and groundwater exploitation. Considering the importance of Urucuia Aquifer System, which represents a strategic water source in Western Bahia, Northeastern Brazil, we proceeded to study the influence of this aquifer in the flow rate of the Rio Grande basin, located on the left bank of the São Francisco river. We used time series of flow rates and precipitation data from 1977 to 2013 and the methods of hydrographs separation were fixed range, sliding interval, local minimum and smoothed minima. The results demonstrate that the baseflow corresponds to the main component of the rivers flow rate contributing with 81.75% to 93.06%. The correlation between precipitation and baseflow trends shows that the baseflow decreasing is related to the fall of precipitation rates. However, the rate of baseflow decreasing (0.75% a 3.04% per year) is severer than the rate of precipitation (0.07% a 0.88% per year), thus indicating that other factors such as over-exploitation of the aquifer are responsible for the fall of the Rio Grande baseflow over time.

**Keywords:** Baseflow. Hydrographs separation. Digital filter methods.

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) constitui um manancial estratégico no Oeste da Bahia, pois, além de atender à crescente demanda de água para o desenvolvimento econômico da região, contribui significativamente para o fluxo de base dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco, prin-

cipalmente nos períodos de estiagem.

O rio Grande localiza-se na porção média da bacia hidrográfica do rio São Francisco, sendo seu principal afluente no estado da Bahia. A bacia hidrográfica do rio Grande possui um regime fortemente influenciado pela água subterrânea e é a segunda em importância para a manutenção da vazão do rio São Francisco.

<sup>1</sup> LEBAC (Laboratório de Estudos de Bacias) / UNESP Rio Claro ([rdgon@hotmail.com](mailto:rdgon@hotmail.com), [brunoz@rc.unesp.br](mailto:brunoz@rc.unesp.br), [chang@rc.unesp.br](mailto:chang@rc.unesp.br))

A curva de recessão em um hidrograma exibe um comportamento que é atribuído à relação entre a estrutura do aquífero e a descarga de água subterrânea para o canal (THOMAS *et al.*, 2015). Recentemente, elevada atenção está sendo dada para a descarga de águas subterrâneas para os cursos d'água, quantitativamente (FAMIGLIETTI e RODELL, 2013) e qualitativamente (SCHIRMER *et al.*, 2012).

Muitos estudos empregam a análise de hidrogramas para caracterizar o comportamento das águas subterrâneas e superficiais e suas relações com diversos outros parâmetros presentes na bacia hidrográfica, como, por exemplo, o efeito da evapotranspiração no rebaixamento do fluxo de base (SZILAGYI *et al.*, 2007; SHAW *et al.*, 2013) e a influência da geomorfologia na bacia hidrográfica (BISWAL e MARANI, 2010; BISWAL e NAGESH KUMAR, 2013, 2014).

Para uma compreensão mais aprofundada da contribuição da água subterrânea no fluxo dos rios, são acoplados às análises de hidrogramas, softwares de simulação hidrológica e de fluxo de águas subterrâneas (LAROQUE *et al.*, 2010). Para uma análise mais completa da adequabilidade do método de separação de hidrograma em relação à bacia a ser estudada, são empregados e comparados diferentes metodologias de análises de hidrogramas (GONZALES *et al.*, 2009; ECKHARDT, 2008).

Compreender a contribuição da água subterrânea para as drenagens é fundamental na gestão de águas. A análise de hidrogramas de vazões, especificamente para separar e interpretar o escoamento de base, é uma estratégia bem estabelecida na compreensão da magnitude e da dinâmica da água subterrânea.

Historicamente, águas subterrâneas e superficiais têm sido gerenciadas como recursos isolados. Há, porém, um reconhecimento

crescente por parte dos gestores de que a vazão dos rios é composta por uma parcela de água subterrânea dos aquíferos subjacentes, influenciando de maneira significativa na quantidade e qualidade das águas dos rios.

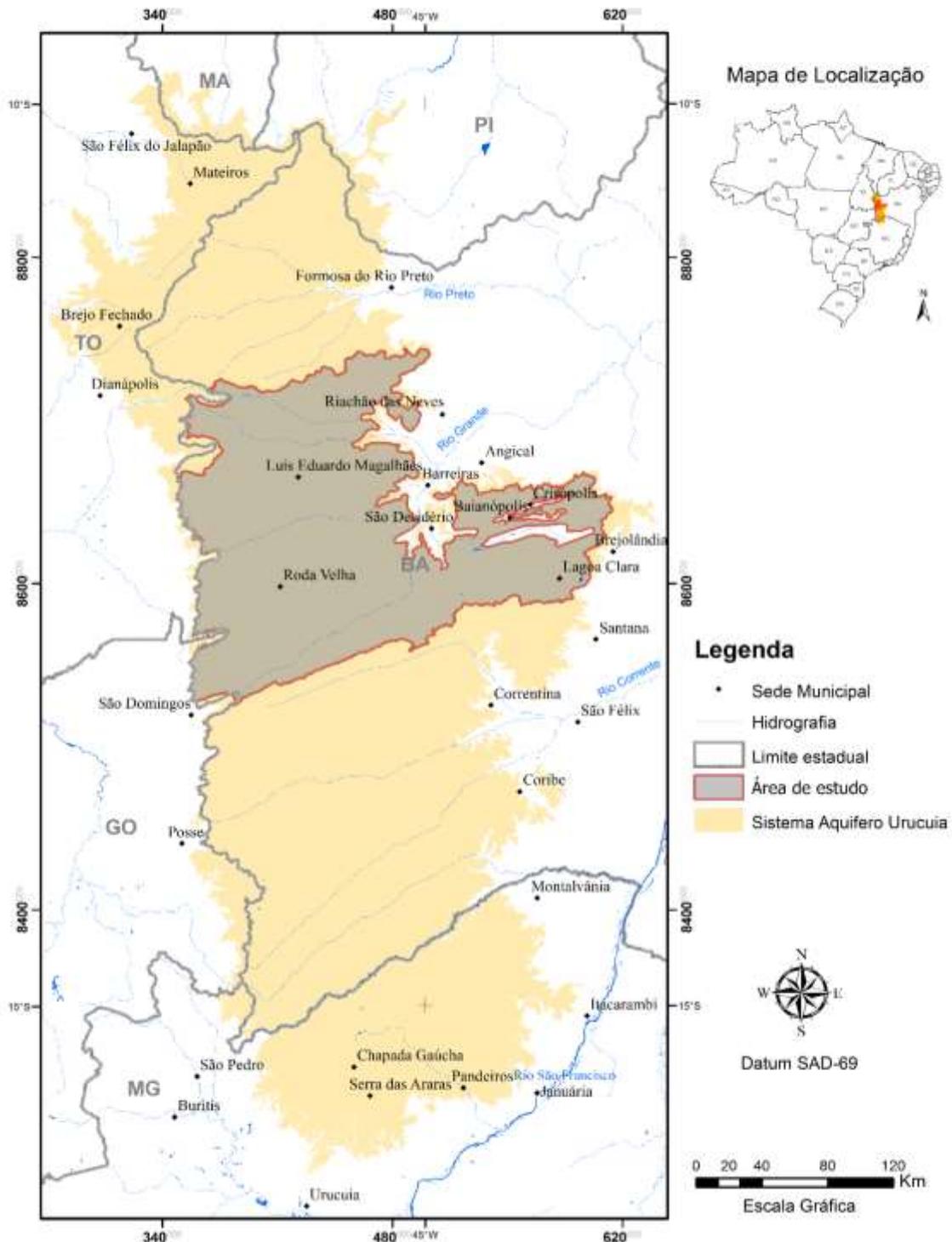
A análise das entradas de água subterrânea em canais de drenagem é fundamental quando se trata de questões como a confiabilidade do abastecimento de água, comércio e distribuição de água e de impactos de contaminação (BRODIE e HOSTETLER, 2005).

A análise e compreensão da variação temporal do escoamento subterrâneo permite realizar inferências a respeito de ciclos hidrológicos naturais, variações climáticas e efeitos da exploração de água subterrânea. No âmbito da modelagem hidrogeológica, a quantificação do volume do escoamento subterrâneo fornece um importante parâmetro para a calibração do modelo.

Dessa maneira, este trabalho teve como objetivo principal analisar a variação temporal do fluxo de base do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) na bacia do rio Grande, durante o período de 1977 a 2013, com vistas a estimar a contribuição do SAU para a manutenção da vazão dos rios. Como base metodológica, analisou-se a correlação dos valores obtidos de fluxo de base com os dados de precipitação e a comparação entre os diferentes métodos de separação de hidrogramas.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na bacia hidrográfica do rio Grande, no oeste do estado da Bahia, entre as latitudes 10° 50' e 13° 00' Sul e longitudes 45° 25' e 45° 30' Oeste, integrante da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Constitui uma sub-bacia hidrogeológica do Sistema Aquífero Urucuia (Figura 1).



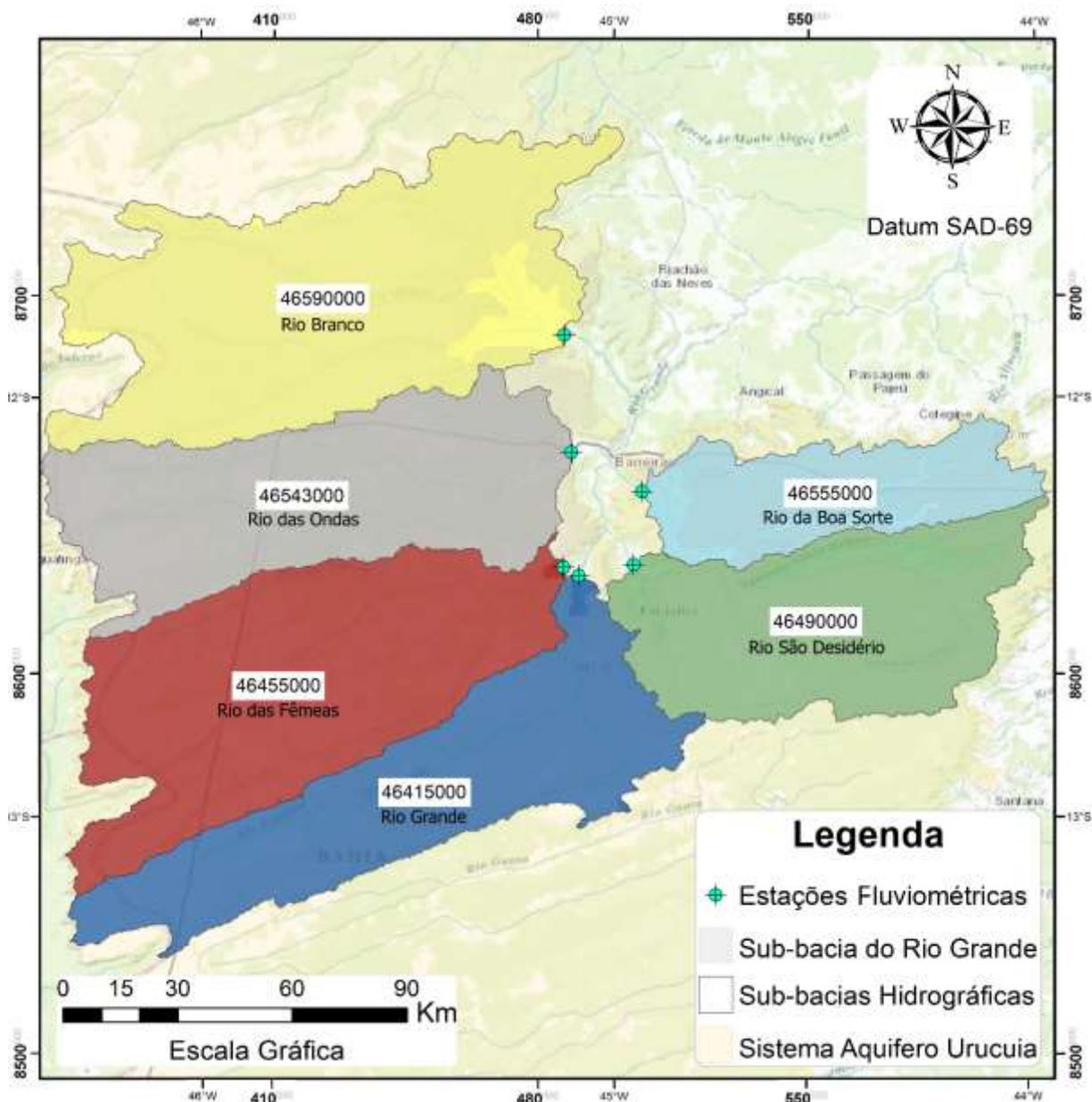
**Figura 1** – Mapa regional de ocorrência do SAU na sub-bacia Urucuia e localização da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Grande

**Figure 1** – Regional occurrence of UAS in the Urucuia sub-basin and the studied area in rio Grande basin

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, a porção da bacia hidrográfica do rio Grande situada sobre o

SAU foi dividida em seis sub-bacias hidrográficas, delimitadas a partir da área de drenagem das estações fluviométricas analisadas (Figura 2).



**Figura 2** – Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir das estações fluviométricas  
**Figure 2** – Sub-basins defined from gauged stations

### 3.1 Obtenção dos dados

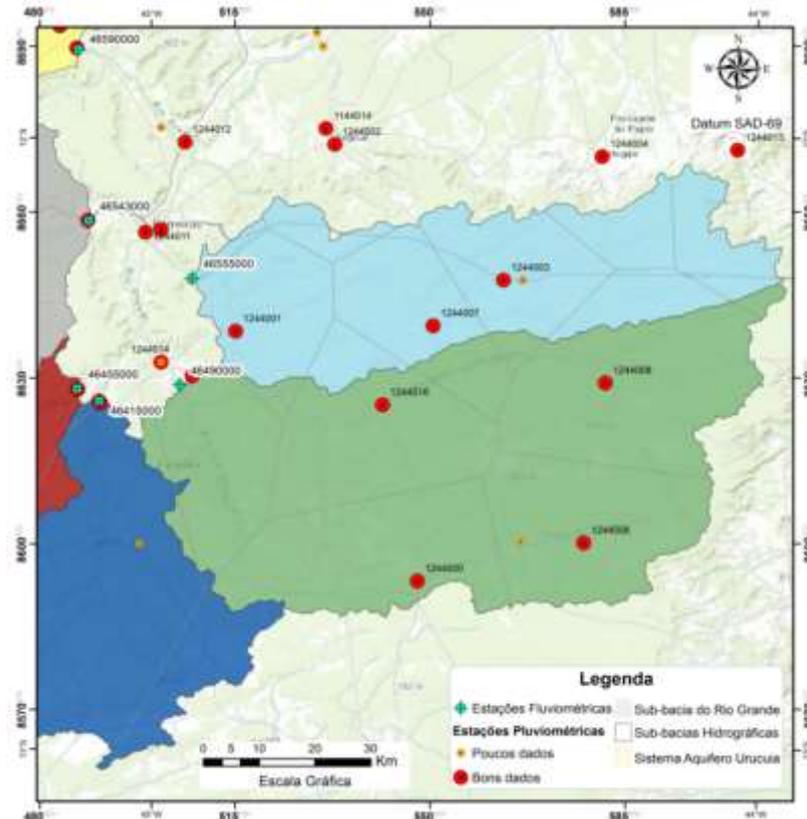
A base de dados de séries históricas das estações fluviométricas e pluviométricas foram obtidas no HidroWeb, banco de dados *online* da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011a).

Para seleção das estações fluviométricas buscou-se aquelas localizadas nos rios que cortam o SAU e próximas aos limites do aquífero, com a finalidade de analisar e quantificar o fluxo de base do SAU, da maneira mais fidedigna possível, e minimizar a influência de outras unidades aquíferas. Dentre as estações

selecionadas, apenas aquelas que apresentam dados consistidos de maneira contínua foram mantidas. As seis estações fluviométricas selecionadas foram: (1) 46590000, (2) 46543000, (3) 46455000, (4) 46415000, (5) 46490000, (6) 46555000. A partir das estações fluviométricas, utilizou-se imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), obtidas no site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) com resolução de 90 m, para delimitar, por meio do *software* ArcGIS, as seis sub-bacias hidrográficas mensuradas por cada estação fluviométrica.

Determinadas as áreas de drenagem das estações fluviométricas, selecionou-se 53 estações pluviométricas com influência em cada sub-bacia. A influência exercida por cada

estação pluviométrica foi ponderada a partir do método de Thiessen (Figura 3), para cada sub-bacia.



**Figura 3** – Polígonos de Thiessen para cálculo da área de influência das estações pluviométricas  
**Figure 3** – Thiessen Polygons to calculate the influenced areas of rainfall gauge stations

O software SEPHidro 2.0, desenvolvido em plataforma Office por Miranda (2012), é compatível com a base de dados nacionais obtida no HidroWeb (ANA, 2011b), e disponibiliza uma ferramenta para a verificação dos períodos com falhas nos dados de vazão. Assim, o período de tempo selecionado (1977 a 2013), definido durante o pré-processamento dos dados, é aquele que apresenta a menor quantidade de falhas nos dados.

### 3.2 Métodos de separação dos escoamentos superficial e subterrâneo

A estimativa de recarga do aquífero é comumente feita pela análise de hidrogramas, cujos componentes são os escoamentos superficial e subterrâneo. Diversos métodos são propostos para separação dos escoamentos superficial e subterrâneo; entre os mais comuns destacam-se os métodos por traçadores químicos

e/ou isotópicos, aproximação gráfica e utilização de filtros digitais.

O método de separação por análise gráfica, devido à sua praticidade, é o mais utilizado. É aplicado de maneira manual, focando nos pontos de inflexão do hidrograma e ajustando curvas para melhor representar o comportamento das águas superficiais e subterrâneas. Esse método apresenta subjetividade implícita à metodologia manual, além do grande consumo de tempo para realizar a análise de séries históricas.

O método por traçadores químicos e isotópicos apresenta bons resultados e pode ser utilizado na calibração de outros métodos de separação (GONZALES *et al.*, 2009); entretanto, apresenta altos custos, pouca praticidade e análise histórica limitada.

O método de filtros digitais, aqui utilizado, foi desenvolvido por Pettyjonh e Henning (1979); apresenta a vantagem de ser pa-

dronizado e sistemático, possibilitando a criação de *softwares* computacionais para acelerar a rotina de cálculos e evitar inconsistências inerentes ao método manual (SLOTO e CROUSE, 1996). Os filtros digitais baseiam-se em equações matemáticas que realizam a análise gráfica do hidrograma a partir de um intervalo de tempo pré-definido, obtendo-se os pontos de menor vazão em cada intervalo; a curva do fluxo de base é dada pela união entre esses pontos. Pettyjohn e Henning (1979) estabeleceram que o intervalo de tempo para a análise do hidrograma é proporcional ao tempo de recessão (N) (Figura 4), em que N representa o tempo, em dias, até que cesse a contribuição do escoamento superficial e a vazão seja mantida apenas pela componente do escoamento de base. O período de recessão é calculado pela fórmula empírica (Equação 1) proposta por Linsley *et al.* (1975):

$$N = 0,827 * A^{0.2} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que: N é o período de recessão, em dias e A é a área da bacia, em Km<sup>2</sup>.

O intervalo de tempo analisado no hidrograma é de 2N\*, que corresponde ao número inteiro mais próximo ao dobro de N (PETTYJONH e HENNING, 1979).

Diversos *softwares* são utilizados na aplicação dos filtros digitais para a separação dos escoamentos superficial e subterrâneo em hidrogramas; um dos mais difundidos é o Hysep da USGS (SLOTO e CROUSE, 1996), com entrada de dados compatível com a base de dados hidrológicos norte-americanos. No Brasil, o *software* SEPHidro 2.0, desenvolvido em plataforma Office/Excel por Miranda (2012), é compatível com a base de dados nacionais obtida no HidroWeb (ANA, 2011b).

O SEPHidro 2.0 conta com quatro métodos de separação de hidrograma: Intervalo Fixo (IF), Intervalos Móveis (IM), Mínimos Locais (ML) e Médias Móveis (MM). Os três primeiros métodos foram desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979) e correspondem aos métodos consolidados na separação automática de hidrograma, amplamente utilizados em trabalhos hidrológicos a partir do *software* Hysep. O método de médias móveis (INSTI-

TUTE OF HYDROLOGY, 1980) é utilizado principalmente na análise de diversas estações fluviométricas e bacias de grandes dimensões.

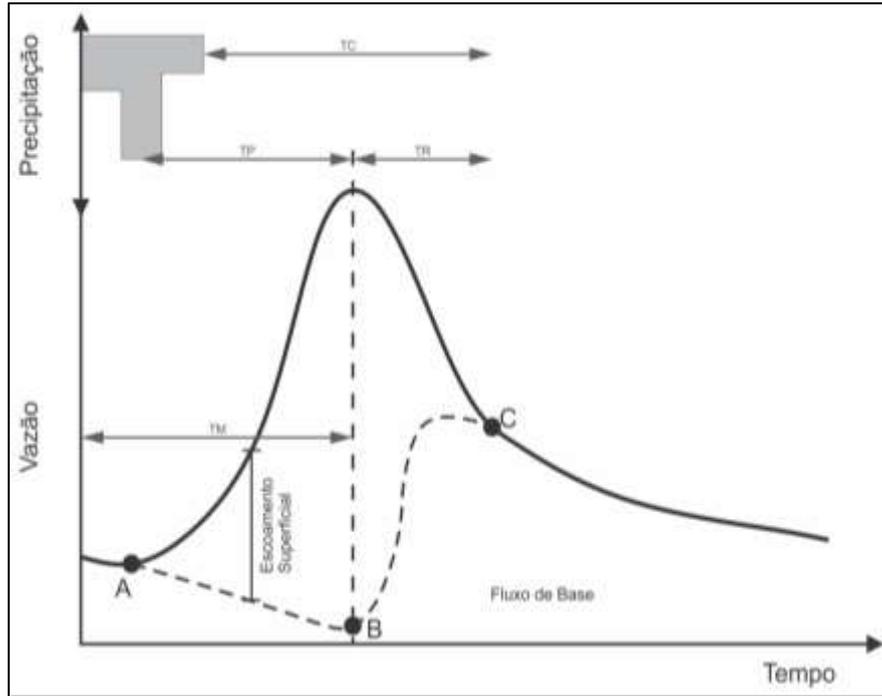
**Intervalo fixo (IF):** A separação do hidrograma pelo método do intervalo fixo consiste em assumir o menor valor de vazão observado no período 2N\* em todo o intervalo 2N\* (Figura 5a). Esse método de separação consiste na movimentação horizontal de uma barra de intervalo 2N\*, contemplando todos os dias do hidrograma, e em sua movimentação vertical até atingir a curva do hidrograma, atribuindo-se esse valor por todo o intervalo 2N\*. A quantidade de análises realizadas para a separação de um hidrograma é expressa pela Equação (2):

$$K = P/2N^* \quad \text{Eq. (2)}$$

em que: K é o número de intervalos analisados, P é o período de dados do hidrograma analisado e 2N\* é o período analisado obtido a partir da Equação (1).

**Intervalo móvel (IM):** O método de separação de intervalo móvel assume que uma barra de intervalo 2N\* seja movimentada para cima até que atinja a curva do hidrograma; este valor é então atribuído à mediana do intervalo. A análise é realizada ponto a ponto, movendo-se o intervalo 2N\* dia a dia, com sobreposição entre os intervalos. Os valores obtidos em cada ponto são conectados, definindo o escoamento de base e o escoamento superficial (Figura 5b).

**Mínimos locais (ML):** O método de separação por mínimos locais verifica se o dia D(i), que representa a mediana do intervalo 2N\*, apresenta a menor vazão observada ao longo do intervalo 2N\*. Caso seja confirmado, o valor é atribuído ao ponto; caso contrário, o valor não é considerado. O intervalo 2N\* é movimentado dia a dia, analisando todo o hidrograma. Ao fim, une-se uma reta a todos os pontos de mínimos locais, separando os componentes escoamento superficial e fluxo de base (Figura 5c).



**Figura 4** – Hidrograma tipo em que: TC – tempo de concentração da bacia, TP – tempo de pico, TM – tempo de ascensão, TR (N) – tempo de recessão (Adaptado de Tucci, 2009)

**Figure 4** – Hydrograph: TC – concentration time, TP – peak time, TM – rise time, TR (N) – recession time

**Médias móveis (MM):** O método de médias móveis consiste no cálculo da vazão média do ponto mediano do intervalo  $2N^*$ . Esse procedimento é repetido ponto a ponto, dia a dia; os valores médios são unidos por uma curva que separa os componentes fluxo de base e escoamento superficial. Esse método é normalmente empregado na suavização do hidrograma e na representação de tendências e ciclos (Figura 5d).

### 3.2 Quantificação dos escoamentos

Após a separação das lâminas de escoamento superficial e subterrâneo, o *software* SEPHidro 2.0 realiza a quantificação do volume de fluxo subterrâneo e de escoamento de base. A quantificação dos volumes é pautada pelas equações abaixo (MIRANDA, 2012):

Quantificação dos volumes estimados para cada dia ( $t_i \rightarrow t_{i+1}$ ):

$$V(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q(i) dt = \frac{(Q_{(i+1)} + Q_{(i)})}{2} * \Delta t \quad (\text{Eq. 3})$$

$$V_{ESub(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{ESub(i)} dt = \frac{(Q_{ESub(i+1)} + Q_{ESub(i)})}{2} * \Delta t \quad (\text{Eq. 4})$$

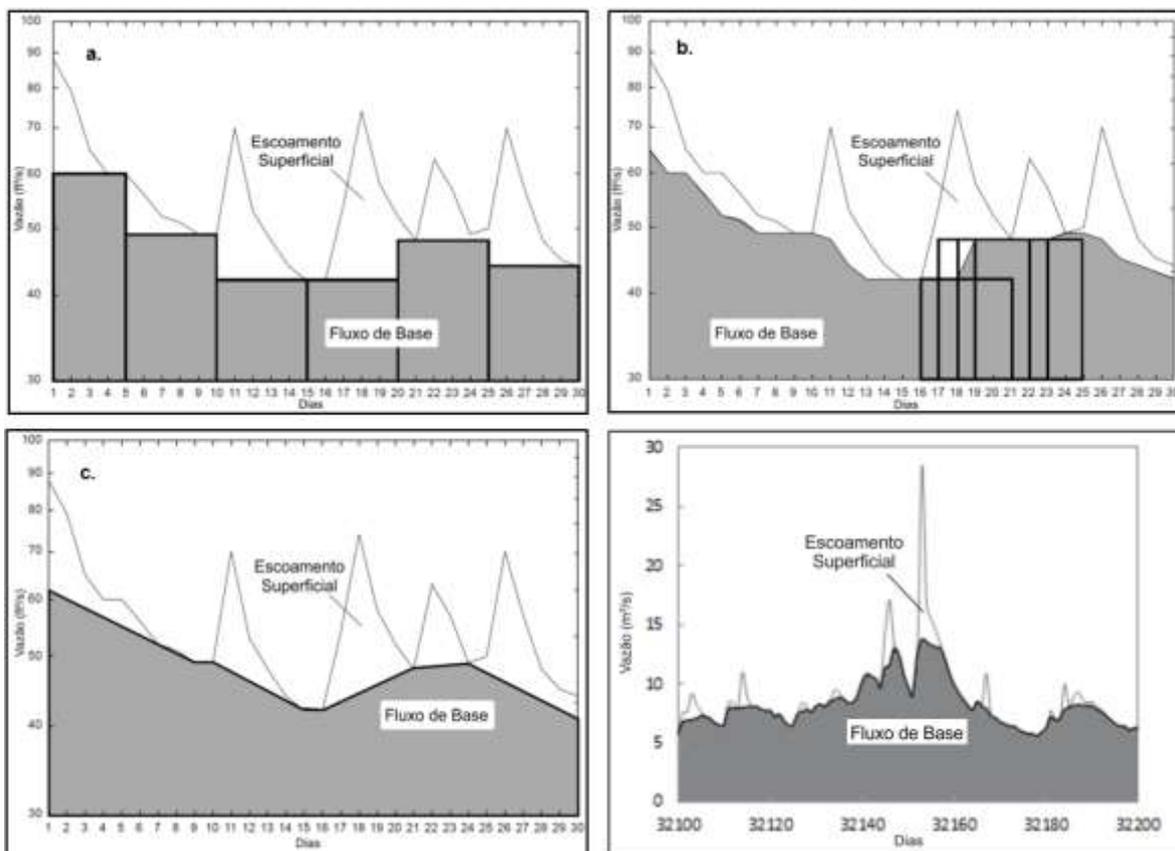
$$V_{ES(i)} = V_{(i)} - V_{ESub(i)} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:  $V(i)$  é o volume do escoamento total no dia  $i$ , em  $m^3$ ;  $V_{es}(i)$  é o volume do escoamento superficial no dia  $i$ , em  $m^3$ ;  $V_{ESub}(i)$  é o volume do escoamento subterrâneo no dia  $i$ , em  $m^3$ ;  $Q(i)$  é a vazão do dia  $i$ , obtida da base de dados da estação fluviométrica, em  $m^3s^{-1}$ ;  $\Delta t$  é o intervalo de tempo diário, igual a 86400 segundos e  $Q_{ESub}(i)$  é a vazão correspondente ao escoamento subterrâneo no dia  $i$ , obtido a partir da separação do hidrograma, em  $m^3s^{-1}$ .

Volume do fluxo de base anual ( $V_{ESubA}$ ), que corresponde à soma dos volumes de fluxo subterrâneo ao longo do ano hidrológico:

$$V_{ESubA} = \sum_{i=1}^{ud} V_{ESub(i)} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que:  $ud$  é o último dia do ano hidrológico.



**Figura 5** – Métodos de separação de hidrogramas: (a) IF – Intervalo fixo, (b) IM – Intervalo móvel, (c) ML – Mínimos locais e (d) MM – Médias móveis (adaptado de Sloto e Crouse, 1996).

**Figure 5** – Hydrograph separation methods: (a) IF – Fixed interval, (b) IM – Sliding interval, (c) ML – Local minimum e (d) MM – Smoothed minima baseflow (adapted of Sloto e Crouse, 1996).

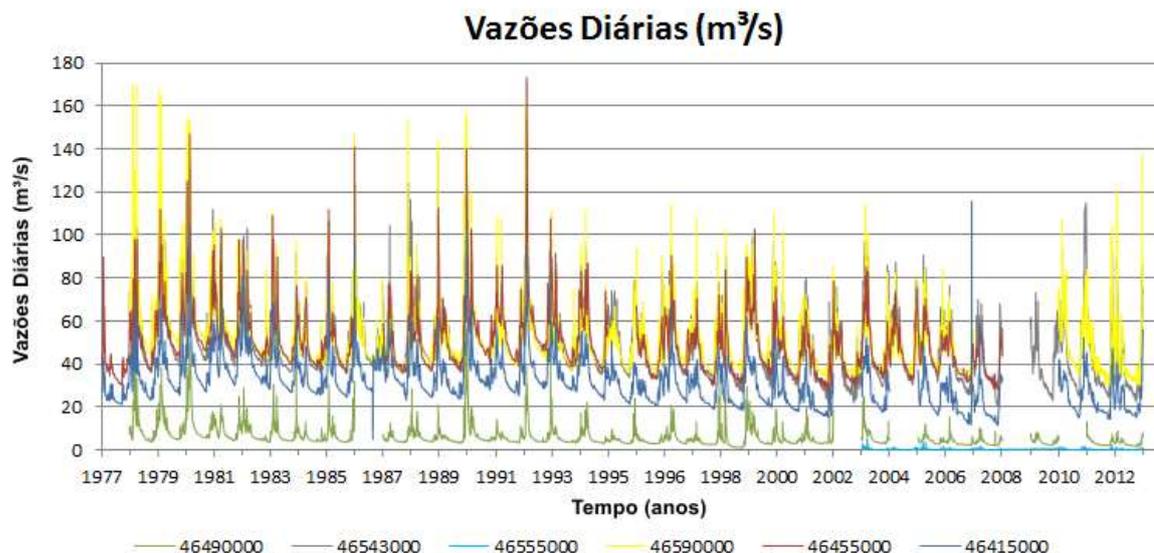
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Séries históricas de vazões nas sub-bacias

As vazões diárias das seis drenagens em estudo foram compiladas na Figura 6.

As sub-bacias hidrográficas situadas na porção oeste da área de estudo possuem vazões médias maiores que aquelas da porção leste (sub-bacias do rio São Desidério e do rio da Boa Sorte). As sub-bacias do oeste detêm aproximadamente 97% de toda a vazão média da bacia, restando apenas 3% de contribuição das sub-bacias do leste, apesar de perfazerem

22% da área total da bacia (Tabela 1); a sub-bacia do Rio da Boa Sorte contribui com menos de 0,1% da vazão total. As séries históricas indicam, ainda, uma queda no patamar das vazões a partir dos anos 80 mais ou menos acentuada em todos os rios, com exceção do Rio Grande (estação 46415000). No final dos anos 80 e início dos anos 90, há uma subida das vazões dos rios, quase suficiente para retomar o patamar anterior, à exceção do rio São Desidério (46490000) onde quase não houve recuperação. Já a partir de 1994 e 1995, as séries históricas mostram uma tendência de queda acentuada sem recuperação em relação ao patamar precedente.



**Figura 6** – Séries históricas das vazões diárias ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) dos seis rios analisados  
**Figure 6** – Time series of daily flow rates of the six studied rivers

**Tabela 1** – Área de contribuição das bacias hidrográficas e suas vazões médias

**Table 1** – Contribution area of the catchments and their average flow rates

Bacia Hidrográfica	Código	Área ( $\text{km}^2$ )	Vazão Média ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
Rio Branco	46590000	7479,5	50,84
Rio de Ondas	46543000	5403,9	48,39
Rio das Fêmeas	46455000	6329,2	49,48
Rio Grande	46415000	4944,4	31,52
Rio São Desidério	46490000	4433,2	6,04
Rio da Boa Sorte	46555000	2409,6	0,25

#### 4.2 Separação dos escoamentos superficial e subterrâneo pelos diferentes métodos

Com a separação dos hidrogramas por meio dos métodos – IF, IM, ML e MM – foi possível identificar as variações nas estimativas de fluxo de base e escoamento superficial ao longo de toda a série histórica e nos diferentes meses de cada ano.

A sub-bacia do rio da Boa Sorte (estação 46555000) possui dados históricos de vazão incompletos, o que impossibilitou a separação dos escoamentos superficial e subterrâneo no hidrograma. No entanto, o rio da Boa Sorte contribui com menos de 0,1% de toda a vazão do rio Grande, não exercendo, assim, influência significativa nos cálculos de escoamento.

A vazão insignificante da sub-bacia do

rio da Boa Sorte em relação às demais sub-bacias e à extensão em área de sua sub-bacia, sugere que tanto o SAU quanto as águas superficiais da área são drenadas para o aquífero cárstico/cristalino subjacente, formado pelos carbonatos do Grupo Bambuí e rochas fraturadas do embasamento.

A Tabela 2 agrupa os dados de precipitação total média em cada uma das sub-bacias nos 12 meses do ano e a média total anual. A tabela também reúne os valores de N calculados, as médias mensais das estimativas de fluxo de base e escoamento superficial pelos diferentes métodos em cada bacia analisada, a média anual desses escoamentos, a relação entre os escoamentos e a pluviometria média da bacia, e a razão entre os escoamentos (superficial e subterrâneo) e o escoamento total da bacia.

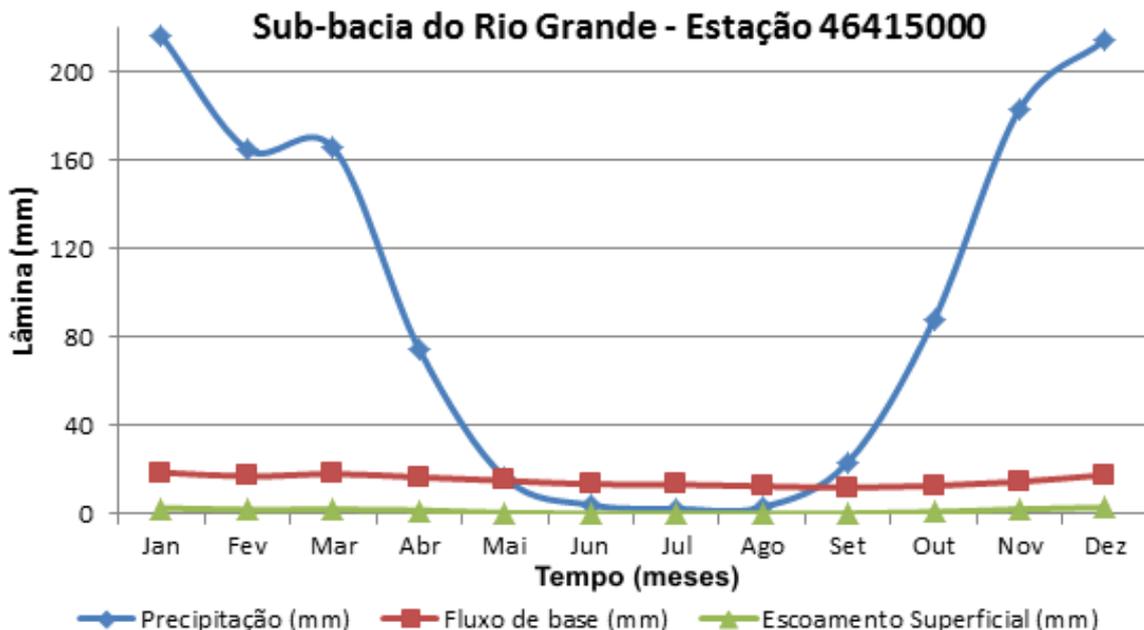
A contribuição do fluxo de base para a manutenção natural da vazão dos rios é expressa pela razão entre escoamento subterrâneo e o escoamento total. Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram que o fluxo de base corresponde à principal componente da vazão dos rios que cortam o SAU, contribuindo com 81,75% a 93,06% (excluindo-se os valores superestimados do método de médias móveis). A contribuição do escoamento subterrâneo é condizente com aquele estimado pela Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia - SRH (2003), que afirma que 90% da vazão dos rios é decorrência do escoamento subterrâneo.

Em geral, as sub-bacias possuem um regime hidrológico bem definido, com verões chuvosos e invernos secos, exceto a bacia do rio de Ondas, e que nos meses secos o fluxo de base é superior à precipitação (Figura 7). Verifica-se, assim, que o fluxo de base atua como o principal responsável pela manutenção da vazão dos rios na época de estiagem.

A Figura 8 traz as estimativas anuais dos escoamentos superficial e subterrâneo calculados pelos métodos IF, IM, ML e MM para

as cinco sub-bacias analisadas. Comparativamente, o método que mais se distingue é o da individualização por Médias Móveis, uma vez que superestima o escoamento de base e subestima o escoamento superficial em todos os casos. Os métodos de Intervalos Móveis e Intervalos Fixos apresentam estimativas muito próximas e o método por Mínimos Locais apresenta resultados semelhantes a esses dois anteriores, exibindo um pouco mais de desvio na bacia do rio São Desidério.

A Figura 9 traz um detalhe das estimativas do fluxo de base de cada método. Aqui vê-se claramente a discrepância analisada na Figura 8, como a superestimativa produzida pelas Médias Móveis. Apesar dos volumes calculados pelos métodos de Intervalos Móveis e Intervalos Fixos serem muito próximos, observa-se uma discrepância na distribuição das vazões, sendo o Intervalos Móveis mais suavizado. Por fim, observa-se que o método por Mínimos Locais é o que mais se aproxima de um fluxo de base ideal, produz uma aproximação estável, que oscila pouco e não varia muito em picos de vazão do rio devido aos eventos de precipitação.



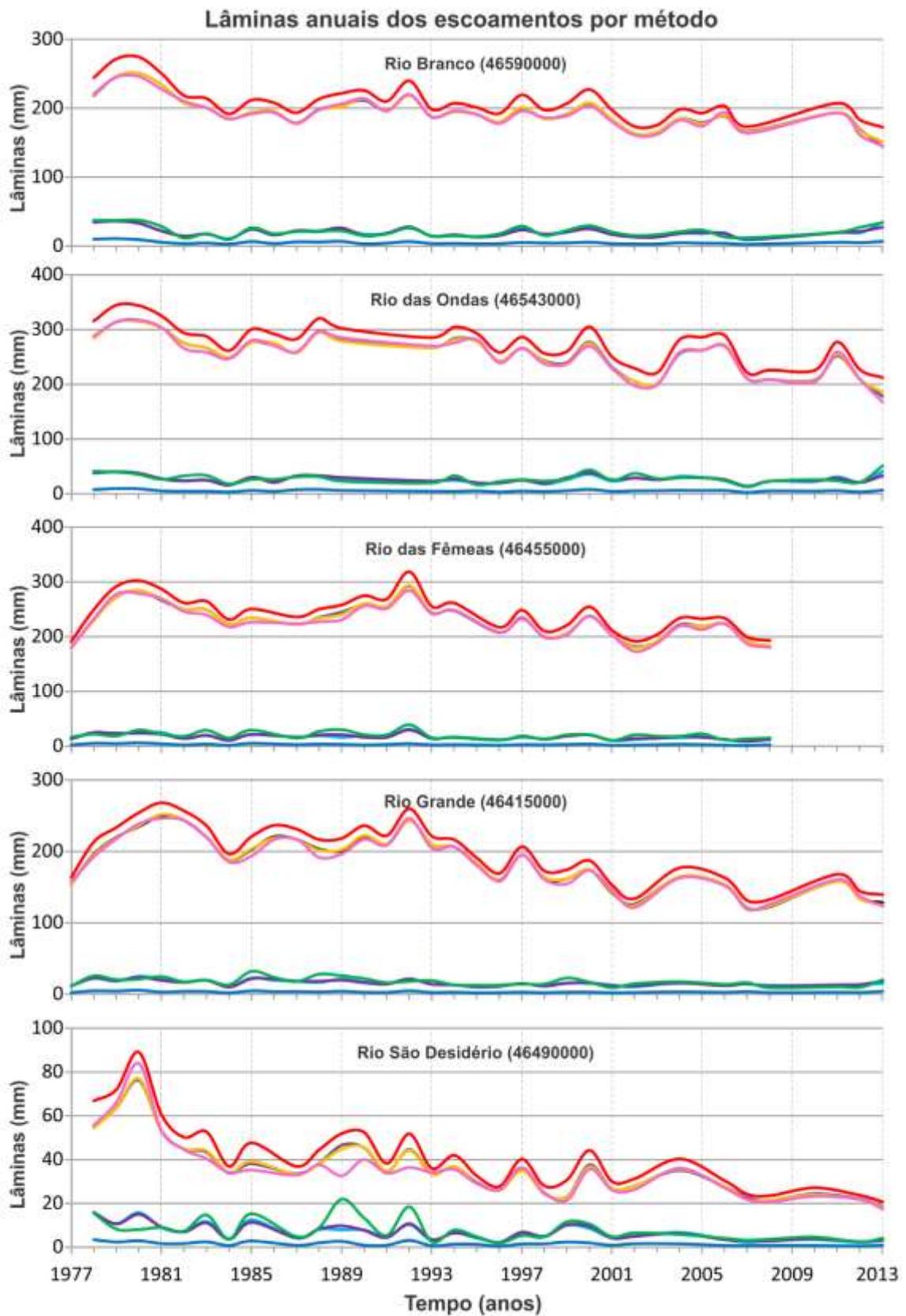
**Figura 7** – Lâminas mensais de precipitação média, fluxo de base e escoamento superficial na sub-bacia do Rio Grande, pelo método de mínimos locais

**Figure 7** – Monthly average precipitation, base flow and runoff of the Rio Grande sub-basin by local minimum method

**Tabela 2** – Valores de precipitação média mensal e anual, lâminas de escoamento de base e superficial pelos diferentes métodos aplicados

**Table 2** – Monthly and annual average precipitation, baseflow and runoff by the different applied methods

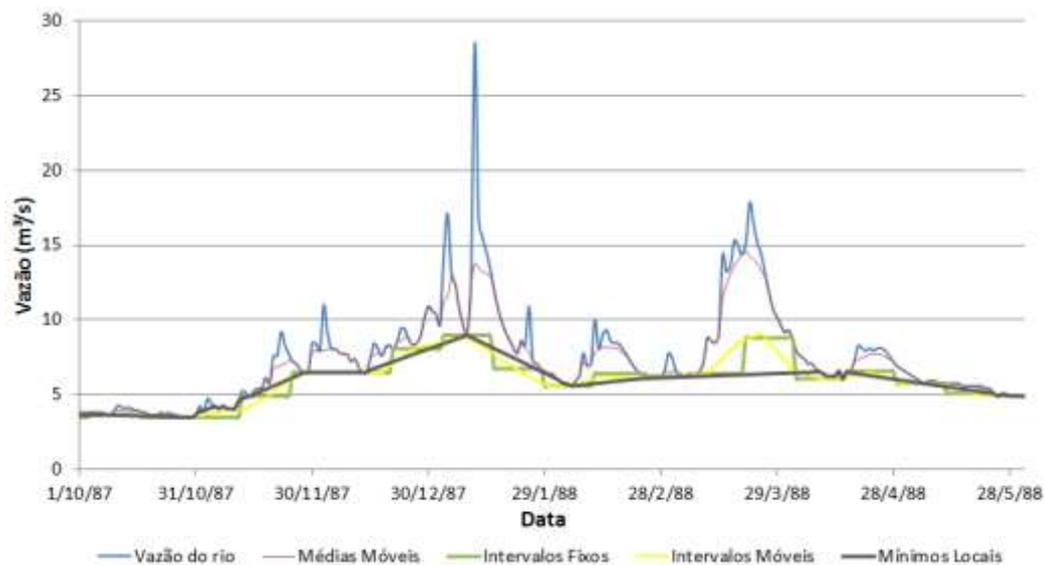
Bacia do rio Grande														% Esc / P	% Esc / EscTotal	
Precipitação Total Média (mm)																
Método	Individualização	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual		
N=6.63																
Médias	Fluxo de Base (mm)	21.22	18.89	20.21	18.33	15.80	13.86	13.70	12.96	12.41	13.71	16.65	20.43	198.17	17.12%	98.50%
Móveis	Esc. Superf. (mm)	0.49	0.38	0.36	0.25	0.10	0.04	0.04	0.07	0.09	0.23	0.40	0.57	3.03	0.26%	1.50%
Intervalos Fixos	Fluxo de Base (mm)	19.05	17.18	18.56	17.00	15.20	13.71	13.55	12.72	12.12	12.83	15.04	18.43	185.39	16.02%	92.14%
	Esc. Superf. (mm)	2.66	2.09	2.01	1.59	0.70	0.19	0.19	0.31	0.39	1.10	2.01	2.57	15.81	1.37%	7.86%
Intervalos Móveis	Fluxo de Base (mm)	19.20	17.19	18.56	17.06	15.21	13.69	13.56	12.68	12.08	12.87	14.98	18.45	185.55	16.03%	92.22%
	Esc. Superf. (mm)	2.50	2.08	2.00	1.53	0.69	0.21	0.18	0.35	0.43	1.06	2.07	2.55	15.65	1.35%	7.78%
Mínimos Locais	Fluxo de Base (mm)	18.98	17.17	18.31	16.75	15.19	13.61	13.47	12.72	12.09	12.89	14.76	17.83	183.78	15.88%	91.30%
	Esc. Superf. (mm)	2.81	2.10	2.25	1.84	0.71	0.29	0.27	0.31	0.41	1.04	2.29	3.17	17.51	1.51%	8.70%
Bacia do rio das Formosas														% Esc / P	% Esc / EscTotal	
Precipitação Total Média (mm)																
Método	Individualização	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual		
N=6.96																
Médias	Fluxo de Base (mm)	25.28	22.99	24.83	22.72	20.04	17.54	17.16	16.42	15.42	16.82	19.94	24.40	243.54	20.62%	98.70%
Móveis	Esc. Superf. (mm)	0.54	0.47	0.46	0.29	0.09	0.05	0.04	0.05	0.08	0.16	0.38	0.62	3.20	0.27%	1.30%
Intervalos Fixos	Fluxo de Base (mm)	23.13	20.83	22.95	21.17	19.36	17.26	16.97	16.22	15.12	16.14	18.32	22.16	229.62	19.45%	93.06%
	Esc. Superf. (mm)	2.68	2.63	2.33	1.83	0.77	0.33	3.00	0.24	0.38	0.84	2.00	2.86	17.12	1.45%	6.94%
Intervalos Móveis	Fluxo de Base (mm)	23.08	20.95	22.91	21.20	19.41	17.29	16.98	16.22	15.11	16.11	18.21	22.12	229.61	19.45%	93.06%
	Esc. Superf. (mm)	2.73	2.50	2.37	1.80	0.71	0.29	0.22	0.25	0.39	0.87	2.11	2.90	17.13	1.45%	6.94%
Mínimos Locais	Fluxo de Base (mm)	22.42	20.33	22.42	20.72	19.40	17.27	16.96	16.20	15.18	16.43	18.36	21.10	226.77	19.21%	91.87%
	Esc. Superf. (mm)	3.51	3.12	2.86	2.29	0.73	0.32	0.24	0.26	0.32	0.55	1.96	3.92	20.08	1.70%	8.13%
Bacia do rio São Desidério														% Esc / P	% Esc / EscTotal	
Precipitação Total Média (mm)																
Método	Individualização	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual		
N=6.49																
Médias	Fluxo de Base (mm)	5.02	5.03	5.15	4.20	3.17	2.46	2.28	2.11	2.00	2.18	2.94	4.86	41.43	3.91%	96.36%
Móveis	Esc. Superf. (mm)	0.26	0.25	0.21	0.14	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.16	0.40	1.57	0.15%	3.64%
Intervalos Fixos	Fluxo de Base (mm)	4.06	4.17	4.26	3.69	2.98	2.39	2.23	2.07	1.94	2.04	2.47	3.92	36.24	3.42%	84.30%
	Esc. Superf. (mm)	1.22	1.11	1.10	0.65	0.22	0.08	0.06	0.05	0.08	0.19	0.63	1.35	6.75	0.64%	15.70%
Intervalos Móveis	Fluxo de Base (mm)	4.10	4.19	4.22	3.65	2.96	2.38	2.23	2.08	1.94	2.05	2.50	3.87	36.16	3.42%	84.11%
	Esc. Superf. (mm)	1.19	1.09	1.14	0.69	0.25	0.09	0.07	0.05	0.08	0.19	0.61	1.40	6.83	0.65%	15.89%
Mínimos Locais	Fluxo de Base (mm)	3.92	3.94	4.21	3.58	3.01	2.41	2.23	2.06	1.94	2.07	2.51	3.30	35.17	3.32%	81.75%
	Esc. Superf. (mm)	1.39	1.34	1.15	0.76	0.20	0.06	0.07	0.06	0.08	0.17	0.60	1.96	7.85	0.74%	18.25%
Bacia do rio das Ondas														% Esc / P	% Esc / EscTotal	
Precipitação Total Média (mm)																
Método	Individualização	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual		
N=6.75																
Médias	Fluxo de Base (mm)	29.55	26.13	29.38	25.95	22.15	19.29	18.64	17.59	16.36	18.85	23.58	29.54	276.99	24.53%	98.01%
Móveis	Esc. Superf. (mm)	0.78	0.61	0.81	0.49	0.19	0.09	0.07	0.09	0.14	0.48	0.80	1.07	5.62	0.50%	1.99%
Intervalos Fixos	Fluxo de Base (mm)	26.59	23.64	26.53	23.73	21.09	18.82	18.34	17.26	15.86	17.28	20.90	25.57	255.61	22.64%	90.45%
	Esc. Superf. (mm)	3.73	3.10	3.67	2.71	1.24	0.56	0.37	0.43	0.64	2.05	3.47	5.05	27.00	2.39%	9.55%
Intervalos Móveis	Fluxo de Base (mm)	26.60	23.58	26.50	23.76	21.16	18.86	18.36	17.25	15.90	17.22	20.67	25.66	255.52	22.63%	90.41%
	Esc. Superf. (mm)	3.72	3.15	3.70	2.67	1.18	0.52	0.35	0.44	0.60	2.11	3.70	4.95	27.09	2.40%	9.59%
Mínimos Locais	Fluxo de Base (mm)	26.56	23.46	25.88	23.37	21.11	18.80	18.29	17.24	15.95	17.54	20.75	25.45	254.40	22.53%	89.95%
	Esc. Superf. (mm)	3.96	3.28	4.32	3.07	1.22	0.58	0.42	0.44	0.55	1.79	3.63	5.16	28.41	2.52%	10.05%
Bacia do rio Branco														% Esc / P	% Esc / EscTotal	
Precipitação Total Média (mm)																
Método	Individualização	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual		
N=7.20																
Médias	Fluxo de Base (mm)	21.26	19.70	21.01	18.68	17.02	15.34	15.25	14.66	13.79	14.99	17.34	20.51	209.55	17.60%	97.69%
Móveis	Esc. Superf. (mm)	0.81	0.80	0.65	0.38	0.15	0.05	0.04	0.04	0.10	0.34	0.73	0.89	4.96	0.42%	2.31%
Intervalos Fixos	Fluxo de Base (mm)	18.76	17.41	18.81	17.39	16.43	15.13	15.10	14.49	13.52	14.06	15.52	17.69	194.31	16.32%	90.58%
	Esc. Superf. (mm)	3.31	3.08	2.84	1.67	0.73	0.26	0.19	0.21	0.37	1.27	2.55	3.71	20.20	1.70%	9.42%
Intervalos Móveis	Fluxo de Base (mm)	18.73	17.37	18.87	17.37	16.46	15.14	15.11	14.50	13.53	14.13	15.30	17.94	194.45	16.33%	90.65%
	Esc. Superf. (mm)	3.34	3.13	2.79	1.69	0.70	0.25	0.18	0.20	0.36	1.20	2.76	3.47	20.06	1.68%	9.35%
Mínimos Locais	Fluxo de Base (mm)	18.72	17.27	18.65	17.18	16.47	15.15	15.10	14.50	13.50	14.09	15.04	17.55	193.22	16.23%	90.02%
	Esc. Superf. (mm)	3.49	3.22	3.01	1.88	0.69	0.24	0.19	0.21	0.39	1.24	3.02	3.85	21.43	1.80%	9.98%



Escoamento de base: Médias Móveis Intervalos Fixos Intervalos Móveis Mínimos Locais

Escoamento superficial: Médias Móveis Intervalos Fixos Intervalos Móveis Mínimos Locais

**Figura 8** – Lâminas anuais de escoamento superficial e subterrâneo calculadas pelos diferentes métodos  
**Figure 8** – Annual runoff and baseflow calculated by different methods



**Figura 9** – Comparação dos fluxos de base calculados pelos diferentes métodos, detalhe do Rio São Desidério  
**Figure 9** – Comparison of baseflow calculated by different methods, São Desidério river detail

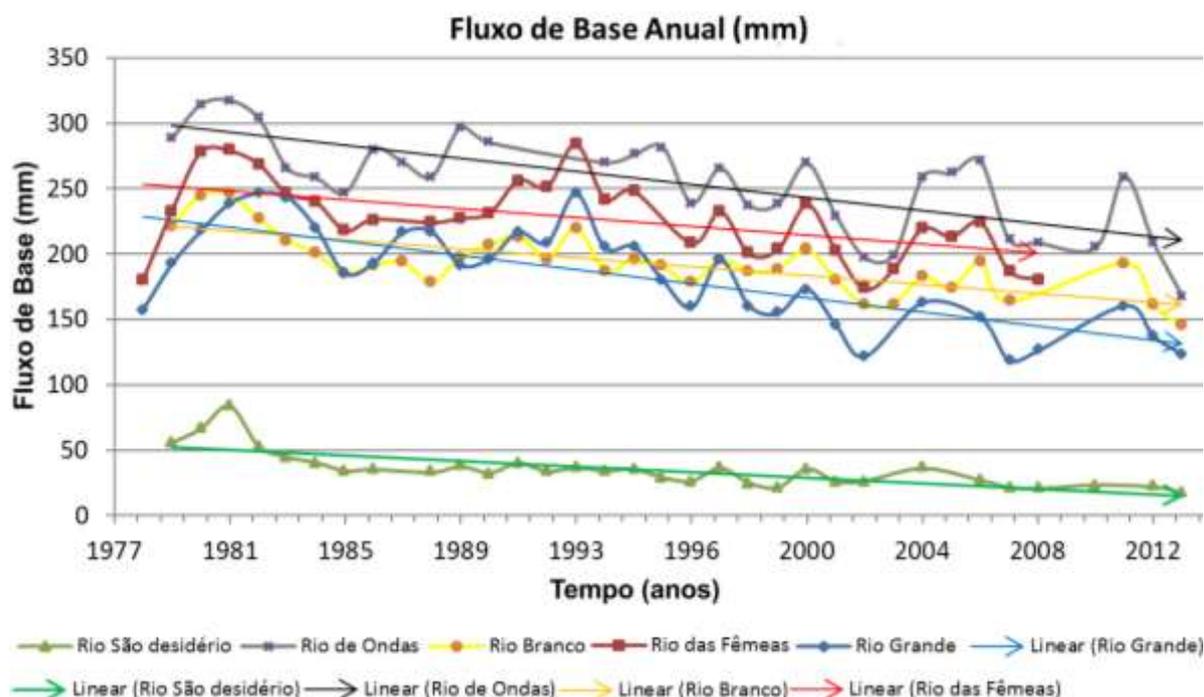
### 4.3 Fluxo de base das sub-bacias

As curvas de variação do fluxo de base calculado nas estações fluviométricas dos cinco principais rios da bacia do Rio Grande mostram uma tendência geral de decréscimo das lâminas de escoamento subterrâneo no período analisado (Figura 10). Os métodos de separação de Intervalos Fixos, Intervalos Móveis e Mínimos Locais não apresentam grandes desvios quanto ao volume de fluxo de base calculados, no entanto, por ser o mais representativo e realista para a bacia estudada, é utilizada aqui a estimativa de fluxo de base do método por Mínimos Locais para o cálculo anual.

Observa-se na Figura 9 uma queda no patamar do fluxo de base a partir dos anos 80

mais ou menos acentuada em todos os rios. No final dos anos 80 e início dos anos 90 há uma subida quase suficiente para retomar o patamar anterior, à exceção do rio São Desidério que quase não houve recuperação e do Rio Branco. Já a partir de 1994 e 1995 há uma tendência maior de queda em toda a bacia.

A Tabela 3 apresenta a taxa de queda do fluxo de base por ano para cada sub-bacia. A queda no fluxo de base médio anual situa-se entre 1,07 mm/a e 2,75 mm/a, representando uma diminuição de 0,75% a 3,04% do fluxo de base médio anual. As sub-bacias situadas na porção sul do aquífero, bacia do rio Grande e do rio São Desidério, são aquelas que, proporcionalmente ao fluxo de base médio anual, apresentam as maiores taxas de decréscimo do escoamento subterrâneo



**Figura 10** – Fluxo de base anual médio calculado para cada sub-bacia

**Figure 10** – Annual average baseflow calculated for each sub-basin

**Tabela 3** – Fluxo de base anual médio para todo o período analisado, e decréscimo do fluxo de base ( $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ), em porcentagem, relativo à média anual.

**Table 3** – Annual average baseflow throughout the analysis period, baseflow decreasing ( $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) in percentage related of annual average.

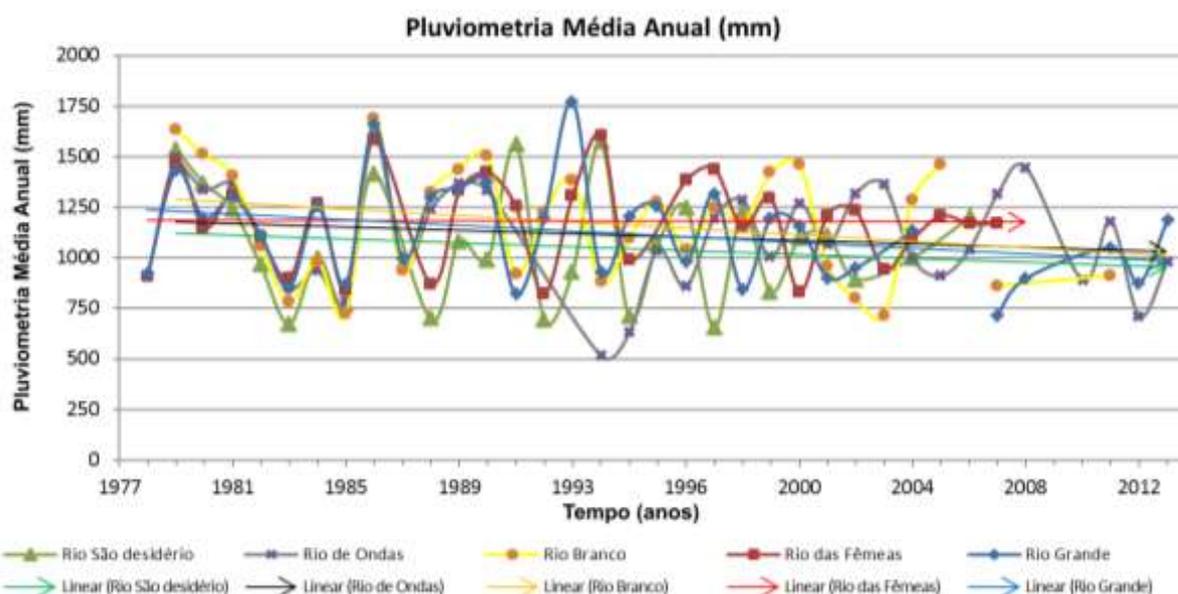
Sub-bacia	Código	Fluxo de Base Médio Anual (mm)	Queda do Fluxo de Base ( $\text{mm}/\text{ano}$ )	% Queda do Fluxo de Base por ano
Rio Branco	46590000	193,22	1,72	0,749%
Rio de Ondas	46543000	254,40	2,54	0,997%
Rio das Fêmeas	46455000	226,77	1,73	0,763%
Rio Grande	46415000	183,78	2,75	1,496%
Rio São Desidério	46490000	35,17	1,07	3,041%

#### 4.4 Pluviometria média das sub-bacias

Para avaliação das interferências provocadas pelas variações climáticas no escoamento de base do SAU na bacia do rio Grande, foram utilizados dados de chuva coletados em postos pluviométricos distribuídos por toda a bacia do rio Grande e bacias fronteiriças, como as bacias do Rio Preto e do Rio Corrente. As cinco sub-bacias foram consideradas para efeito de análise do comportamento pluviométrico entre os anos de 1977 e 2013. Os dados da precipitação total média plurianual dos postos pluviométricos (Figura 11) mostram uma tendência geral de diminuição da precipitação. É importante ressaltar a mudan-

ça nos ciclos de chuva a partir de 1987, quando a pluviometria dessas sub-bacias deixa de estar em fase e passa a ter ciclos de chuva distintos entre si.

O decréscimo da precipitação média anual para as sub-bacias analisadas variou de 5,41  $\text{mm}/\text{a}$  a 9,64  $\text{mm}/\text{a}$ , representando aproximadamente 0,61% a 0,88% da precipitação média anual (Tabela 4). A bacia do rio das Fêmeas é a única exceção quanto à diminuição da precipitação ao longo do tempo, mantendo uma pluviometria média anual praticamente constante durante o período analisado, com uma diminuição anual de apenas 0,065% na precipitação.



**Figura 11** – Pluviometria média anual calculada para cada sub-bacia  
**Figure 11** – Annual average rainfall calculated for each sub-basin

**Tabela 4** – Valores de precipitação média anual, queda da precipitação média anual e taxa da queda da precipitação  
**Table 4** – Annual average rainfall, rainfall decreasing and decline of precipitation

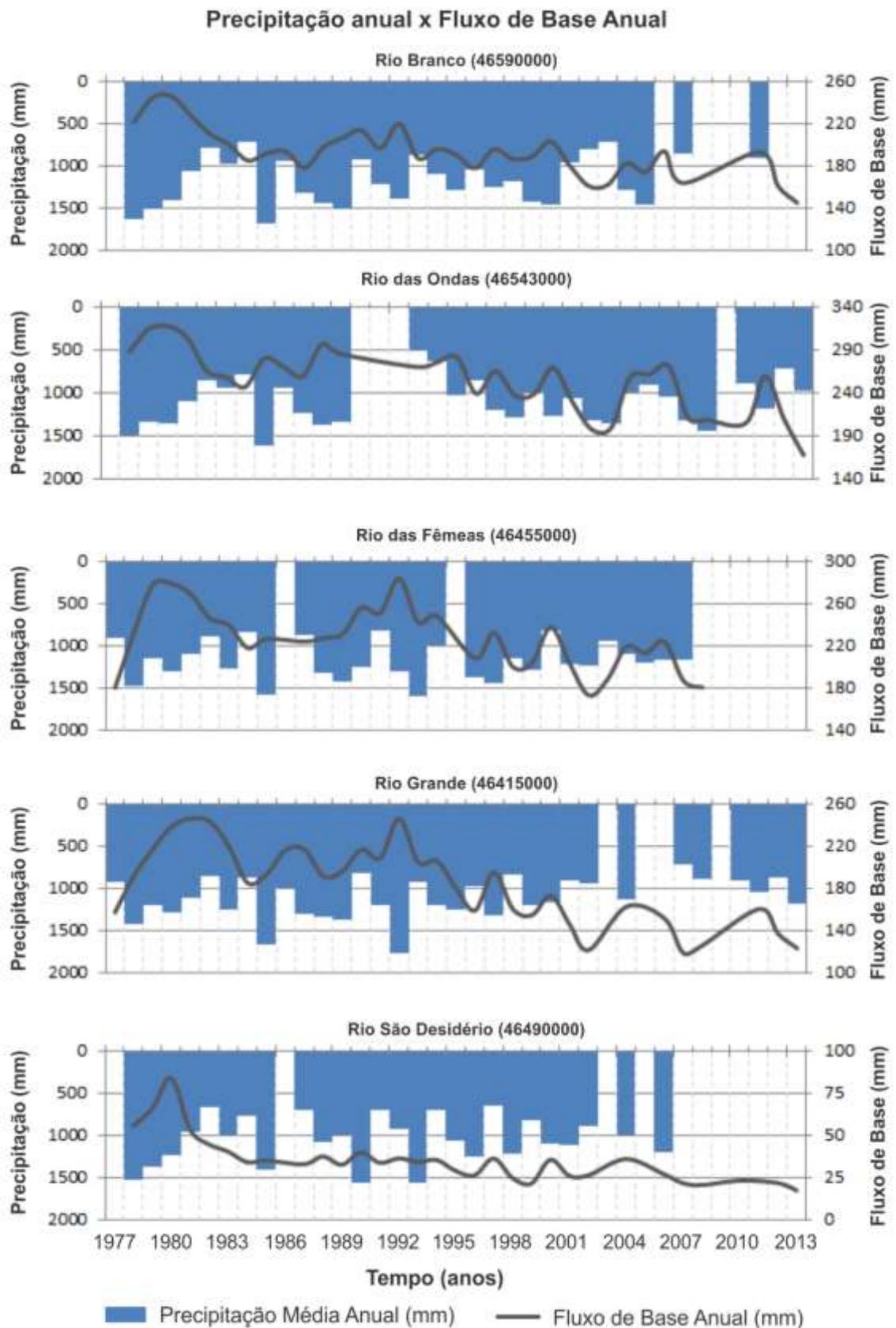
Sub-bacia	Código	Precipitação Média Anual (mm)	Queda da Precipitação (mm/ano)	% Queda da Precipitação por ano
Rio Branco	46590000	1141,5	8,97	0,780%
Rio de Ondas	46543000	1095,0	6,96	0,611%
Rio das Fêmeas	46455000	1180,8	0,77	0,065%
Rio Grande	46415000	1095,7	9,64	0,880%
Rio São Desidério	46490000	1044,5	5,41	0,614%

#### 4.5 Balanço histórico entre pluviometria e fluxo de base

Na Figura 12 podemos observar a oscilação do fluxo de base em conjunto com a precipitação média anual em cada sub-bacia. As maiores variações do fluxo de base salientadas (queda no início dos anos 80, alguma recuperação no final de 80 e início de 90 e tendência de queda a partir de 94/95) possuem correlação com a variação no regime de chuvas.

As sub-bacias possuem comportamento semelhante quanto à variação do fluxo de base, com alguns picos deslocados em 1 ou

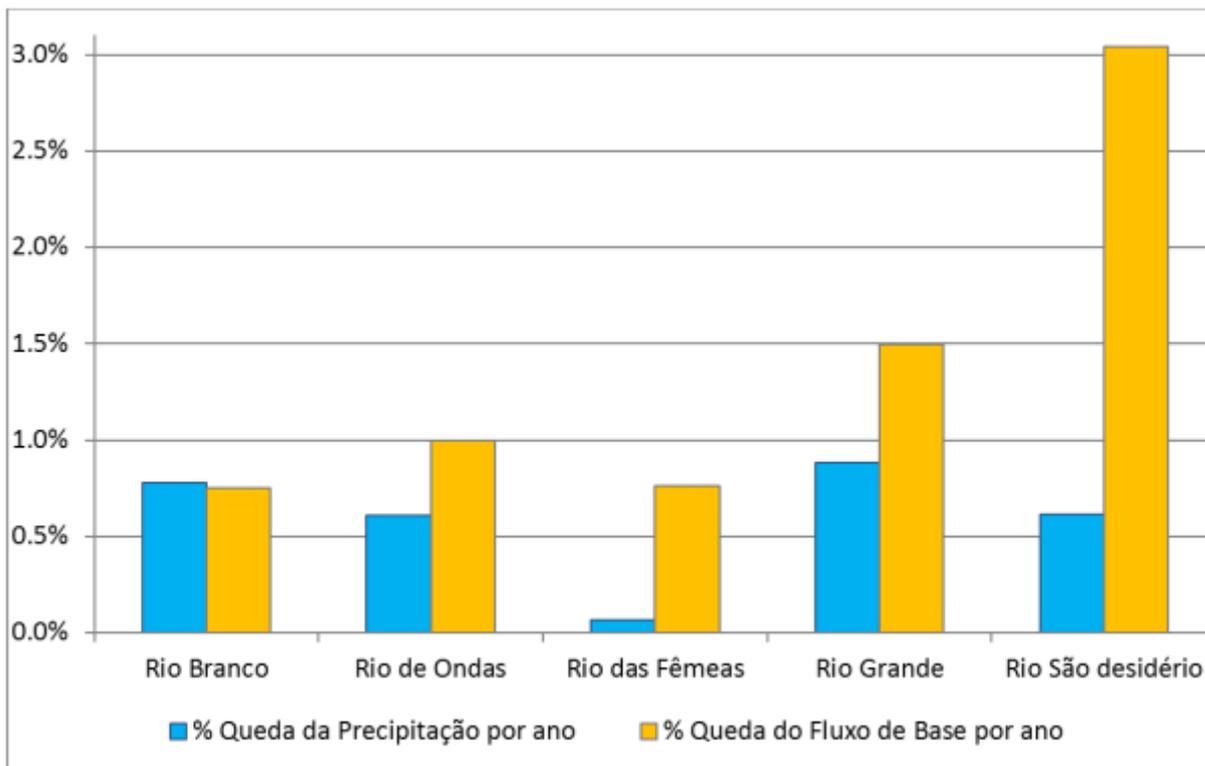
2 anos, com exceção do rio São Desidério que possui um fluxo de base distinto. Quanto à pluviometria média há uma maior variação entre as sub-bacias, possuindo uma boa correlação nos anos 70 e 80. Visualmente é difícil quantificar se a queda do fluxo de base é coerente com a queda da precipitação, até mesmo porque para uma série histórica longa (36 anos) e uma área tão grande (aproximadamente 30 km<sup>2</sup>) há pontos sem dados suficientemente bons dentro da série histórica. Por isso é importante correlacionar numericamente as tendências de chuvas e do comportamento do fluxo de base.



**Figura 12** – Gráficos de correlação entre o fluxo de base anual e a pluviometria média anual em cada sub-bacia  
**Figure 12** – Correlation plots between the annual baseflow and mean values of precipitation for each sub-basin

A figura 13 e a tabela 5 apresentam os valores de diminuição da precipitação e do fluxo de base para cada sub-bacia avaliada. As bacias do rio das Fêmeas e do rio São Desidério são responsáveis pelas maiores discrepâncias entre a variação do fluxo de base e da precipitação, registrando uma queda do fluxo de base de 11,74 e 4,95 vezes, respectivamente,

maiores que a queda da precipitação. As bacias do rio de Ondas e do rio Grande apresentam uma variação semelhante entre si, denotando uma queda no fluxo de base de 1,6 vezes maior que a diminuição da precipitação. A bacia do rio Branco é a única que evidencia uma relação proporcional entre a variação do escoamento subterrâneo e a variação da pluviometria.



**Figura 13** – Correlação entre a porcentagem da queda do fluxo de base e da pluviometria em cada sub-bacia  
**Figure 13** – Correlation between the percentage of decrease in baseflow and precipitation for each sub-basin

**Tabela 5** – Correlação entre a queda do fluxo de base e da pluviometria em cada sub-bacia  
**Table 5** – Correlation between the decrease of baseflow and precipitation for each sub-basin

Sub-bacia	Precipitação Média Anual (mm)	Queda da Precipitação (mm/ano)	Fluxo de Base Médio Anual (mm)	Queda do Fluxo de Base (mm/ano)	% Queda da Precipitação por ano	% Queda do Fluxo de Base por ano
Rio Branco	1141,5	8,97	193,22	1,72	0,0078	0,00749
Rio de Ondas	1095,0	6,96	254,40	2,54	0,00611	0,00997
Rio das Fêmeas	1180,8	0,77	226,77	1,73	0,00065	0,00763
Rio Grande	1095,7	9,64	183,78	2,75	0,0088	0,01496
Rio São Desidério	1044,5	5,41	35,17	1,07	0,00614	0,03041

## 5 CONCLUSÕES

Os métodos de filtros digitais aplicados na separação dos escoamentos superficial e subterrâneo em hidrogramas foram eficazes,

permitindo um grande número de análises em um curto período de tempo. Os resultados obtidos pelos métodos de intervalo fixo, intervalo móvel e mínimos locais forneceram resultados semelhantes. O método dos mínimos

locais, contudo, apresenta valores de escoamento subterrâneo mais compatíveis com as variações de vazão nos rios. O método das médias móveis forneceu valores de escoamento de base superestimados, pouco condizentes com a realidade.

A correlação das tendências da pluviometria e do fluxo de base ao longo de 36 anos (1977 a 2013) indica que a diminuição do escoamento subterrâneo tem relação com a queda nas taxas de precipitação; a sub-bacia do rio Branco mostra evidente correlação entre tais parâmetros. Entretanto, a taxa de diminuição do fluxo de base é mais acentuada quando comparada à taxa de queda pluviométrica, evidenciando assim que outros fatores são atuantes na queda do fluxo de base do rio Grande ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

- ANA. HidroWeb: ANA. **Mapas**. Agência Nacional de Águas (ANA), Brasília, DF, 2011a. Base de Dados em Shapefile.
- ANA. HidroWeb: ANA. **Dados Hidrológicos** - Séries históricas. Agência Nacional de Águas (ANA), Brasília, DF, 2011b. Base de Dados em MDB do Microsoft Office Access.
- BISWAL, B., MARANI, M. Geomorphological origin of recession curves. **Geophys. Res. Lett.** 37 (24), 2010.
- BISWAL, B., NAGESH KUMAR, D. A general geomorphological recession flow model for river basins. **Water Resour. Res.** v. 49, n. 8, 4900–4906, 2013.
- BISWAL, B., NAGESH KUMAR, D. Study of dynamic behavior of recession curves. **Hydrol. Process.** v. 28, n. 3, 784–792, 2014.
- BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. In: **Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference**. Auckland, New Zealand, v. 28, 1–13, 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.
- FAMIGLIETTI, J.S.; RODELL, M. Water in the balance. **Science** 340 (6138), 1300– 1301. 2013.
- GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEJKERS, J.; UH
- A exploração da água subterrânea para o abastecimento do agronegócio, fortemente atuante na região estudada a partir de meados dos anos 80 (SPAGNOLO *et al.*, 2012), constitui um importante fator na diminuição do volume do escoamento de base, mostrando-se determinante principalmente nas bacias dos rios São Desidério e das Fêmeas.
- Uma vez que a vazão dos rios, nos períodos de estiagem, é mantida essencialmente pelo escoamento subterrâneo do Sistema Aquífero Urucua, a super-exploração deste aquífero poderá ocasionar diminuição expressiva nas vazões dos rios à jusante, impactando o rio São Francisco e comprometendo a utilização das águas superficiais.
- LENBROOK, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.2055-2068, 2009.
- INSTITUTE OF HYDROLOGY. **Low Flow Studies report**. Institute of Hydrology, Wallingford, UK., 1980.
- LAROCQUE, M.; FORTIN, V.; PHARAND, M. C.; RIVARD, C. Groundwater contribution to riverflows – using hydrograph separation, hydrological and hydrogeological models in a Southern Quebec aquifer. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v.7, p.7809–7838, 2010.
- LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. **Hydrology for engineers**. McGraw-Hill, New York, 508 p., 1975.
- MIRANDA, A. C. R. **Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- PETTYJOHN, W.A.; HENNING, R. **Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio**. Ohio State University. Water Resources Center Project Completion, Report N° 552. Ohio, 323 p., 1979.
- SHAW, S.B.; MCHARDY, T.M.; RIHA, S.J. Evaluating the influence of watershed moisture storage on variations in base flow recession rates during prolonged-

- rain-free periods in medium-sized catchments in New York and Illinois, USA. **Water Resour. Res.** v. 49, n. 9, 6022–6028, 2013.
- SCHIRMER, M.; DAVIS, G.B.; HOEHN, E.; VOGT, T. GQ10 “Groundwater quality management in a rapidly changing world”. **J. Contam. Hydrol.** v. 127, n. 1, 1–2. 2012.
- SLOTO, R. A.; CROUSE, M. Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U. S. Geological Survey. **Water-Resources Investigations Report**, 96-4040, Lemoyne, Pennsylvania, 46 p., 1996.
- SPAGNOLO, T. F. O.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A.F. Dinâmica da expansão agrícola do município de São Desidério-BA entre os anos de 1984 a 2008, importante produtor nacional de soja, algodão e milho. **Geo UERJ**, v. 2, p. 603-618, 2012.
- SRH - SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA. Relatório Final do Sub-projeto 3.2. Uso Conjunto das Águas Subterrâneas e Superficiais da Sub-bacia do rio das Fêmeas-BA. In: **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco ANA/GEF/PNUMA/OEA**, 2003.
- SZILAGYI, J.; BRIBOVSKZI, Z.; KALICZ, P. Estimation of catchment-scale evapotranspiration from baseflow recession data: Numerical model and practical application results. **J. Hydrol.** 336, 206–217, 2007.
- THOMAS, B. F.; VOGEL, R. M.; FAMIGLIETTI, J. S. Objective hydrograph baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 102-112, 2015.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Editora da UFRGS/ABRH. Porto Alegre, RS, 943 p., 2009.