

**COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES  
HIDROLÓGICAS EM ESCALA NACIONAL**

**SUBPROJETO – REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES VIA  
MODELAGEM HIDROLÓGICA**

**MANUAL DE BASE DE DADOS: ÍNDICES  
HIDROLÓGICOS DE RIOS DA AMÉRICA DO SUL**

**IPH-ANA-HGE-SR-M2**

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

# Índices

## Hidrológicos de

## rios da América do Sul



**ESTE MATERIAL FAZ PARTE DE UM CONJUNTO DE RELATÓRIOS CRIADOS NO CONTEXTO DO PROJETO DE COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA NACIONAL, ENTRE O INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH-UFRGS) E A AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA).**

**AUTORES:** Larissa de Castro Ribeiro, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Walter Collischonn, Mino Viana Sorribas e Cléber Henrique de Araújo Gama.

**COMO CITAR:** Ribeiro, L. de C., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., Gama, C. H. de A., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Manual de base de dados: Índices hidrológicos de rios da América do Sul: IPH-ANA-HGE-SR-M2. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

**Porto Alegre - RS**

**Outubro 2021**

## Sumário

1	Apresentação	4
2	Introdução	5
3	Metodologia	6
3.1	Vazões estimadas por modelagem hidrológica	6
3.2	Índices Hidrológicos	6
3.2.1	Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro	9
3.2.2	Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias	9
3.2.3	Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias	9
3.2.4	Data da vazão mínima	9
3.2.5	Data da vazão máxima	10
3.2.6	Taxa de ascensão	10
3.2.7	Taxa de recessão	10
3.2.8	Número de reversões	10
3.2.9	Índice da vazão de base (IQB)	10
3.2.10	Coefficiente de recessão da vazão de base (k)	11
3.2.11	Coefficiente de escoamento ( $R_{QP}$ )	11
3.2.12	Inclinação da curva de permanência das vazões ( $S_{FDC}$ )	12
3.2.13	Índice de assimetria do hidrograma (S)	12
3.2.14	Elasticidade da vazão ( $E_{QP}$ )	13
3.2.15	Índice de aridez (IA)	13
3.2.16	Vazão média ( $Q_m$ )	13
3.2.17	Frequência e duração de vazões altas, baixas e vazões zero	14
3.2.18	Vazão máxima de referência ( $Q_5$ )	14
3.2.19	Vazão mínima de referência ( $Q_{95}$ )	14
3.2.20	Vazão máxima de referência normalizada ( $Q_{10}/Q_{50}$ )	14
3.2.21	Autocorrelação (Acorr)	14
4	BASE DE DADOS	15
4.1	Obtendo a base de dados	15
4.2	Visualizando a base de dados	16
4.3	Analisando os índices hidrológicos	21
4.3.1	Magnitude das vazões médias (G1)	21
4.3.2	Magnitude das vazões extremas (G2)	22
4.3.3	Sazonalidade de extremos (G3)	23
4.3.4	Variabilidade das vazões no tempo (G4)	24
5	Conclusão	27
6	Referências Bibliográficas	28

# 1 APRESENTAÇÃO

---

Este documento apresenta o Manual “IPH-ANA-HGE-SR-M2” do subprojeto “Regionalização de vazões via modelagem hidrológica”, no contexto do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, na forma de um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Neste Manual será apresentada a Base de Dados dos índices hidrológicos “IPH-ANA-HGE-SR-B2”, calculados a partir de vazões naturais estimados por modelagem hidrológica, para rios da América do Sul. A base de dados foi construída através da elaboração de mapas com os principais índices hidrológicos e de arquivo disponibilizados em plataforma *online* no formato ESRI *shapefile*. Mais detalhamentos metodológicos e análises dos índices hidrológicos de rios da América do Sul encontram-se no relatório “IPH-ANA-HGE-SR-R2”.

O estudo apresentado neste manual faz parte da dissertação de mestrado intitulada “Caracterização do Regime de Vazões Naturais de Rios da América do Sul Utilizando Modelagem Hidrológica” apresentada por Ribeiro (2021), desenvolvida no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), sob orientação do Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

## 2 INTRODUÇÃO

---

Os rios prestam importantes serviços ambientais relacionados à preservação e sustentação dos ecossistemas aquáticos. Possuem um papel importante no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas (Bunn and Arthington, 2002; Poff et al., 1997) e sustentam atividades humanas socioeconômicas como o abastecimento de água de cidades, navegação, suprimento para a indústria, agricultura e geração de energia elétrica. Os rios possuem características hidrológicas em seus regimes vazões que podem variar ao longo do tempo, em escala diária, mensal, sazonal e decadal. Essas características podem ser traduzidas através de índices hidrológicos. Neste contexto, compreender seu comportamento natural é importante para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos e para monitorar a preservação dos serviços ambientais e socioeconômicos.

Através da caracterização do regime de vazões utilizando índices hidrológicos, podemos analisar o comportamento dos rios, e regiões hidrográficas (Chagas et al., 2020; Siddiqui et al., 2021). Esses índices fornecem informações relevantes sobre o comportamento hidrológico, dando ferramentas para identificar padrões, processos dominantes e a sua intensidade e influência destas características de vazões nos ecossistemas aquáticos. A comunidade de gestão de recursos hídricos, em geral, utiliza os índices hidrológicos das vazões de referência (e.g. Q90, Q95, Q7,10) para a tomada de decisão. Alguns índices hidrológicos foram abordados por algumas comunidades de ecólogos como sendo os IHAs (Índices de Alteração Hidrológica), analisando a relação do regime de vazões com ecossistemas aquáticos. A comunidade científica dos hidrólogos vem utilizando índices hidrológicos como as assinaturas hidrológicas (e.g. índice de vazão de base, inclinação da curva de permanência das vazões, vazão média) como métricas para caracterizar e analisar o comportamento do regime de vazões dos rios.

Neste manual serão apresentados índices hidrológicos gerados para rios da América do Sul, uma base de dados com esses índices e como obter e visualizar esta base de dados. Os índices hidrológicos foram calculados a partir de séries de vazões obtidas através de modelagem hidrológica em escala continental, com resultados do Modelo de Grandes Bacias (MGB) apresentados por Siqueira et al. (2018).

### 3 METODOLOGIA

---

A metodologia para a obtenção dos índices hidrológicos está apresentada nos tópicos a seguir. Em suma, a metodologia consistiu no cálculo dos índices hidrológicos utilizando séries de vazões diárias estimadas por modelagem hidrológica. Posteriormente foi realizada a caracterização dos rios da América do Sul através do mapeamento e da análise dos índices hidrológicos. A partir disto foi criada uma base de dados dos índices hidrológicos e elaboração de mapas com os principais índices analisados.

#### 3.1 VAZÕES ESTIMADAS POR MODELAGEM HIDROLÓGICA

Foram utilizadas as vazões diárias estimadas para a América do Sul apresentadas por Siqueira *et al.* (2018) utilizando o modelo MGB, com período da simulação das séries de vazões estendido de janeiro de 1979 a dezembro 2014 utilizando dados de entrada da modelagem de precipitação do MSWEP v2.0 (Beck *et al.*, 2019). A base de dados das vazões simuladas por Siqueira *et al.* (2018) se encontram disponíveis no portal do site do HGE/IPH/UFRGS (<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/south-america-river-discharge-dataset/>).

As vazões foram obtidas em mm/dia para que os resultados pudessem ser comparados à estudos como os apresentados por Chagas *et al.* (2020), David *et al.* (2019) e Beck *et al.* (2013), além disso, facilita a comparação entre diferentes rios com diferentes áreas de contribuição, onde foi considerada a área da bacia de cada trecho de rio discretizado na modelagem.

A modelagem hidrológica realizada por Siqueira *et al.* (2018) utilizando o modelo MGB não considerou ações antrópicas como tomada d'água e reservatórios. Também não foram consideradas as mudanças climáticas e mudanças interdecadais nas séries de vazões. Sendo assim, as séries de vazões obtidas pelos autores representam as vazões naturais dos rios, em seu comportamento médio.

As vazões foram obtidas numa série contínua de 35 anos (compreendidos entre 1980 a 2014). Da mesma forma que considerado no trabalho de Siqueira *et al.* (2018), o primeiro ano de simulação disponibilizado (1979) foi descartado, para evitar erros relativos ao período de aquecimento do modelo hidrológico. Conforme apresentado por Siqueira *et al.* (2018), as séries geradas foram consideradas satisfatórias em termos de Nash-Sutcliffe e eficiência de Kling-Gupta, principalmente em grandes rios e áreas úmidas.

Na modelagem hidrológica da América do Sul, Siqueira *et al.* (2018) discretizaram a região em minibacias com 33 mil trechos de rios, com comprimento médio de 15 km. Desta forma, será possível caracterizar o regime de vazões em dezenas de milhares de locais.

#### 3.2 ÍNDICES HIDROLÓGICOS

Na obtenção dos índices hidrológicos, alguns foram calculados utilizando ano hidrológico de máximas (e.g. vazões máximas e elasticidade da vazão) e outros com ano hidrológico de mínimas (e.g. vazões mínimas, frequência de vazões mínimas). O cálculo dos índices hidrológicos foi realizado através da elaboração de rotinas programas em linguagem Python 3.7 e R, essas rotinas estão disponibilizadas no repositório do GITHUB:

[https://github.com/Larissacr/hydrological\\_signatures](https://github.com/Larissacr/hydrological_signatures). A separação dos anos hidrológicos foi realizada para cada trecho de rio analisado, conforme descrito a seguir.

Para a obtenção do mês de início dos anos hidrológicos foram obtidas as datas das vazões máximas/mínimas de cada um dos anos da série de vazões, após isso foi verificado qual o mês em que era mais frequente a ocorrência dessas vazões máximas/mínimas, obtendo para cada ano hidrológico a data da vazão mínima, posteriormente esse mês com maior frequência foi centralizado no ano hidrológico e o início do ano se dava 6 meses antes disso. Para exemplificar o ano hidrológico de mínimas, ilustrado na Figura 10, temos o exemplo de série de vazões com início em março e término em fevereiro, onde as vazões mínimas são centralizadas no ano hidrológico, no mês de agosto, para que toda a amplitude mínima de vazões seja captada.

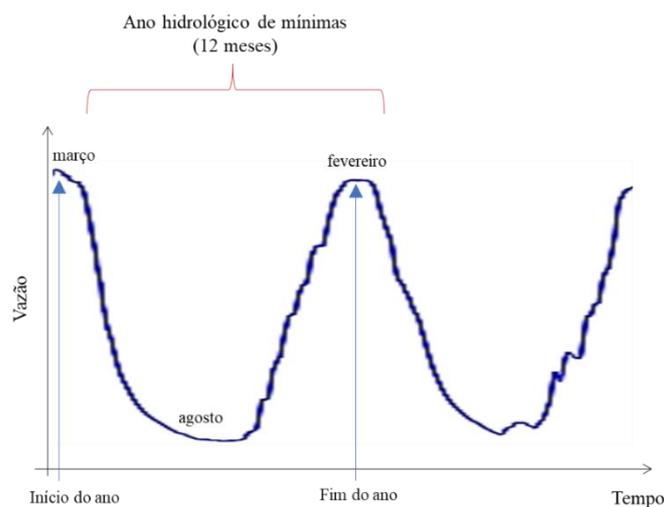


Figura 1. Exemplo de ano hidrológico de mínimas.

O ano hidrológico de máximas, ilustrado na Figura 2, para esse exemplo série de vazões, tem início em agosto e término em julho, onde as vazões máximas são centralizadas no ano hidrológico, no mês de fevereiro, para que toda sua amplitude máxima de vazões seja captada.

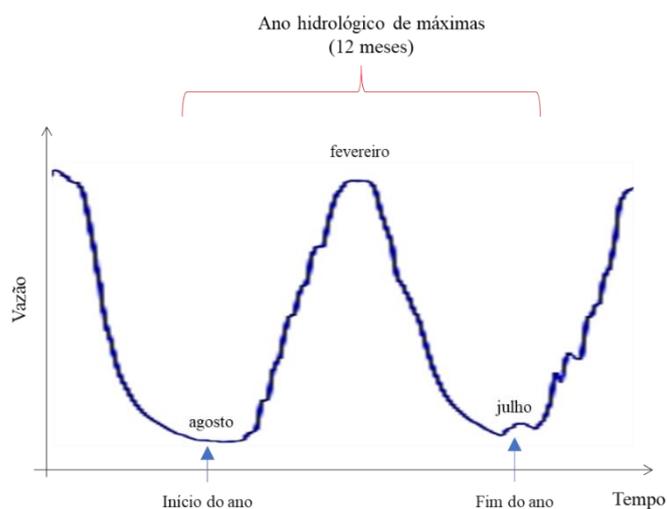


Figura 2. Exemplo de ano hidrológico de máximas.

Os índices hidrológicos calculados neste trabalho são descritos como 27 dos IHA, calculados de acordo com o manual do *software* Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 (The Nature

Conservancy, 2009) e para 15 destes IHA foram calculados o desvio padrão e coeficiente de variação. Também foram calculadas 16 assinaturas hidrológicas, resultando em 73 índices hidrológicos. Tanto os IHA quanto as assinaturas hidrológicas foram nomeadas como **índices hidrológicos** neste trabalho.

Para o cálculo dos índices de aridez e coeficiente de escoamento foram necessários dados de precipitação média diária, que foram obtidas do MSWEP v2.0 (Beck et al., 2019), e dados de evapotranspiração potencial, que foram obtidas da modelagem hidrológica com o MGB que gerou as séries de vazões estimadas, descritas no item 4.1 deste trabalho.

Todos os índices foram calculados para o período das séries de vazões simuladas e observadas de 1980 a 2014. Para a simplificação da visualização dos resultados, os índices hidrológicos foram categorizados em 4 grupos, como mostra na Tabela 1.

Nos tópicos a seguir será descrito como foi realizado o cálculo de cada um dos índices hidrológicos apresentados neste estudo.

Tabela 1. Índices hidrológicos separados em grupos (Adaptado de Black et al., 2005).

<b>Grupo</b>	<b>Índice hidrológico</b>
G1 - Magnitude das vazões médias	Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro Vazão média (Q <sub>m</sub> ) Coeficiente de Escoamento (RQP) Índice de Aridez (IA)
G2 - Magnitude das vazões extremas	Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias Índice de vazão de base (IQB) Frequência de vazões igual a zero Vazão máxima de referência Q <sub>5</sub> Vazão mínima de referência Q <sub>95</sub> Vazão máxima de referência normalizada Q <sub>10/Q50</sub> Frequência de vazões altas Duração de vazões altas Frequência de vazões baixas Duração de vazões baixas
G3 - Sazonalidade dos extremos	Data da vazão mínima Data da vazão máxima
G4 - Variabilidade das vazões no tempo	Taxa de ascensão Taxa de recessão Número de reversões Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC) Elasticidade da vazão (EQP) Índice de assimetria do hidrograma (s) Coeficiente de recessão da vazão de base (k) Autocorrelação (Acorr)

### 3.2.1 Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro

Para este índice foram calculadas as vazões médias diárias de todos os meses para cada ano da série de vazões e para cada trecho de rio, e depois calculada a média diária mensal de todos os anos. O resultado deste índice é uma vazão diária média do mês correspondente em mm/dia.

### 3.2.2 Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias

Para o cálculo destes índices as séries de vazões foram separadas utilizando anos hidrológicos de mínimas. O ano hidrológico é utilizado para que se tenha segurança de que a vazão mínima de um ano é independente da vazão mínima do ano anterior ou posterior. Foi calculado o início do ano hidrológico de mínimas para cada trecho de rio analisado. Estes índices são obtidos do cálculo de médias móveis das vazões mínimas diárias para 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias consecutivos. Foram calculados valores destes índices para cada ano hidrológico da série de vazões, obtendo então 35 valores (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente calculada a média desses 35 valores para cada índice. Para estes índices também foram calculados seus coeficientes de variação e desvio padrão. Os resultados destes índices são vazões diárias em mm/dia.

### 3.2.3 Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias

Para o cálculo destes índices as séries de vazões foram separadas utilizando anos hidrológicos de máximas. O ano hidrológico é utilizado para que se tenha segurança de que a vazão máxima de um ano é independente da vazão máxima do ano anterior ou posterior. Foi calculado o início do ano hidrológico de máximas para cada trecho de rio analisado. Estes índices são obtidos do cálculo de médias móveis das vazões máximas diárias para 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias consecutivos. Foram calculados valores destes índices para cada ano hidrológico da série de vazões, obtendo então 35 valores (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente calculada a média desses 35 valores para cada índice. Para estes índices também foram calculados seus coeficientes de variação e desvio padrão. Os resultados destes índices são vazões diárias em mm/dia.

### 3.2.4 Data da vazão mínima

Para este índice são calculadas as datas de ocorrência da vazão mínima com as séries de vazões do ano hidrológico de mínimas. As datas dessas vazões ocorrem com maior frequência no meio do ano hidrológico de mínimas, ou seja, se o ano hidrológico inicia em janeiro, a vazão mínima ocorre com mais frequência 6 meses depois, em julho. Estes índices indicam a previsibilidade das datas de ocorrência das vazões mínimas. Para que se possa efetuar o cálculo da data média de ocorrência da vazão mínima, as datas são transformadas para graus e após realizar as operações foram transformadas de volta para data, efetuando assim uma estatística circular. O resultado desse índice é o dia e o mês em que acontece a vazão mínima com mais frequência. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão. O desvio padrão é dado em dias/ano.

### 3.2.5 Data da vazão máxima

Para este índice são calculadas as datas de ocorrência da vazão máxima com as séries de vazões do ano hidrológico de máximas. Estes índices indicam a previsibilidade das datas de ocorrência das vazões máximas. Para que se possa efetuar o cálculo da data média de ocorrência da vazão máxima, as datas são transformadas para graus e após realizar as operações foram transformadas de volta para data, efetuando assim uma estatística circular. O resultado desse índice é o dia e o mês em que acontece a vazão máxima com mais frequência. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão. O desvio padrão é dado em dias/ano.

### 3.2.6 Taxa de ascensão

A taxa de ascensão foi considerada como a taxa média de acréscimo diário de vazão, em mm/dia. Foi calculada a média diária de acréscimo da vazão para cada ano hidrológico, obtendo assim 35 valores da taxa (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente foi calculada a média desses 35 valores. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão.

### 3.2.7 Taxa de recessão

A taxa de recessão foi considerada como a taxa média de decréscimo diário de vazão, em mm/dia. Foi calculada a média diária de decréscimo da vazão para cada ano hidrológico, obtendo assim 35 valores da taxa (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente foi calculada a média desses 35 valores. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão.

### 3.2.8 Número de reversões

O número de reversão das vazões é calculado considerando uma mudança na continuidade de acréscimo ou decréscimo da vazão de um dia para o outro, esse índice foi apresentado em dias/ano. Foi calculada a média anual do número de reversões da vazão para cada ano hidrológico, obtendo assim 35 valores deste índice (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente foi calculada a média desses 35 valores. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão.

### 3.2.9 Índice da vazão de base (IQB)

O índice da vazão de base é um indicativo de que a vazão de um rio é dependente ou não da vazão armazenada em aquífero e se a vazão pode sofrer muitas variações devido a taxa de evapotranspiração da bacia hidrográfica a qual pertence (Bosch et al., 2017). Altos valores deste índice podem indicar que a vazão do rio tem grande contribuição de aquífero e possuem respostas mais lentas a grandes eventos de chuva, sendo mais resiliente a períodos secos (Fan, 2015). Este índice foi estimado com base no filtro digital de Eckhardt (Eckhardt, 2005) com uma modificação apresentada no trabalho de Collischonn e Fan (2012), por meio da Equação 1, descrita a seguir:

$$IQB = \frac{Q_{90}}{Q_{50}} \quad (1)$$

onde IQB é o índice da vazão de base;  $Q_{90}$  Vazão referente ao 10º percentil da curva de permanência de vazões; e  $Q_{50}$  Vazão referente ao 50º percentil da curva de permanência de vazões.

### 3.2.10 Coeficiente de recessão da vazão de base (k)

É definida como a taxa de decaimento do da vazão de base (Vogel e Kroll, 1996), ou seja, esvaziamento do aquífero, calculada a partir de dados de vazões diárias como descrito por Beck et al. (2013). Altos valores de  $k$ , e baixos valores de IQB indicam que as bacias hidrográficas com alta demanda evaporativa seca mais rapidamente após eventos de chuva, resultando em vazões dominadas por eventos de curta duração (Beck et al., 2013), no geral quanto menor o valor de  $k$ , o escoamento tem grande contribuição da vazão superficial em períodos de seca e se “esvazia” rápido. Este índice é calculado através da Equação 2, descrita a seguir. Para este cálculo foram selecionadas apenas vazões com valores abaixo da  $Q_{90}$  (vazão referente ao 90º percentil da curva de permanência de vazões) e em trechos do hidrograma a partir de 5 dias seguidos de recessão das vazões.

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

onde  $k$  é o coeficiente de recessão da vazão de base;  $Q_i$  é a vazão diária no tempo  $t$ ; e  $Q_{i-1}$  é a vazão diária no tempo  $t-1$ .

### 3.2.11 Coeficiente de escoamento ( $R_{QP}$ )

O coeficiente de escoamento é definido como a razão da vazão média de longo prazo com a precipitação média de longo prazo. Este índice representa a separação do balanço hídrico a longo prazo entre a água liberada da bacia hidrográfica como vazão, evapotranspiração e outros processos. Quanto mais alto o valor desse índice, provavelmente maior é a porcentagem da chuva que entra no sistema e sai como escoamento, quanto menor, provavelmente a chuva que entra sai em grande parte como evapotranspiração ou infiltração. Para o cálculo do RQP foi utilizada a precipitação média diária do MSWEP v2.0 (Beck et al., 2019), e como as vazões estimadas pela modelagem hidrológica utilizando o MGB foram obtidas para cada trecho de rio acumulando as vazões à montante, foi necessária realizar a média da precipitação para cada trecho, ponderando pelas suas respectivas áreas de drenagem. Este índice é calculado através da Equação 3, descrita a seguir.

$$R_{QP} = \frac{Q}{P} \quad (3)$$

onde  $R_{QP}$  é o coeficiente de escoamento;  $Q$  é a vazão média de longo prazo; e  $P$  é a precipitação média de longo prazo.

### 3.2.12 Inclinação da curva de permanência das vazões ( $S_{FDC}$ )

A curva de permanência das vazões é a distribuição de probabilidades de fluxo ser maior ou igual a uma magnitude especificada. Para quantificar um índice de variabilidade de vazão, a inclinação da curva de permanência (SFDC) é calculada entre os 33% e 66% dos percentis de vazão, uma vez que em escala semi-logarítmica representa uma parte relativamente linear da curva de permanência das vazões e indica variabilidade das vazões (Yadav et al., 2007; Zhang et al., 2008; Sawicz et al., 2011). Altos valores desse índice sugerem vazões muito variáveis, causado por uma alta sazonalidade do regime de vazões ou por uma resposta rápida a eventos de precipitação (Yokoo and Sivapalan, 2011; McMillan et al., 2017). Este índice é calculado através da Equação 4.

$$S_{FDC} = \frac{\ln \ln (Q_{33\%}) - \ln \ln (Q_{66\%})}{(0,66 - 0,33)} \quad (4)$$

onde  $S_{FDC}$  é a inclinação da curva de permanência de vazões;  $Q_{33\%}$  é o valor da vazão no percentil de 33%; e  $Q_{66\%}$  é o valor da vazão no percentil de 66%.

### 3.2.13 Índice de assimetria do hidrograma (S)

Proposto por Fleischmann et al. (2016), este índice sugere que a assimetria do hidrograma é fortemente controlada pela relação entre vazão do rio e celeridade das ondas de inundação. Rios sem planícies de inundação geralmente possuem hidrogramas inclinados positivamente, obtendo valores de S positivos, enquanto rios com várzeas possuem hidrogramas negativamente distorcidos, obtendo valores de S negativos. Este índice é calculado através da Equação 5, descrita a seguir. Esse índice é obtido calculando a derivada da vazão para cada dia e separando as médias das derivadas positivas (ascensão do hidrograma) e derivadas negativas (recessão do hidrograma).

$$S = 1 - \frac{\text{recessão do hidrograma} \frac{|dQ|}{|dt|}}{\text{ascensão do hidrograma} \frac{|dQ|}{|dt|}} = 1 - \frac{\frac{1}{n_{neg}} \sum_{i=1}^{n_{neg}} \frac{|\Delta Q_{neg,i}|}{\Delta t}}{\frac{1}{n_{pos}} \sum_{i=1}^{n_{pos}} \frac{|\Delta Q_{pos,i}|}{\Delta t}} \quad (5)$$

onde S é o índice de assimetria do hidrograma;  $\Delta Q$  é o incremento de vazão entre dois dias consecutivos; n é o número de intervalos de tempo (dias); neg indica o número de intervalos de tempo em que  $\Delta Q$  é negativo; e pos indica o número de intervalos de tempo em que  $\Delta Q$  é positivo.

Se S for negativo (<0), a ascensão do hidrograma é mais lenta que a recessão e o hidrograma é negativamente assimétrico; se for igual a zero, o hidrograma é simétrico; e se > 0, a ascensão do hidrograma é mais rápida que a recessão (Fleischmann et al., 2016).

Fleischmann et al. (2016) ressaltam que este índice apresenta resultados mais concisos para bacias com hidrograma mais suaves, como em regiões de área alagada (e.g. Rio Amazonas, Rio Piquiri e Rio Paraguai).

### 3.2.14 Elasticidade da vazão ( $E_{QP}$ )

Este índice é um indicador da sensibilidade da vazão média anual a mudanças na precipitação média anual. Por exemplo, um valor de elasticidade da vazão de 2 indica que uma mudança de 1% na precipitação média anual gera uma mudança de 2% na vazão média anual (Sankarasubramanian et al., 2001), então, quanto maior o valor do EQP, mais sensível o regime de vazões é a precipitação média anual. Este índice pode ser calculado considerando a diferença interanual entre a vazão anual dividido pela diferença inter-anual entre a precipitação anual, que é então normalizada pelo escoamento a longo prazo (Sankarasubramanian et al., 2001; Sawicz et al., 2011), calculada através da Equação 6.

$$E_{QP} = \text{mediana} \left( \frac{Q_t - \underline{Q}}{P_t - \underline{P}} \cdot \frac{\underline{P}}{\underline{Q}} \right) \quad (6)$$

onde  $E_{QP}$  é a elasticidade de vazão;  $Q_t$  é o valor da vazão no tempo  $t$ ;  $\underline{Q}$  é o valor da vazão média anual;  $P_t$  é a precipitação no tempo  $t$ ; e  $\underline{P}$  é a precipitação média anual.

### 3.2.15 Índice de aridez (IA)

Este índice foi desenvolvido por Thornthwaite (1948) e posteriormente complementado por Penman (1953), onde apresenta a relação entre a umidade disponível provinda da precipitação e a umidade que sai da bacia através de evapotranspiração, é uma avaliação se o que entra de precipitação no balanço hídrico é o suficiente para manter a demanda d'água em vista do que é evaporado. A evapotranspiração e precipitação foram calculadas para cada minibacia onde se localizam os trechos de rios, delimitados pela modelagem hidrológica utilizando o MGB (Siqueira et al., 2018). Valores altos do índice de aridez representam rios em regiões mais árida. Esta relação é calculada através da Equação 7.

$$IA = \frac{ETP}{\underline{P}} \quad (7)$$

onde IA é o índice de aridez;  $\underline{P}$  é a precipitação média anual; e ETP é a evapotranspiração potencial média anual.

### 3.2.16 Vazão média ( $Q_m$ )

Este índice representa a vazão média mensal. Para o cálculo deste índice, é realizada a aplicação de média aritmética para a série histórica de vazões, como mostra na Equação (8):

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (8)$$

onde  $Q_m$  é a vazão média;  $Q$  é a vazão diária; e  $N$  é o número de dias da série temporal de vazões.

### 3.2.17 Frequência e duração de vazões altas, baixas e vazões zero

O índice da frequência de vazões altas foi obtido através do cálculo da frequência média anual com que as vazões ultrapassaram 9 vezes o valor da vazão média diária e sua duração foi calculada com a contagem de dias no ano em que essa vazão média foi superada 9 vezes. Para a frequência de vazões baixas foi através do cálculo da frequência média anual com que as vazões ficaram abaixo 0.2 vezes o valor da vazão média diária e sua duração foi calculada com a ocorrência de dias consecutivos no ano em que isto ocorreu. No cálculo da frequência de vazões igual a zero, foi calculada a frequência média anual com que as vazões fossem iguais a 0. Os valores de 9 vezes o valor da vazão média diária para vazões altas e 0,2 vezes para vazões baixas foram estimados através da metodologia apresentada por Addor et al. (2017), que foi seguida para o cálculo deste índice.

### 3.2.18 Vazão máxima de referência ( $Q_5$ )

Obtido pela curva de permanência da série histórica das vazões, correspondente ao 5º percentil. É uma vazão máxima, utilizada para caracterizar vazões altas, estimadas através da vazão com permanência de 5%, ou seja, aquela igualada ou superada em 5% do tempo, de acordo com a série histórica de vazões (Câmara, 2003).

### 3.2.19 Vazão mínima de referência ( $Q_{95}$ )

Obtido pela curva de permanência da série histórica das vazões, correspondente ao 95º percentil. É uma vazão mínima, utilizada para caracterizar vazões baixas, estimadas através da vazão com permanência de 95%, ou seja, aquela igualada ou superada em 95% do tempo, de acordo com a série histórica de vazões (Câmara, 2003).

### 3.2.20 Vazão máxima de referência normalizada ( $Q_{10}/Q_{50}$ )

Vazão referente ao 10º percentil da curva de permanência normalizado pela vazão mediana da série de dados. É uma vazão máxima, utilizada para caracterizar vazões altas, estimadas através da vazão com permanência de 10%, ou seja, aquela igualada ou superada em 10% do tempo. Este índice será normalizado pela vazão média  $Q_{50}$ , assim como realizado por Sawicz et al. (2014) e David et al. (2019).

### 3.2.21 Autocorrelação (Acorr)

A autocorrelação de séries de vazões representa o quanto as vazões são correlacionadas entre seus valores, numa determinada distância temporal. A medida em que a distância temporal é aumentada na análise, espera-se que o valor de autocorrelação diminua, ou seja, provavelmente as vazões de um determinado dia são mais similares às vazões do dia anterior ou posterior do que as vazões 60 dias antes ou depois. Para este índice foi calculada a autocorrelação das vazões com uma distância temporal de 365 dias entre as vazões. Dessa forma é possível verificar a sazonalidade e previsibilidade das vazões.

Este índice foi calculado através de script na linguagem Python 3.7, disponibilizado no repositório do GITHUB: [https://github.com/Larissacr/hydrological\\_signatures](https://github.com/Larissacr/hydrological_signatures), onde foi utilizada

a biblioteca `statsmodels.tsa.stattools.acf`, com base nos estudos de Parzen (1963) e Brockwell e Davis (2016).

## 4 BASE DE DADOS

---

Para a base de dados foi elaborado um arquivo ESRI *shapefile* (arquivo “IPH-ANA-HGE-SR-B2”) com **trechos de rios discretizados na modelagem hidrológica realizada com o MGB-SA**, de comprimento médio de 15 km, da América do Sul e seus respectivos **73 índices hidrológicos** como seus atributos. Esta base de dados pode nos dar uma visão espacial das características do regime de vazões dos rios, inclusive de rios que ainda não têm esse tipo de informação hidrológica disponibilizada.

### 4.1 OBTENDO A BASE DE DADOS

A base de dados encontra-se disponível para download no portal do grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala (HGE) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS, através do link [https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos-hydrologic\\_indices\\_sa/](https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos-hydrologic_indices_sa/) (Figura 3).

Ao acessar o link acima, para fazer o download do arquivo ESRI *shapefile* dos índices hidrológicos basta clicar no texto indicado no site “Índices Hidrológicos da América do Sul”, assim o navegador abrirá uma página do Google Drive onde é possível clicar na pasta dos Índices Hidrológicos e selecionar para fazer o download dessa pasta.

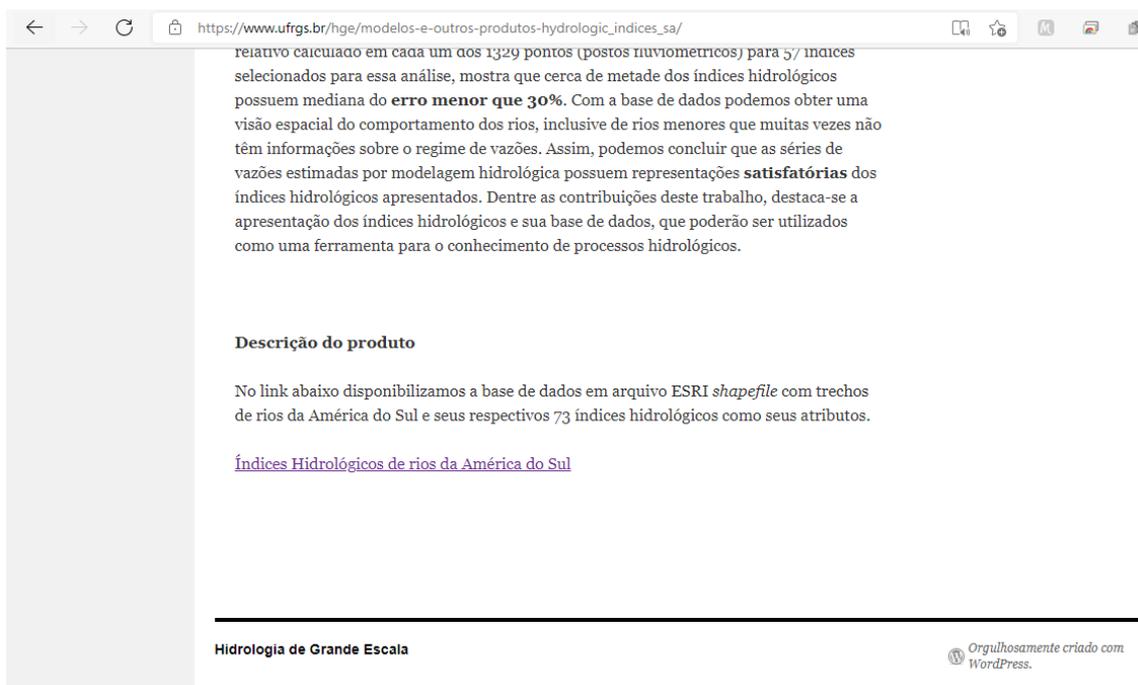


Figura 3. Acessando a página de download da base de dados dos Índices hidrológicos.

Com a pasta com o arquivo dos índices hidrológicos, em formato comprimido com extensão “.rar”, você precisará descompactar a pasta de arquivos para ter acesso ao arquivo em formato ESRI *shapefile*. Após isto, o arquivo ESRI *shapefile* intitulado “SA\_hydrologic\_indices\_v03.shx” pode ser visualizado utilizando um software GIS, como QGIS ou ArcGIS. Neste exemplo iremos utilizar o software livre QGIS 3.16.3.

## 4.2 VISUALIZANDO A BASE DE DADOS

Para a visualização do arquivo ESRI *Shapefile* dos índices hidrológicos de rios da América do Sul é necessário executar o software QGIS e selecionar a opção “Open Data Source Manager” (Figura 4).

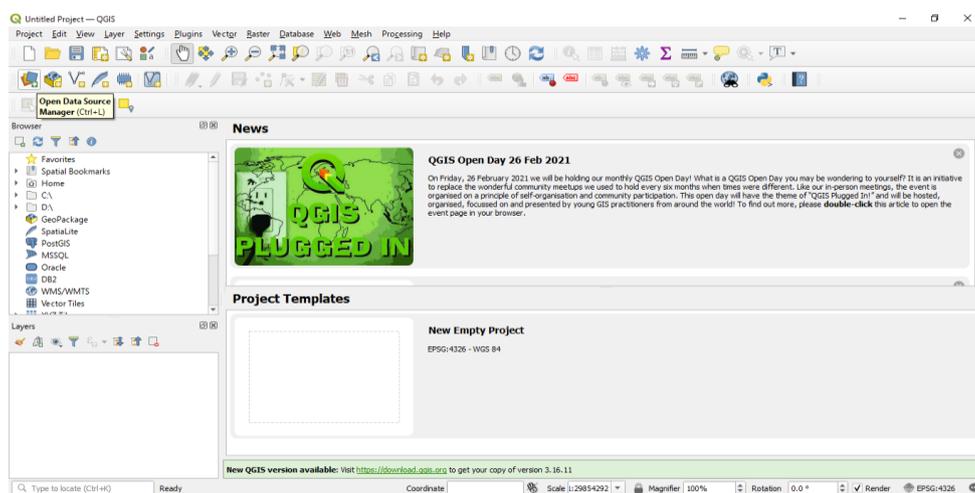


Figura 4. Utilizando o software QGIS para a visualização do arquivo ESRI *Shapefile* dos índices hidrológicos.

Após isto, selecione a opção “Vector” e na aba “Source” localize e selecione o arquivo com formato “SA\_hydrologic\_indices\_v03.shx” e pressione “Add” (Figura 5).

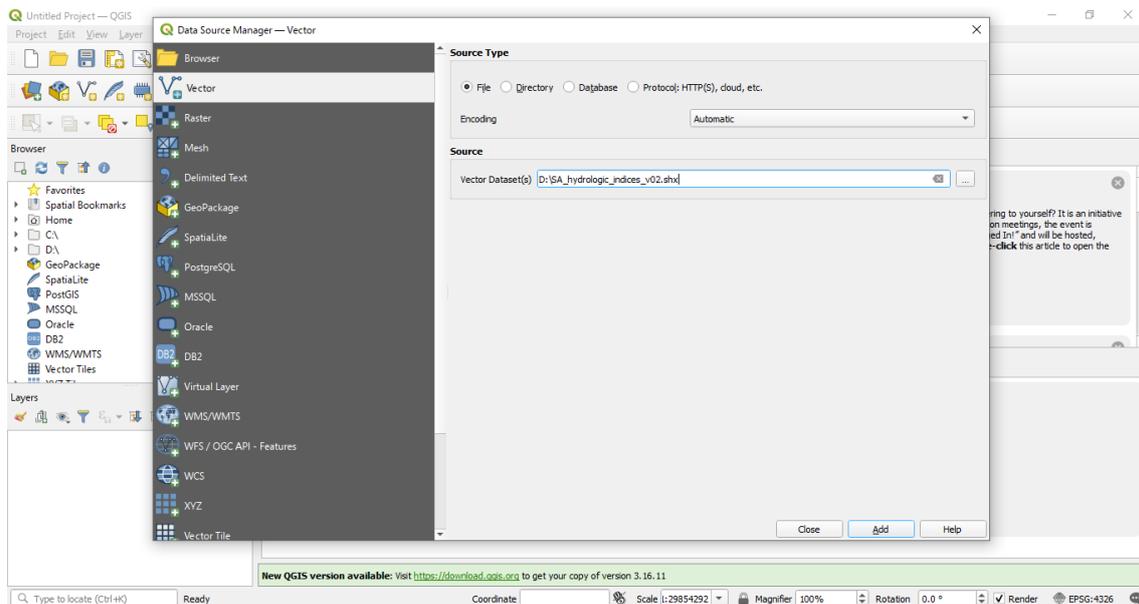


Figura 5. Abrindo o do arquivo ESRI Shapefile dos índices hidrológicos.

Com isto, o arquivo vetorial ESRI shapefile dos índices hidrológicos de rios da América do Sul estarão dispostos para visualização. Para visualizar as informações contidas em cada trecho de rio, pode ser acessada a tabela de atributos do arquivo (Figura 6).

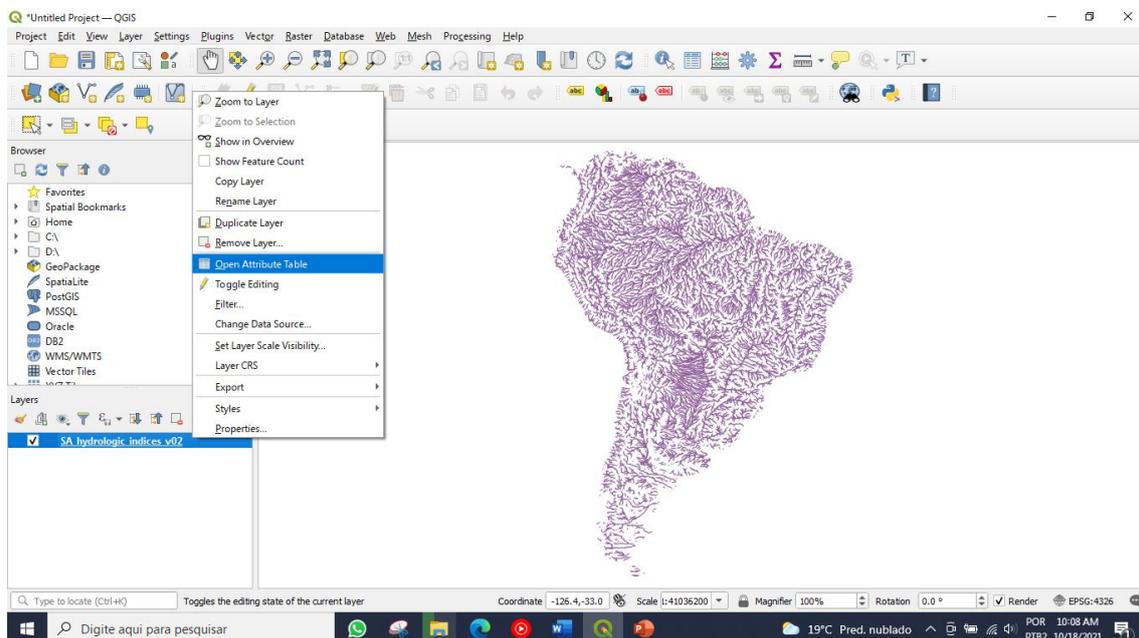


Figura 6. Opção para visualizar a tabela de atributos do arquivo ESRI shapefile dos índices hidrológicos.

Com a tabela de atributos aberta, podemos visualizar suas colunas, onde cada uma delas corresponde a um determinado índice hidrológico. Cada linha da tabela representa um trecho de rio correspondente (Figura 7).

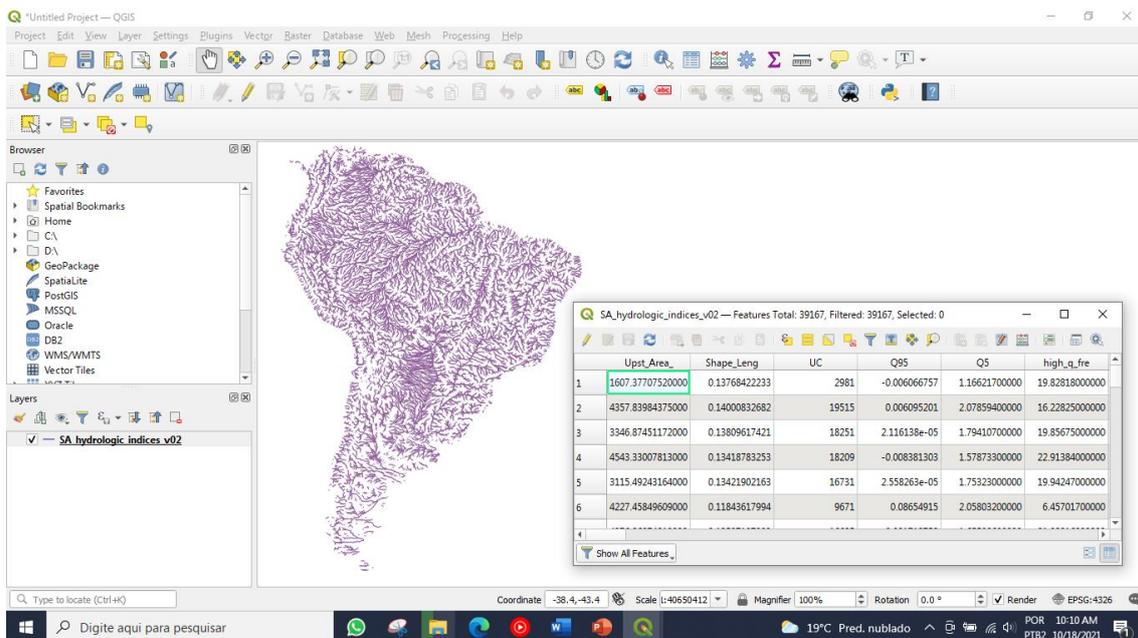


Figura 7. Visualizando a tabela de atributos do arquivo ESRI shapefile dos índices hidrológicos.

Para visualizar os índices hidrológicos de um rio em específico, basta aproximar-se do rio com a ferramenta de zoom e selecioná-lo clicando no rio com a ferramenta “Identify Features” (Figura 8).

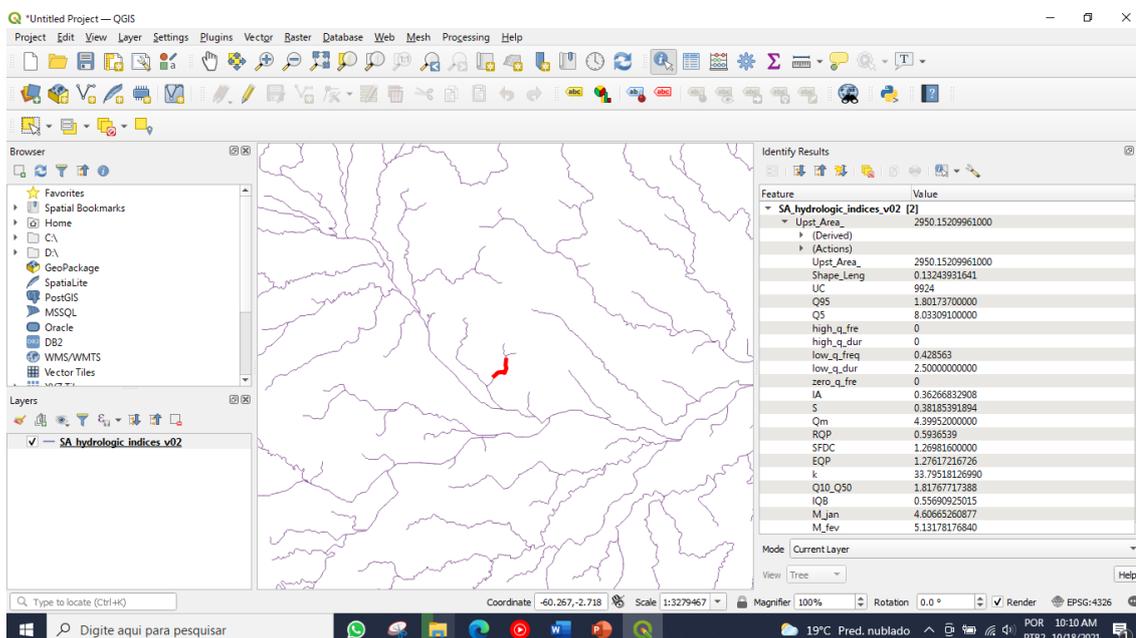


Figura 8. Visualizando os índices hidrológicos de um trecho de rio selecionado.

As Tabela 2 e Tabela 3 apresentam as descrições dos conteúdos das colunas de características da tabela de atributos do ESRI *shapefile* dos índices hidrológicos dos rios da América do Sul.

Tabela 2. Descrição dos conteúdos das colunas de características da tabela de atributos do ESRI shapefile dos índices hidrológicos dos rios da América do Sul.

<b>Upst_Area_</b>	Área de drenagem do trecho de rio	km <sup>2</sup>
<b>Shape_Leng</b>	Comprimento do trecho de rio	km
<b>UC</b>	Minibacia correspondente da discretização da modelagem hidrológica	-
<b>Valores -9999999</b>	Valores de substituição onde não foram obtidos índices hidrológicos	-

Tabela 3. Descrição dos conteúdos das colunas de índices da tabela de atributos do ESRI shapefile dos índices hidrológicos dos rios da América do Sul.

<b>Sigla</b>	<b>Índice Hidrológico</b>	<b>Unidade</b>
Qm	Vazão média diária	mm/dia
RQP	Coefficiente de Escoamento	-
SFDC	Inclinação da curva de permanência das vazões	-
Q95	Vazão mínima de referência Q95	mm/dia
Q5	Vazão máxima de referência Q5	mm/dia
high_q_freq	Frequência de vazões altas	dias/ano
high_q_dur	Duração de vazões altas	dias
low_q_freq	Frequência de vazões baixas	dias/ano
low_q_dur	Duração de vazões baixas	dias
zero_q_freq	Frequência de vazões igual a zero	%
K	Coefficiente de recessão da vazão de base	-
IA	índice de aridez (evapo/precip)	-
S	índice de assimetria do hidrograma	-
IQB	Índice de vazão de base	-
EQP	Elasticidade da vazão	-
Q10_Q50	Vazão máxima de referência Q10 normalizada pela vazão média Q50	-
M_jan, M_fev,..., M_dez	Vazão média diária para cada mês	mm/dia

E_1_1, E_1_3, ..., E_1_90	Vazão mínima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_1_1_D, E_1_3_D, ..., E_1_90_D	Desvio padrão da Vazão mínima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_1_1_CV, E_1_3_CV, ..., E_1_90_CV	Coeficiente de variação da Vazão mínima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	-
E_2_1, E_2_3, ..., E_2_90	Vazão máxima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_2_1_D, E_2_3_D, ..., E_2_90_D	Desvio padrão da Vazão máxima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_2_1_CV, E_2_3_CV, ..., E_2_90_CV	Coeficiente de variação da Vazão máxima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	-
T_1	Data da vazão mínima	data
T_1_D	Desvio padrão da Data da mínima	dia
T_1_CV	Coeficiente de variação da Data da mínima	-
T_2	Data da vazão máxima	data
T_2_D	Desvio padrão da Data da máxima	dia
T_2_CV	Coeficiente de variação da Data da máxima	-
G_1	Taxa de ascensão	mm/dia
G_1_D	Desvio padrão da Taxa de ascensão	mm/dia
G_1_CV	Coeficiente de variação da Taxa de ascensão	-
G_2	Taxa de recessão	mm/dia
G_2_D	Desvio padrão da Taxa de recessão	mm/dia
G_2_CV	Coeficiente de variação da Taxa de recessão	-
G_3	Número de reversões	dias/ano
G_3_D	Desvio padrão do Número de reversões	dia
G_3_CV	Coeficiente de variação do Número de reversões	-
AnoH_Min	Mês de início do ano hidrológico de mínimas	data
AnoH_Max	Mês de início do ano hidrológico de máximas	data
Acorr	Autocorrelação	-

### 4.3 ANALISANDO OS ÍNDICES HIDROLÓGICOS

Uma breve visualização e interpretação dos resultados para índices hidrológicos, separados por grupos G1, G2, G3 e G4, serão apresentadas nos tópicos a seguir. Foram selecionados apenas alguns índices para esta apresentação, todos os outros índices se encontram no arquivo da base de dados.

#### 4.3.1 Magnitude das vazões médias (G1)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de magnitude das vazões médias estão apresentados na Figura 9.

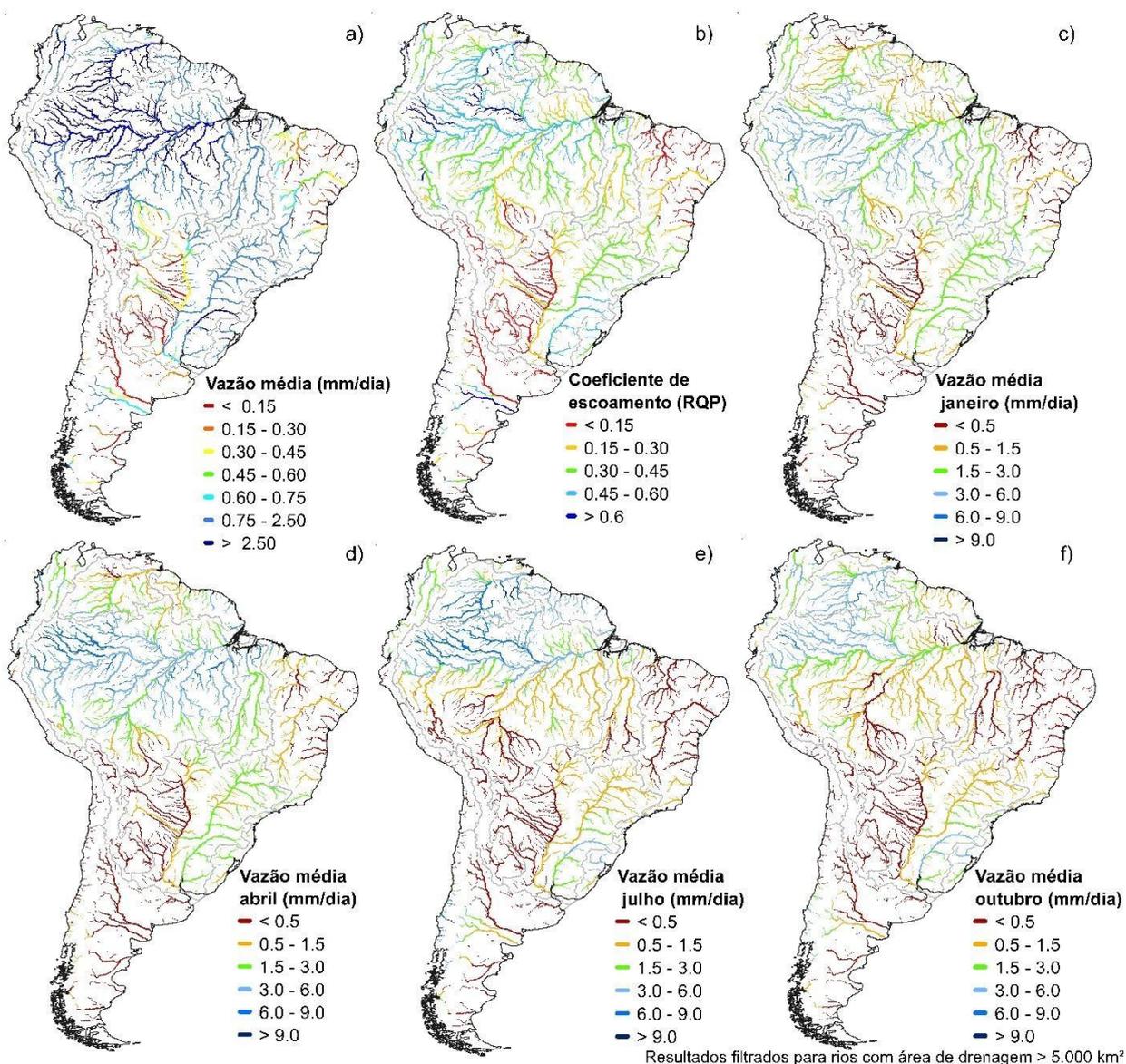


Figura 9. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões médias (G1).

Os resultados da vazão média podem ser visualizados na Figura 9a, onde em geral, as maiores vazões médias são encontradas nas cabeceiras (devido a vazão ser obtida em mm considerando assim a área de drenagem de cada trecho de Rio) dos afluentes do Rio Amazonas e uma das menores na região nordeste, no Rio Parnaíba. Este índice pode estar diretamente relacionado ao índice pluviométrico.

O coeficiente de escoamento (RQP) é apresentado na Figura 9b. Em geral, nas regiões mais úmidas obtemos maiores valores deste índice e em regiões mais áridas obtemos valores menores do RQP. No Rio São Francisco temos que o RQP diminui de montante para jusante, sendo maior em sua cabeceira do que em sua foz, isso pode ser devido a transição da zona climática em que o rio se localiza.

Nas vazões médias mensais apresentadas na Figura 9c, d, e e f, as vazões têm magnitudes diferentes ao longo dos meses e variam de acordo com o regime das chuvas mensais da região em que se encontram.

#### 4.3.2 Magnitude das vazões extremas (G2)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas estão apresentados na Figura 10.

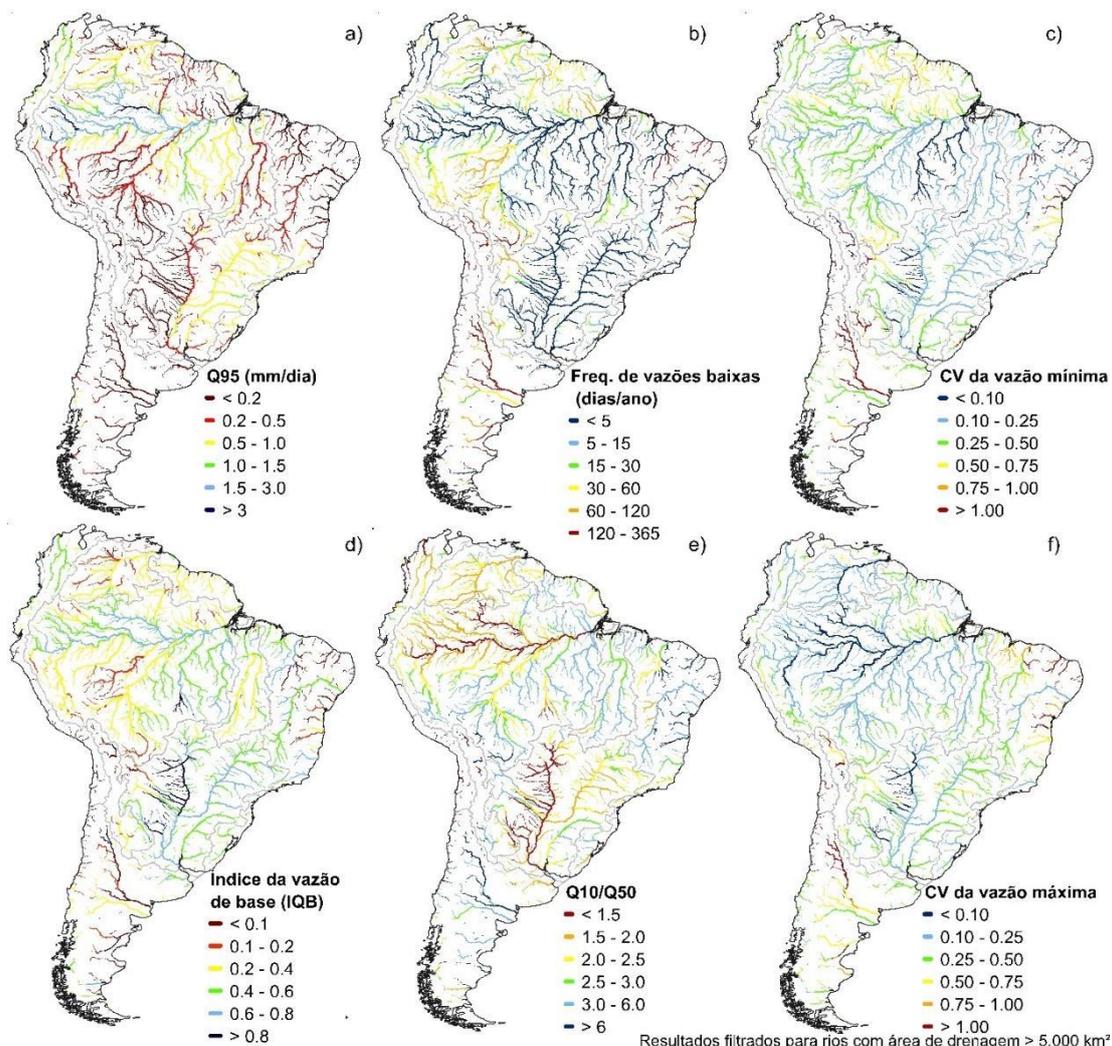


Figura 10. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas (G2).

Na análise dos resultados obtidos da vazão de referência mínima  $Q_{95}$  (Figura 10) este índice pode estar relacionado ao índice pluviométrico e zona climática da região. Quanto menor o índice pluviométrico e a região onde a bacia que o rio se localiza é mais árida, menor é a  $Q_{95}$ .

Para a frequência de vazões baixas, representada na Figura 10b, temos que este índice indica quantas vezes no ano ocorre, em média, vazões baixas (menores que 0,2 vezes abaixo da vazão média). Rios com valores baixos deste índice podem indicar que possuem vazões regularizadas, ou que a diferença da vazão média para as vazões mais baixas registradas no ano seja numa proporção maior que 20%.

O coeficiente de variação da vazão mínima (Figura 10c) representa o quanto a menor vazão média de 1 dia pode variar ao longo dos anos, quanto maior este índice provavelmente será mais difícil de estabelecer um panorama de situação de escassez hídrica.

A Figura 10d mostra a variabilidade espacial do Índice de Vazão de Base (IQB). Valores mais elevados do IQB podem indicar rios com alta contribuição da vazão de base em suas vazões. Analisando os resultados, este índice tem um comportamento inverso ao índice  $Q_{10}/Q_{50}$ , quanto menor a  $Q_{10}/Q_{50}$ , maior o IQB. Este índice também é negativamente correlacionado com o índice de inclinação da curva de permanência de vazões.

O coeficiente de variação da vazão máxima (Figura 10f) apresenta um comportamento inverso do índice  $Q_{10}/Q_{50}$ , representando provavelmente maior incerteza em previsão de vazões de cheias.

#### 4.3.3 Sazonalidade de extremos (G3)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de sazonalidade de extremos estão apresentados na Figura 11.

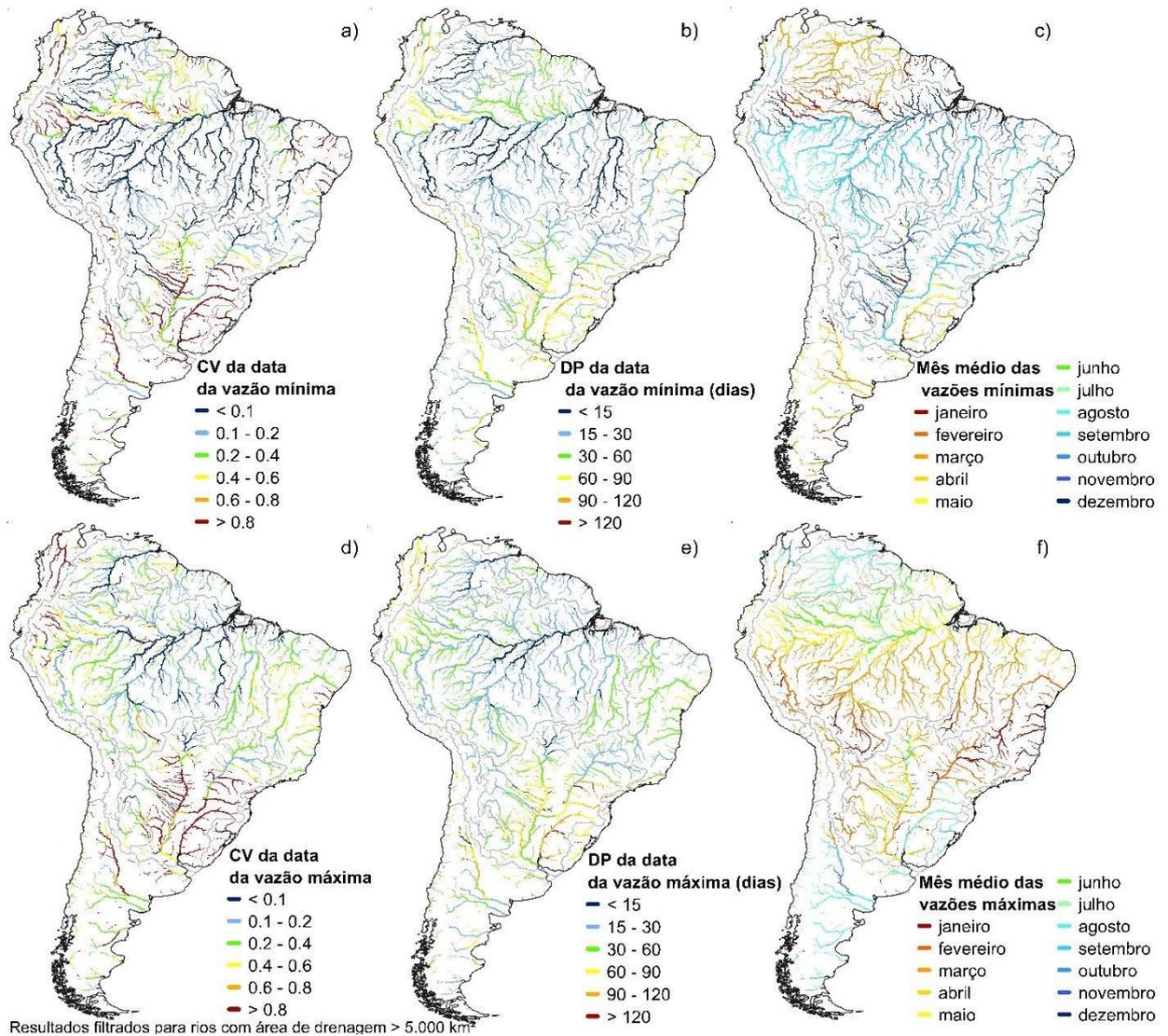


Figura 11. Índices hidrológicos do grupo sazonalidade de extremos (G3).

Neste grupo de índices obtemos o coeficiente de variação e o desvio padrão das datas em que ocorrem com mais frequência a vazão mínima (Figura 11a e 19d) a vazão máxima (Figura 11b e 19e). Estes índices indicam a previsibilidade das datas de ocorrência das vazões máximas e mínimas. Quanto maior o desvio padrão e o coeficiente de variação nesses índices, mais imprevisível se torna a data das vazões mínimas e máximas. Na Figura 11c e 19f estão apresentados os mapas dos meses em que ocorrem com mais frequência as vazões mínimas/máximas.

#### 4.3.4 Variabilidade das vazões no tempo (G4)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de variabilidades das vazões no tempo estão apresentados na Figura 12.

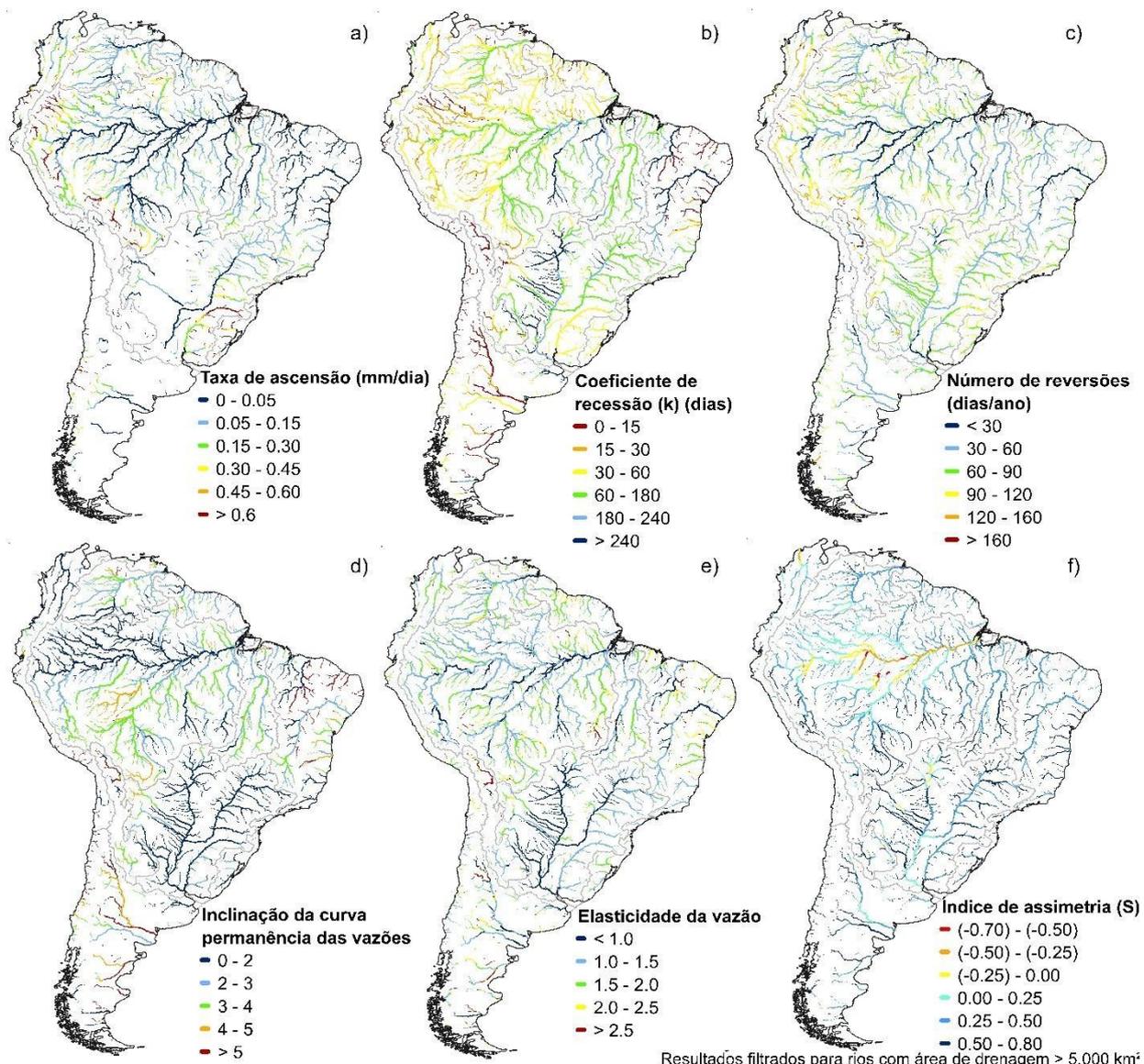


Figura 12. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4).

Nos índices de taxas de ascensão (Figura 12a) temos que a maioria dos rios representados possuem menos variação quanto as mudanças diárias no aumento das vazões. Rios que podem ser destacados com maiores variações são o Rio Uruguai (principalmente em sua cabeceira) e o Rio Branco, no estado de Roraima.

Na Figura 12b são apresentados os resultados do índice do coeficiente de recessão (k). Algumas regiões com o valor de k alto possuem potencialidade hídrica alta, como o Rio Juruena e alguns afluentes do Rio São Francisco. Valores altos deste índice podem indicar que os rios possuem esvaziamento lento do aquífero de contribuição das vazões. Este índice tem uma correlação positiva com o índice IQB, que foi apresentado na Figura 10d.

O índice do número de reversões, apresentado na Figura 12c, representa uma mudança no de acréscimo ou decréscimo das vazões dos rios. Se compararmos os do Rio Amazonas, que obteve valores baixos deste índice ( $< 30$  dias/ano), com o do Rio Uruguai, que obteve valores mais altos (entre 60 e 90 dias/ano), no hidrograma do Rio Uruguai temos mais variações abruptas das vazões em relação ao hidrograma do Rio Amazonas.

Valores altos do índice inclinação da curva de permanência de vazões (Figura 12d) podem se relacionar com valores baixos do índice IQB, indicando regiões hidrográficas de resposta rápida, como no Rio Purus e no Rio Gurgéia (afluente do Rio Parnaíba). Este índice também pode se correlacionar negativamente com o índice Q10/Q50, em muitos rios como o Rio Amazonas, Rio Uruguai, Rio Paraguai, Rio Paraná, Rio Negro, entre outros.

No índice de elasticidade da vazão (Figura 12e) temos que quanto maior o valor deste índice, uma pequena variação da chuva gera uma grande variação na vazão. Este índice pode possuir uma correlação positiva com o índice da inclinação da curva de permanência de vazões, como nos rios Uruguai, Rio Paraguai, Rio Paraná e Rio Amazonas.

Na Figura 12f são apresentados os resultados do índice de assimetria do hidrograma. Quanto menor o valor desse índice (próximos e abaixo de 0), maior o indicativo de ser uma região com planícies inundáveis. Nos rios Amazonas, Rio Purus e Rio Cuiabá temos índices de assimetria do hidrograma menores que 0 e em seus temos a assimetria negativa.

Na figura Figura 13 está apresentado o índice de Autocorrelação (Acorr). Através da figura temos em destaque efeitos de clima mais ou menos sazonal na região dos rios. Temos o efeito destacado da extensão do rio, onde rios extensos tendem a ter um comportamento com autocorrelação maior do que rios curtos. Além de destacar áreas inundáveis, onde por exemplo, o Rio Araguaia passa de verde para azul logo após a grande extensão inundável. O sul da Amazônia, em geral, é sazonal, mas podemos destacar como Rio Purus e Rio Juruá ficam ainda mais correlacionados por causa da planície de inundações, em comparação com o Rio Xingu.

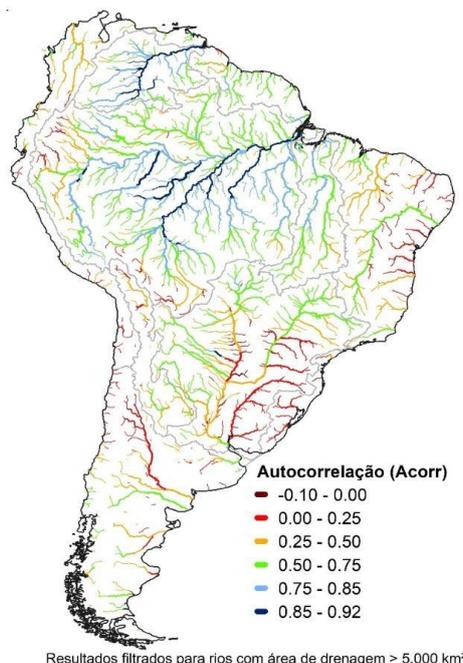


Figura 13. Índice hidrológico de Autocorrelação (Acorr).

## 5 CONCLUSÃO

---

Este manual apresenta a base de dados dos índices hidrológicos da América do Sul, calculados a partir de séries de vazões estimadas por modelagem hidrológica continental utilizando o modelo MGB-AS.

Os resultados obtidos para a análise dos índices hidrológicos nos permitiram observar padrões de comportamento do regime de vazões dos rios, relacionados como por exemplo a clima e hidrogeologia, além de relações entre os índices, por exemplo o índice de vazão de base (IQB) tem uma correlação negativa ao índice de vazão máxima de referência normalizada  $Q_{10}/Q_{50}$ , e como o índice do coeficiente de recessão (k) e o índice IQB se relaciona com as regiões de alta potencialidade hídrica.

Para a base de dados foi elaborado um arquivo ESRI *shapefile* com trechos de rios, de comprimento médio de 15 km, da América do Sul e seus respectivos 73 índices hidrológicos como seus atributos. Esta base de dados pode nos dar uma visão espacial das características do regime de vazões dos rios. A base de dados encontra-se disponível para download no portal do grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala (HGE) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS, através do link [https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos-hydrologic\\_indices\\_sa/](https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos-hydrologic_indices_sa/).

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Addor, N., Newman, A. J., Mizukami, N., and Clark, M. P. *The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 5293–5313, 2017.
- Almeida, Rafael Alvarenga et al. *Precipitação pluvial média mensal e anual nas regiões político-*
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Miralles, D. G., de Jeu, R. A. M., Sampurno Bruijnzeel, L. A., McVicar, T. R., & Schellekens, J. *Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments*. *Water Resources Research*, 49(12), 7843–7863. 2013. doi:10.1002/2013wr013918.
- Beck, Hylke E. et al. *MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 100, n. 3, p. 473-500, 2019.
- Black, A. R. et al. *DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 15, n. 5, p. 427-446, 2005.
- Bosch, D.D., Arnold, J.G., Allen, P., Lim, K., Shik, Y., 2017. *Temporal variations in baseflow for the Little River Experimental Watershed in South Georgia, USA*. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 10, 110-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.02.002>.
- Brockwell, P. J., Brockwell, P. J., Davis, R. A., & Davis, R. A. (2016). *Introduction to time series and forecasting*. Springer.
- Bunn, Stuart E.; Arthington, Angela H. *Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity*. *Environmental management*, v. 30, n. 4, p. 492-507. 2002.
- Câmara, A. C. F. C. *Análise da vazão máxima autorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB)*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS, Porto Alegre - RS. 219 p. 2003.
- Chagas, V. B., Chaffe, P. L., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C., & Siqueira, V. A. *CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil*. <https://doi.org/10.5194/essd-2020-67>. 2020.
- Collischonn, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Tese de doutorado, IPH-UFRGS. 277p. 2001.
- Collischonn, W.; Allasia, D.; Da Silva, B.C.; Tucci, C.E.M. *The mgb-iph model for large-scale rainfall—runoff modelling*. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), pp. 878–895. 2007.
- David, P. C., D. Y., Chagas, V. B. P., Luiz, P., & Chaffe. *Uso De Assinaturas Hidrológicas Para Classificação De Bacias Hidrográficas Do Brasil*. XXIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos. 2019.
- Eckhardt K. 2005. *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*. *Hydrological Processes* 19: 507–515. DOI:10.1002/hyp.5675

- EPE. *Plano Nacional De Energia – PNE 2030*. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>. Acesso em 17 de junho de 2021.
- Fan, F. M., Collischonn, W., Quiroz, K. J., Sorribas, M. V., Buarque, D. C., and Siqueira, V. A. 2016. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates, *J. Flood Risk Manag.*, 9, 278–288, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12177>, 2016.
- Fan, Y.: *Groundwater in the Earth's critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes: Groundwater at large scales*. *Water Resour. Res.*, 51(5), 3052–3069, doi:10.1002/2015WR017037, 2015.
- Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., & Pontes, P. R. M. *On river-floodplain interaction and hydrograph skewness*. 2016. *Water Resources Research*, 52(10), 7615–7630. doi:10.1002/2016wr019233
- Junk WJ. 2007. *Freshwater fishes of South America: their biodiversity, fisheries, and habitats: a synthesis*. *Aquatic Ecosystem Health & Management* 10: 228–242.
- Mcmillan, H.; Westerberg, I.; Branger, F. *Five guidelines for selecting hydrological signatures*. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 26, p. 4757–4761. 2017.
- Parzen, E., 1963. On spectral analysis with missing observations and amplitude modulation. *Sankhya: The Indian Journal of Statistics, Series A*, pp.383-392.
- Penman, A. D. M. *Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression*. *Geotechnique*, 3(8), 312-328. 1953.
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks, and J. C. Stromberg. 1997. *The natural flow regime*. *BioScience* 47:769–784
- Ribeiro, Larissa de Castro. *Caracterização do Regime de Vazões Naturais de Rios da América do Sul Utilizando Modelagem Hidrológica*. 2021. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F. *Climate elasticity of streamflow in the United States*. 2001. *Water Resources Research*, 37(6), 1771-1781.
- Siddiqui, Sharmin F. et al. *Classifying flow regimes of the Amazon basin*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 31, n. 5, p. 1005-1028, 2021.
- Siqueira, V. A. et al. *Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America*. *Hydrology and Earth System Sciences*. Göttingen: Copernicus. Vol. 22, n. 9 (set. 2018), pp. 4815-4842. 2018.
- Sivapalan, Murugesu. *Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology*. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 15, p. 3163-3170. 2003.
- The Nature Conservancy. *Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual*. 2009.

- Thornthwaite, C. W. *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical review, 38(1), 55-94. 1948.
- Vogel, R. M., & Kroll, C. N. *Estimation of baseflow recession constants*. Water resources management, 10(4), 303-320. 1996.
- Yadav, M., Wagener, T., and Gupta, H. *Regionalization of constraints on expected watershed response*, Adv. Water Resour., 30, 1756–1774. 2007.
- Yang, Xue et al. *Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions*. Journal of Hydrology, v. 582, p. 124357. 2020.
- Yokoo, Y., & Sivapalan, M. (2011). *Towards reconstruction of the flow duration curve: development of a conceptual framework with a physical basis*. Hydrology and Earth System Sciences, 15(9), 2805-2819.
- Zhang, Z., Wagener, T., Reed, P., and Bhushan, R. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices regionalization and multiobjective optimization, Water Resour. Res., 44, W00B04, 2008. doi:10.1029/2008WR006833.