

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

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

**RELATÓRIO TÉCNICO: AVALIAÇÃO DO
MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA COM
DOADOR ÚNICO EM POSTOS
FLUVIOMÉTRICOS DO BRASIL**

IPH-ANA-HGE-SR-R6

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Avaliação do método da vazão específica com doador único em postos fluviométricos do Brasil



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: Mino Viana Sorribas, Walter Collischonn, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

COMO CITAR: Sorribas, M. V., Collischonn, W., Paiva, R. C. D., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: Avaliação do método da vazão específica com doador único em postos fluviométricos do Brasil: IPH-ANA-HGE-SR-R6. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Sumário

1	Apresentação	4
2	Introdução	5
3	Metodologia	7
3.1	Visão geral da metodologia	7
3.2	Seleção de postos fluviométricos e doadores	7
3.3	Ajuste climático	11
3.4	Método da vazão específica	12
3.5	Métricas de erro	13
3.6	Regiões hidrográficas	14
4	Resultados	15
4.1	Exemplo ilustrativo da avaliação da estimativa dos erros	15
4.2	Comparação de métodos de escolha do posto fluviométrico doador	16
4.3	Influência do encadeamento	19
4.4	Influência do tamanho da série	24
4.5	Avaliação regional da estimativa de vazão com base na vazão específica	26
4.5.1	Erros nas estimativas da vazão média	26
4.5.2	Erros nas estimativas da vazão Q95	27
5	Conclusões	30
6	Referências	32
7	Apêndice	33
7.1	Método otimizado de escolha de posto doador	33
7.2	Erros nas estimativas de vazão média e Q95 para doadores únicos otimizados	39

1 APRESENTAÇÃO

Este relatório refere-se ao produto “IPH-ANA-HGE-SR-R6”, do subprojeto “Regionalizações 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).

O projeto está dividido em 4 subprojetos voltados para a (i) capacitação e transferência tecnológica do modelo hidrológico MGB para aplicações e desenvolvimento na ANA, (ii) desenvolvimento e avaliação de métodos para a regionalização de vazões naturais em escala nacional usando modelagem hidrológica (Modelo MGB América do Sul), e desenvolvimento de base de dados de estimativas de vazões e respectivas incertezas em nível nacional, (iii) avaliação de estimativas de áreas inundadas do modelo MGB e (iv) estimativas de fluxos e estoques hidrológicos em escala nacional com base no modelo MGB aplicadas às Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) no Brasil. Os produtos esperados incluem novas bases de dados, relatórios, manuais técnicos, cursos de capacitação e publicações técnico científicas.

O objetivo proposto para o subprojeto “Regionalização de vazões via modelagem hidrológica” é o desenvolvimento e avaliação de métodos para a regionalização de vazões naturais em escala nacional usando o modelo hidrológico MGB, desenvolvido em escala continental para toda a América do Sul (MGB-AS), além do desenvolvimento de base de dados de estimativas de vazões e estimativa das incertezas em nível nacional em compatibilidade com a base de dados BHO da ANA.

A avaliação de resultados da modelagem hidrológica para fins de regionalização de vazão, tem como etapa fundamental a comparação com métodos clássicos de estimativa de vazões em locais sem dados. O método da vazão específica é uma técnica muito simplificada de regionalização, com a vantagem de ser bastante fácil de aplicar. Entretanto, a qualidade da estimativa depende do grau de homogeneidade das características do clima e da bacia hidrográfica, entre o local monitorado e não monitorado. Existem poucos trabalhos comportamento dos erros associados a esse método, entretanto, espera-se que os resultados sejam bons quando as bacias hidrográficas do local de interesse (sem dados fluviométricos) e do posto fluviométrico de apoio estão mais próximas, especialmente quando são embutidas e tem áreas de drenagens similares.

Considerando a necessidade de elaboração de bases para comparação com resultados de modelagem hidrológica, apresentamos aqui uma avaliação dos erros em estimativas de vazões média e Q95 (vazão diária igualada ou superada em 95% do tempo) ao utilizar o método da vazão específica apoiado por um único posto fluviométrico doador, escolhido por critérios de vizinhança.

2 INTRODUÇÃO

As vazões de referência (e.g. vazão média e vazão Q95) são importantes para a gestão de recursos hídricos, pois fornecem uma informação resumida e objetiva a respeito da disponibilidade hídrica em condições naturais. Em geral, busca-se obter vazões de referência representativas de longo prazo e, devido a isso, as estimativas costumam ser realizadas a partir de séries de dados relativamente longas (> 20 anos) (Tallaksen e Van Lanen, 2004).

Conseguir estimar as vazões de referência em locais não-monitorados é um dos desafios fundamentais da hidrologia. Os métodos clássicos utilizados para resolver este problema consistem em agrupar os dados observados disponíveis numa determinada região e relacionar com características das bacias, através de diversos procedimentos denominados “regionalização de vazões” (Salinas et al. 2013; Tucci, 2002).

Dentre as possibilidades existentes para estimar a vazão em locais sem dados, o método da vazão específica possui a vantagem de ser facilmente aplicável. Basicamente, o processo consiste em multiplicar um valor de vazão específica, obtido a partir de um posto fluviométrico na vizinhança, pelo valor área de drenagem do local de interesse. A qualidade da estimativa depende do grau de homogeneidade hidrológica entre o posto “doador” e o local de interesse. Os resultados tendem a ser bons quando os locais estão próximos (distância tende a zero) e quando tem área de drenagem similar (razão entre a área de drenagem no local com dados e a área de drenagem no local sem dados tende a 1). Por outro lado, à medida que aumenta a distância entre os postos fluviométricos (e respectivas bacias hidrográficas), ou à medida que aumenta a diferença entre as áreas de drenagem, o erro do método tende a aumentar.

Embora o método da vazão específica apoiada por um único posto doador seja, possivelmente, o mais utilizado método de estimativa de vazões de referência em locais sem dados em estudos hidrológicos de pequeno porte, são poucos os trabalhos que procuraram estimar suas incertezas (ou erros).

Alguns estudos no Brasil sugerem que a relação entre vazão e área de drenagem não é linear, especialmente na transição entre bacias com área maior e menor do que 50 km² (Tucci, 2002; Clarke e Tucci, 2003), refletindo as mudanças em processos hidrológicos que modulam a vazão específica. Este comportamento sugere que a estimativa de vazão em locais sem dados baseada na vazão específica pode ter incerteza muito grande se o local sem dados tem área de drenagem muito menor do que o local com dados. Da mesma forma, sugere-se que o método tende a ter resultados ruins em regiões com grande variabilidade espacial das características climáticas, especialmente em zonas de transição no regime de chuvas (ANA, 2013).

De acordo com um estudo realizado por Ries e Friez (2000), o método da vazão específica é igual ou melhor do que métodos mais complexos de regressão quando a área de drenagem do local sem dados está entre 0,3 e 1,5 vezes a área de drenagem do local com dados.

Em um estudo na bacia do rio Itabapoana, localizada entre as bacias do rio Paraíba do Sul e do rio Doce, erros de -6% a +34% na estimativa da vazão média foram encontrados ao utilizar a vazão específica (Reis et al. 2008).

Em estudo recente, já no contexto do presente projeto, Sorribas et al. (2021a) demonstraram que o método da vazão específica – para vazão média e Q95 – tende a fornecer estimativas mais acuradas quando o posto doador e o local sem dados estão em bacias hidrográficas embutidas.

Assim, além da proximidade e relação de áreas de drenagens, a localização do posto fluviométrico rio acima (ou abaixo) também é um critério simples, mas importante a ser considerado ao utilizar o método da vazão específica. Por fim, esse mesmo estudo apresenta gráficos que relacionam os erros calculados e áreas de drenagem entre postos, reproduzidos, de maneira adaptada, aqui nas Figura 1 e Figura 2.

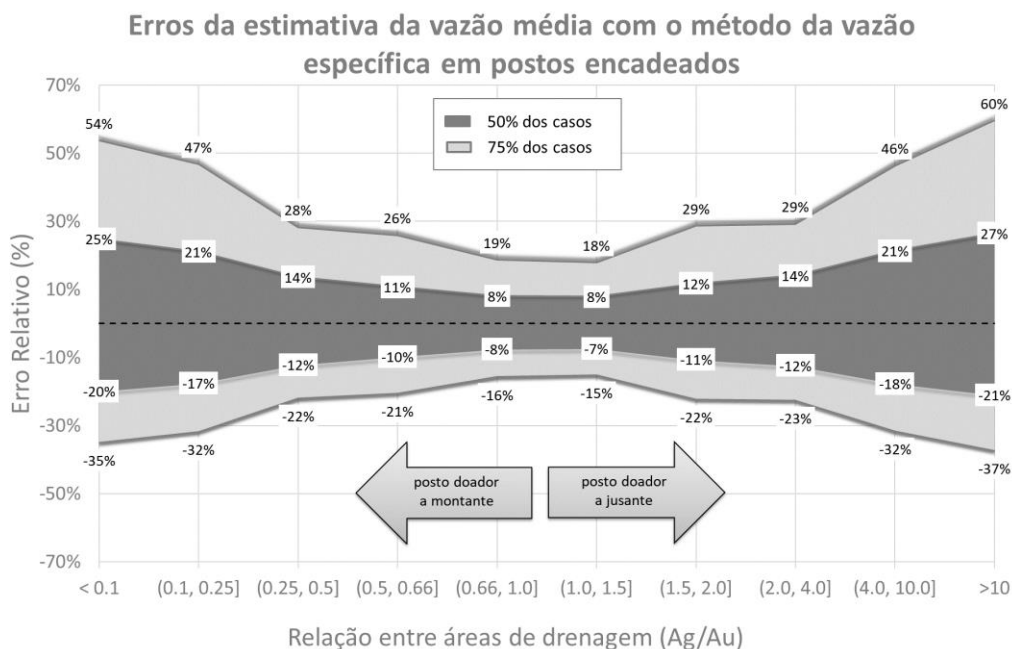


Figura 1: Erros na aplicação do método da vazão específica para estimativa da vazão média em postos encadeados (adaptado de Sorribas et al. 2021a)

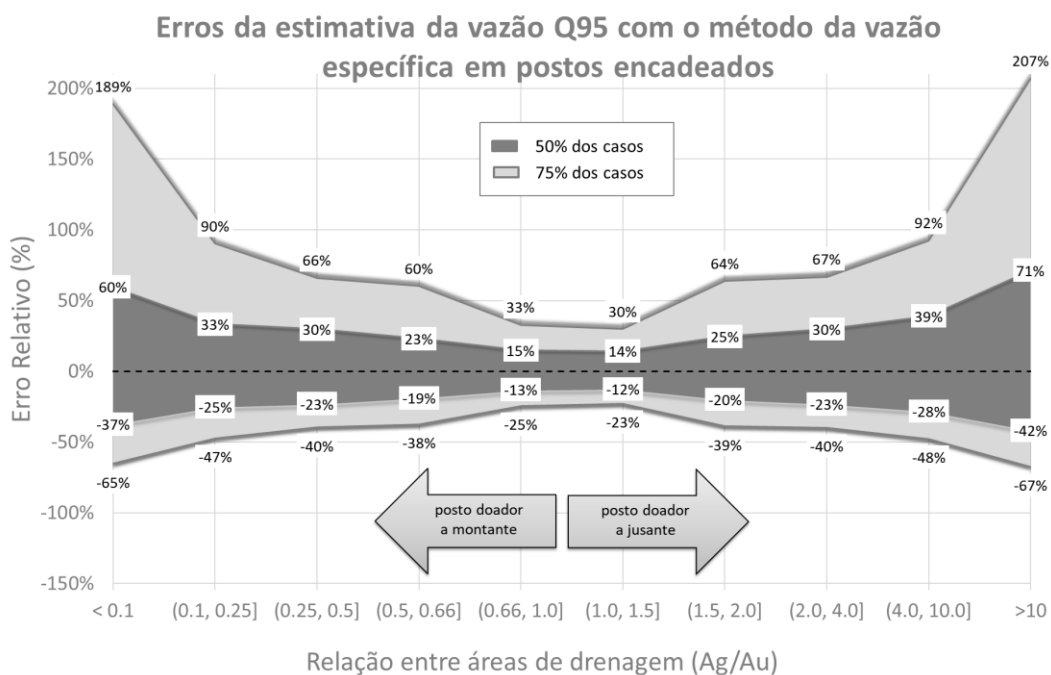


Figura 2: Erros na aplicação do método da vazão específica para estimativa da vazão Q95 em postos encadeados (adaptado de Sorribas et al. 2021a)

Neste capítulo apresentamos uma avaliação de erros obtidos ao utilizar o método da vazão específica para estimar vazões de referência (vazão média e Q95), a partir de dados de 1336 postos fluviométricos do Brasil. O objetivo do trabalho é responder à pergunta: Qual é a acurácia da estimativa da vazão de referência utilizando o método da vazão específica?

3 METODOLOGIA

3.1 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA

A avaliação de erros nas estimativas ao utilizar o método das vazões específicas foi realizada a partir da aplicação da técnica em diferentes postos fluviométricos, considerando as duas vazões de referência: vazão média e vazão Q95.

Em um primeiro momento, as vazões de referência foram obtidas a partir de postos fluviométricos com séries de dados longas e, também, de vazões obtidas de séries curtas corrigidas por ajuste climático (ver relatório IPH-ANA-HGE-SR-R5). A seguir, para cada posto em análise (e com vazões de referência já calculadas) foram adotadas as vazões específicas de outro posto fluviométrico de apoio, denominado posto “doador”, para realizar estimativas de vazões (Q95 e média) no mesmo local do posto em análise. Por meio da comparação entre valores de vazão estimados e os valores observados, os erros esperados ao utilizar o método da vazão específica foram avaliados.

O método da vazão específica tem como fundamento a transferência desse parâmetro (i.e., vazão específica) que é obtido de séries longas em um local monitorado para estimar as vazões em locais não-monitorados. No caso da aplicação do ajuste climático para realizar estimativas compatíveis com vazões de série longa, também se transfere informações de um posto (com séries longas) para outro (de série curta). Dessa forma, ambos os processos têm como requisito a escolha de pelo menos um posto doador que fornece uma parametrização que remete às características espaciais e/ou temporal do regime de vazões num determinado local. A escolha do posto doador pode ser bastante arbitrária, usualmente, baseada em critérios de distância e relações de áreas. Neste trabalho utiliza-se um método de escolha do posto doador baseado na otimização de uma função de vizinhança, explicado mais detalhadamente no Apêndice I. Além disso, métodos simplificados utilizando o posto mais próximo como doador também foram avaliados.

3.2 SELEÇÃO DE POSTOS FLUVIOMÉTRICOS E DOADORES

O estudo foi realizado a partir de dados de séries diárias de vazão de postos fluviométricos obtidos da base de dados Hidroweb da ANA. Foram considerados somente postos com séries de dados ao longo do período entre jan/1980 e dez/2014, com pelo menos 10 anos de dados. Além disso, considerou-se somente postos sem efeito significativo de regularização artificial e/ou erros grosseiros nas séries de dados, ou de interesse especial para a ANA.

Uma análise de erros de estimativa na vazão de longo termo associados a variabilidade amostral (Collischonn et al. 2021) demonstra – para a maioria (75%) dos casos – que séries curtas com 10 anos apresentam desvios de até 12% para vazão média e até 20% para Q95, em relação a estimativas obtidas de séries longas (30 a 35 anos). Em comparação, ao incluir o ajuste climático (Sorribas et al. 2021b) em séries curtas (de 10 anos) utilizando um posto fluviométrico de série longa disponível na vizinhança, os erros da estimativa diminuíram, resultando em até 6% para

vazão média, e até 14% para Q95. Além disso, a partir dessas mesmas análises, é possível interpretar que séries de dados com 20 anos de dados apresentam erros inferiores a 5% na vazão média e inferiores a 15% na Q95, na maioria dos casos, mesmo sem o auxílio do ajuste climático.

Considerando os critérios mencionados e os efeitos da variabilidade amostral e do ajuste climático relatados, os postos fluviométricos foram classificados a partir do tamanho da série disponível: postos de série longa (>20 anos) e postos de série curta (entre 10 e 20 anos). No caso dos postos de série curta, foram mantidos somente aqueles para os quais foi possível adotar um posto doador para o ajuste climático, conforme descrito a seguir.

Neste trabalho o posto doador é utilizado em dois momentos:

- aplicação do método da vazão específica com doador único, para avaliação do objetivo principal deste trabalho;
- ajuste climático de vazões de referência estimadas com séries curtas, para obter vazões compatibilizadas com séries longas.

Para aplicação do ajuste climático o posto doador deve possuir séries longas de dados e, ao menos, um período comum de dados com o posto fluviométrico no local de interesse (de série curta). Uma vez que temos interesse em avaliar e quantificar as incertezas relacionadas ao processo, os seguintes critérios foram considerados:

- o posto doador possui série longa, com mais de 20 anos de dados;
- o posto de série curta e o posto doador possuem séries com período comum de dados, com mais de 10 anos de dados

Além disso, três critérios para escolha de doadores foram avaliados:

- posto vizinho mais próximo
- posto escolhido por otimização de métricas de vizinhança, ponderando:
 - se há encadeamento rio acima (ou abaixo) entre os postos
 - a maior similaridade entre áreas de drenagem dos postos
 - a menor distância entre centroides de bacias de drenagem dos postos
 - a menor distância entre os locais dos postos (coordenadas)
- posto a jusante mais próximo, se disponível

Assim, as análises seguiram com uma base de 1336 postos fluviométricos, sendo 267 classificados como série curta, em diferentes regiões do Brasil, ilustrados na Figura 3. Cabe mencionar que o método do doador mais próximo a jusante é aplicável em menos locais (959 postos) do que os outros métodos de escolha, pois nem todo local possui algum posto a jusante.

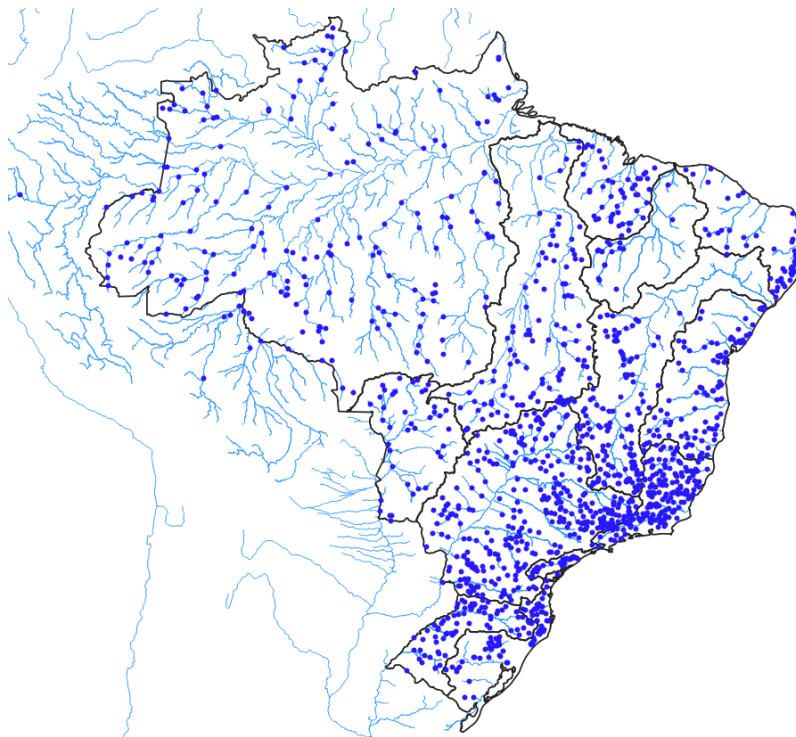


Figura 3: Postos fluviométricos utilizados para a avaliação de erros do método da vazão específica com doador único.

A Figura 4 ilustra com setas a relação entre os postos fluviométricos e os doadores únicos obtidos por otimização, utilizados para aplicação do método da vazão específica em cada local. Em geral, a otimização tende a priorizar o posto doador encadeado, isto é, localizado rio abaixo (ou acima). Além disso, entre os postos encadeados, a otimização favorece os postos com áreas de drenagens mais similares. Entretanto, quando a distância entre os postos encadeados se torna grande (em relação à bacia do local de interesse) os postos localizados em outros rios (e com semelhança de área) se tornam candidatos fortes. Esses critérios favorecem a redução de erros, conforme apresentado por Sorribas et al. (2021a) e por Laaha & Blöschl (2007). As métricas de vizinhança utilizadas na otimização estão descritas em maior detalhe no

Apêndice.

A Figura 5 destaca a relação de pares de postos considerados para região nos trechos superiores dos rios Paranapanema, rio Ivaí e rio Ribeira, que drenam o estado do Paraná e São Paulo. Também como exemplo, a Figura 6 destaca os pares de postos na região no trecho médio do rio São Francisco. Em geral, é possível observar uma coerência na metodologia adotada para escolha de doadores pela otimização das métricas de vizinhança.

O método de otimização procurou emular, de forma automática, a escolha de um posto fluviométrico de apoio que poderia ser feita por um hidrólogo experiente.

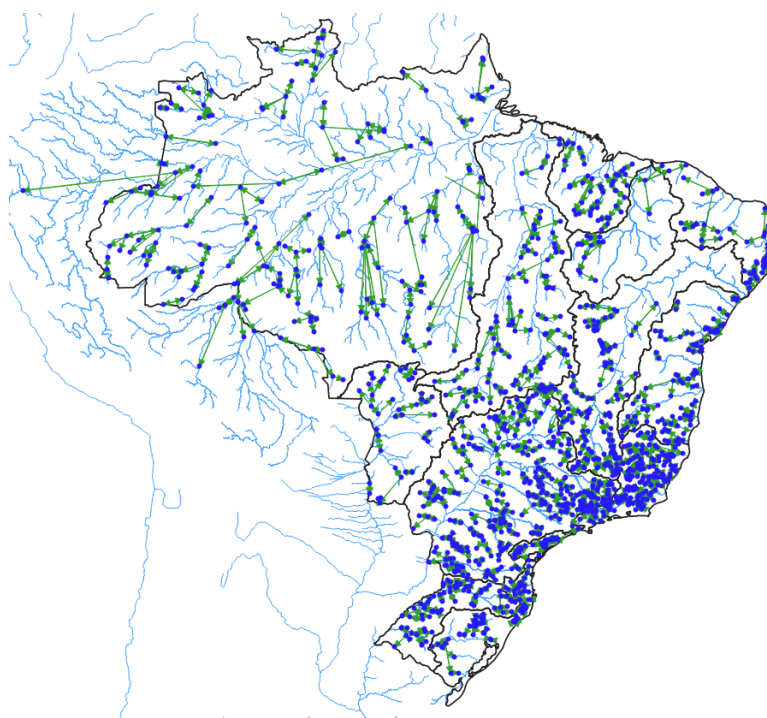


Figura 4: Relação de pares de postos fluviométricos e doadores únicos adotados por otimização

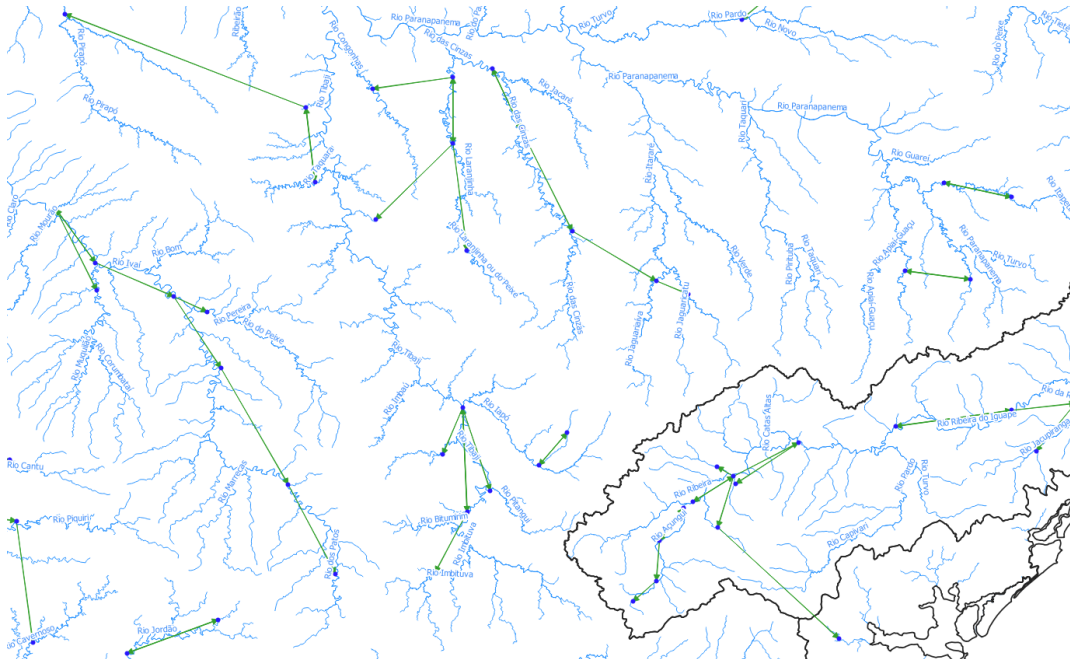


Figura 5: Detalhe de postos fluviométricos e doadores únicos adotados por otimização em bacias do Alto Paranapanema, Ivaí e Ribeira

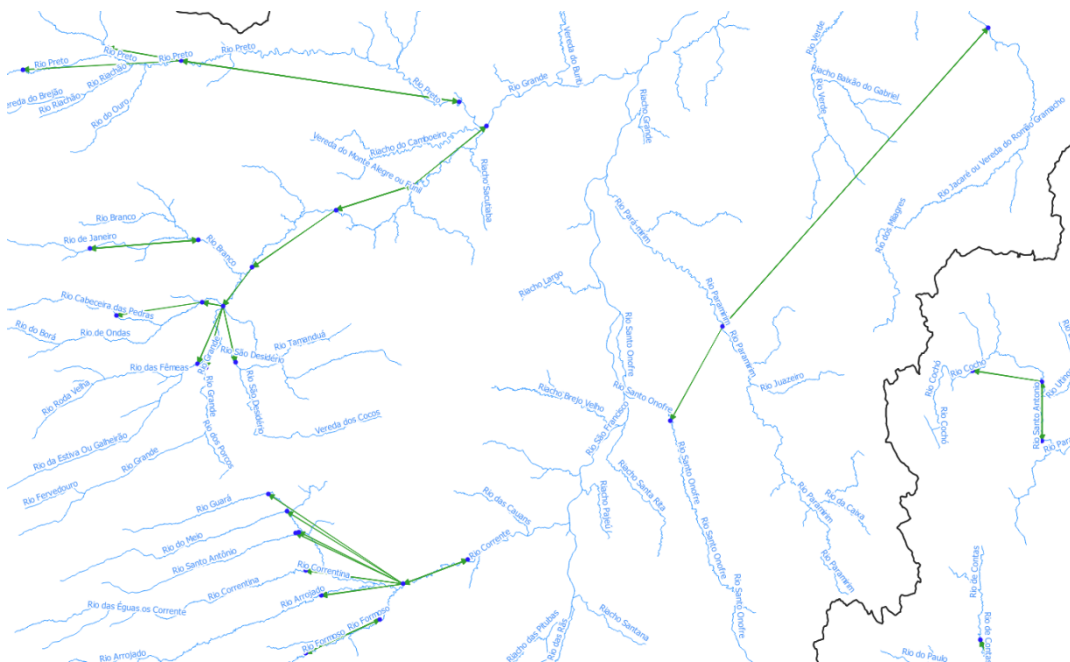


Figura 6: Detalhe de postos fluviométricos e doadores únicos adotados por otimização no médio rio São Francisco

3.3 AJUSTE CLIMÁTICO

O ajuste climático é uma forma de reduzir o viés devido à variabilidade amostral quando um local tem uma série de dados observados relativamente curta, e foi previamente descrito e analisado em um relatório específico sobre o tema (IPH-ANA-HGE-SR-R5)

O ajuste climático considera que o fator de proporção entre as vazões obtidas a partir da série longa e de série curtas no posto fluviométrico é igual ao do posto doador (Laaha e Bloschl, 2005). Em outras palavras, o procedimento adota a perspectiva climática do posto de série longa, considerando as informações do local do posto de série curta. Assim, a estimativa de vazão de referência com ajuste climático é realizada pelo cálculo do fator (Equação 2), seguido da aplicação do fator (Equação 3) na vazão de referência obtida da série curta

$$K_{CL} = \frac{Q_{DL}}{Q_{DC}} \quad (2)$$

$$QR_A = QR_C \cdot K_{CL} \quad (3)$$

onde: K_{CL} é o fator de ajuste; Q_{DL} é a vazão de referência de série longa no posto doador; Q_{DC} é a vazão de referência de série curta no posto doador; QR_A é a vazão de referência de série longa ajustada no posto fluviométrico (de série curta); QR_C é a vazão de referência de série curta no posto fluviométrico (de série curta).

Portanto, a vazão específica no posto após o ajuste climático é calculada por:

$$q_A = QR_A/A_A \quad (4)$$

Onde A_A é o valor de área de drenagem no local do posto.

3.4 MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA

O método da vazão específica é a forma mais simples para obter valores de vazão num determinado local. Basicamente, considera-se que a vazão específica ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^2$ ou $L \cdot s^{-1} \cdot km^2$) obtida pelos registros históricos de um posto fluviométrico “doador” é a mesma do local sem dados. A estimativa é realizada utilizando a área de drenagem no local de interesse multiplicada pela vazão específica obtida do posto doador. Em outra perspectiva, é possível interpretar que a vazão estimada no local sem dados é estimada a partir da vazão no local com dados multiplicada pela relação entre áreas de drenagem. A equação 5 descreve o método:

$$Q_u = Q_g \cdot \frac{A_u}{A_g} \quad (5)$$

Onde Q_g é a vazão no local com dados (posto fluviométrico); A_g é a área de drenagem no local com dados; A_u é a área de drenagem no local sem dados; e Q_u é a vazão no local sem dados.

Os erros do método dependem, entre outros fatores, da distância e da posição relativa dos locais sobre a rede de drenagem. A Figura 7 ilustra alguns casos possíveis, em termos de localização do posto doador em relação ao local de interesse, para a aplicação do método. No caso em que o local de interesse está localizado rio abaixo (ou acima) do posto doador as bacias estão embutidas, ou ainda, pode se dizer que há um encadeamento de montante/jusante direto entre o par de postos e bacias. Caso contrário, pode-se dizer que posto doador é não-encadeado em relação ao local de interesse e vice-versa.

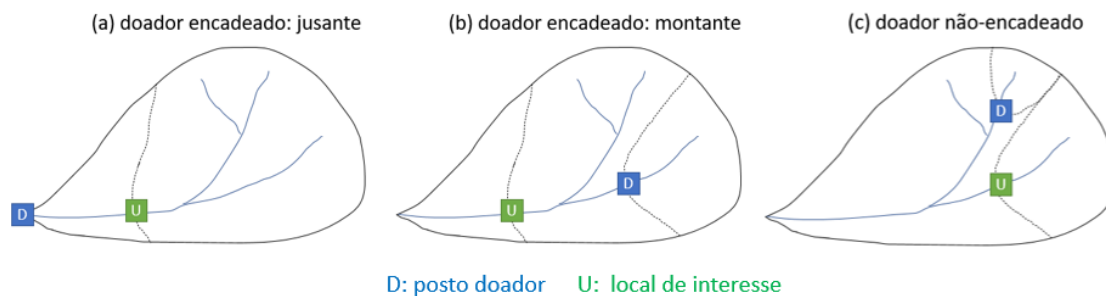


Figura 7: Exemplos de posicionamento entre posto doador e local de interesse (Sorribas et al. 2021a)

Por meio da simulação de múltiplos cenários da aplicação do método da vazão específica, Sorribas et al. (2021a) apresentam os erros de estimativas em função da relação de áreas entre o posto doador e o local de interesse. A maior acurácia foi observada para bacias embutidas e quando a razão de áreas de drenagem do posto doador e do local de interesse se aproxima de 1. Os resultados daquele estudo indicam que, em 75% dos casos avaliados, com bacias encadeadas, e com relação de área (entre o posto doador e o local de interesse) entre 0,66 e 1,5, o valor estimado possui erros relativos entre -25 e +33% para vazão Q95; e entre -16 e +19% para vazão média. No caso de relações de áreas entre 1,5 e 2,0, os erros relativos aumentam, ficando entre -38 a +64% para vazão Q95; e entre -22% e +29% para vazão média (em 75% dos casos). Para postos em bacias não-embutidas, o efeito da relação de áreas não foi identificado, mas tomando a envoltória de 75% dos casos avaliados, espera-se erros relativos entre -50 e +103% para vazão Q95; e entre -30 a +43% para a vazão média.

3.5 MÉTRICAS DE ERRO

Existem diferentes métricas para calcular o erro entre os valores estimados e os valores “reais”. A diferença entre a vazão estimada por um modelo e o valor “real” é, tipicamente, denominado de resíduo:

$$RES = QR_{est} - QR_{real} \quad (6)$$

onde: RES é o resíduo; QR_{est} é a QR estimada por um modelo; QR_{real} é a QR observada, obtida dos dados do posto fluviométrico.

O resíduo também pode ser calculado em termos de vazão específica:

$$RES = \frac{QR_{est} - QR_{real}}{A} \quad (7)$$

onde A é a área de drenagem da bacia hidrográfica.

O erro relativo entre as estimativas de vazões de referência pode ser calculada por:

$$ER(\%) = 100 \left(\frac{QR_{est} - QR_{real}}{QR_{real}} \right) \quad (8)$$

onde: ER é o erro relativo (%); QR_{est} é a vazão de referência (pode ser a vazão média ou a Q95) estimada com base na série curta; QR_{real} é a vazão de referência estimada com base na série longa.

No contexto de disponibilidade hídrica é importante que a métrica de desempenho seja capaz de indicar a proporcionalidade de excesso/déficit hídrico da estimativa. A métrica denominada

de Razão entre Vazões Médias (RQM), descrita a seguir, é proposta e utilizada para avaliar o desempenho entre valores observados e estimados das vazões de referência.

$$RQM = Sinal(QM_{est} - QM_{real}) \cdot Máximo\left(\frac{QM_{est}}{QM_{real}}; \frac{QM_{real}}{QM_{est}}\right) \quad (9)$$

onde: RQ é a métrica de razão de vazões; QM_{est} é a vazão média de série curta; QM_{real} é a vazão média de série longa. Essa métrica indica a proporção entre vazão estimada e a “real”, de tal maneira que um valor $RQ=+2$ indica que a vazão estimada é o dobro da “real” e, um valor $RQ=-2$ indica que a vazão estimada é a metade da “real”. Um ajuste perfeito fornece um valor de $RQM=1$.

Ao considerar que a magnitude dos erros de superestimativa e subestimativa (em proporção) são equivalentes e igualmente importantes, a métrica pode ser utilizada ignorando o sinal, critério esse adotado para as análises no presente estudo, ou seja, em valores absolutos, ABSRQM:

$$ABSRQM = Máximo\left(\frac{QM_{est}}{QM_{real}}; \frac{QM_{real}}{QM_{est}}\right) \quad (10)$$

onde: ABSRQM é a métrica de razão de vazões, em valor absoluto; QM_{est} é a vazão estimada; QM_{real} é a vazão média observada, obtida dos dados do posto fluviométrico.

Em geral, as métricas foram aplicadas para as vazões de referência Q95 e QM. A equação 9, adaptada para a vazão de referência Q95, resulta na métrica RQ95, e a equação 10, adaptada para a Q95, resulta na métrica ABSRQ95.

3.6 REGIÕES HIDROGRÁFICAS

Considerando a escala nacional de aplicação do método, a Tabela 1 apresenta as grandes regiões hidrográficas do Brasil, para as quais os dados de postos fluviométricos foram agrupados na análise regional.

Tabela 1. Regiões hidrográficas consideradas para análise

Regiões hidrográficas
R1 - Amazônica
R2 – Tocantins-Araguaia
R3 – Atlântico Nordeste, Parnaíba
R4 – São Francisco
R5 – Atlântico Leste, Atlântico Sudeste
R6 – Paraná-Paraguai
R7 – Uruguai
R8 – Atlântico Sul

O posto fluviométrico Lajeado (código 64442800, área de drenagem de 1340 km²) localiza-se no rio Imituva, noutra bacia, cerca de 42km a leste do ponto de interesse. Utilizando dados de 34 anos de dados nesse posto (jan/1980 a dez/2014), a vazão média estimada é de 28,3 m³s⁻¹ e, portanto, equivalente a uma vazão específica de 21,1 L s⁻¹ km².

A partir dos valores de áreas de drenagem e as vazões específicas obtidas, podemos realizar uma estimativa para o local virtualmente sem dados, referente ao posto Rio dos Patos. Ao utilizar a vazão específica obtida a partir dos dados do posto Teresa Cristina, obtemos uma vazão média de 26,6 m³s⁻¹. Por outro lado, ao utilizar a vazão específica obtida a partir do posto Lajeado, a vazão média estimada foi de 22,9 m³s⁻¹.

Assim, ao comparar as duas estimativas obtidas (26,6 e 22,9 m³s⁻¹) com o valor calculado a partir da série original (30,5 m³s⁻¹), os erros relativos são de -12,7% e -24,9%, respectivamente. Ao utilizar a métrica de erros proporcionais, os valores de RQM obtidos são -1,14 e -1,33, respectivamente. Nesse exercício, a estimativa apresentou maior acurácia ao utilizar a vazão específica do posto doador localizado no mesmo rio (a jusante) do que o doador mais próximo e com maior similaridade de áreas de drenagem, mas localizado noutra bacia.

4.2 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESCOLHA DO POSTO FLUVIOMÉTRICO DOADOR

O método de estimativa de vazão em local sem dados baseado na vazão específica de um único posto doador vizinho depende, obviamente, do critério ou método para a escolha do posto fluviométrico doador. Conforme mencionado na metodologia, foram considerados três métodos, ou critérios, para a escolha do posto fluviométrico doador:

- **VIZ:** Posto fluviométrico vizinho mais próximo do local de interesse;
- **JUS:** Primeiro posto fluviométrico a jusante, se disponível;
- **OTI:** Posto fluviométrico escolhido por otimização de métricas de vizinhança, conforme o anexo;

Estes três métodos procuram emular a decisão de um hidrólogo na escolha de um posto fluviométrico na região do local sem dados, para apoiar sua estimativa com base no método da vazão específica.

O método VIZ é o mais intuitivo, e é frequentemente aplicado na prática. Entretanto, ele pode resultar em escolhas inadequadas caso o posto fluviométrico escolhido, embora localizado a pouca distância, esteja medindo dados de um rio de uma outra bacia, ou de um rio da mesma bacia, mas com características completamente diferentes do local de interesse, como, por exemplo, a área de drenagem.

O método JUS também é intuitivo, e tende a dar bons resultados. Entretanto, quando a área de drenagem do local de interesse é muito menor do que a área de drenagem do posto fluviométrico, esse método pode resultar em erros relativamente grandes. Além disso, este método não é aplicável em todos os casos, porque nem todos os locais de interesse tem um posto fluviométrico localizado a jusante.

Um hidrólogo experiente provavelmente escolheria um posto fluviométrico doador ponderando informações como a distância entre os locais, o encadeamento sobre a rede de drenagem, e a diferença de magnitude das áreas de drenagem. O método de escolha otimizado (OTI) procura representar, de forma automática, esta escolha mais ponderada.

É importante ressaltar que existem casos em que o posto escolhido pelos diferentes métodos é exatamente o mesmo. Por exemplo, existem casos em que o posto fluviométrico mais próximo é, também, aquele localizado imediatamente a jusante do local de interesse. E, muito provavelmente, este mesmo posto também seria escolhido pelo método OTI.

As análises de comparação entre os três métodos de escolha de posto doador foram realizadas em um sub-conjunto de 793 postos fluviométricos em que é possível aplicar os três métodos, e que dispõe de série de dados com mais de 20 anos no período de jan/1980 a dez/2014 (séries longas).

A Figura 9 apresenta a distribuição dos erros (ABSRQM) de estimativa da vazão média nos 793 locais em que foi possível aplicar simultaneamente os três métodos. Observa-se que o método do vizinho mais próximo (VIZ) apresenta erros claramente superiores aos dois outros métodos. Considerando o percentil 75%, por exemplo, o valor de ABSRQM do método VIZ é cerca de 1,32, enquanto dos métodos JUS e OTI é próximo de 1,28. Observa-se também que para percentis maiores a diferença aumenta ainda mais, enquanto os dois outros métodos (OTI e JUS) permanecem com desempenho muito semelhante até o percentil 90%. As letras SL utilizadas na legenda da Figura 9 indicam que todas as estimativas utilizadas foram baseadas em séries longas de dados.

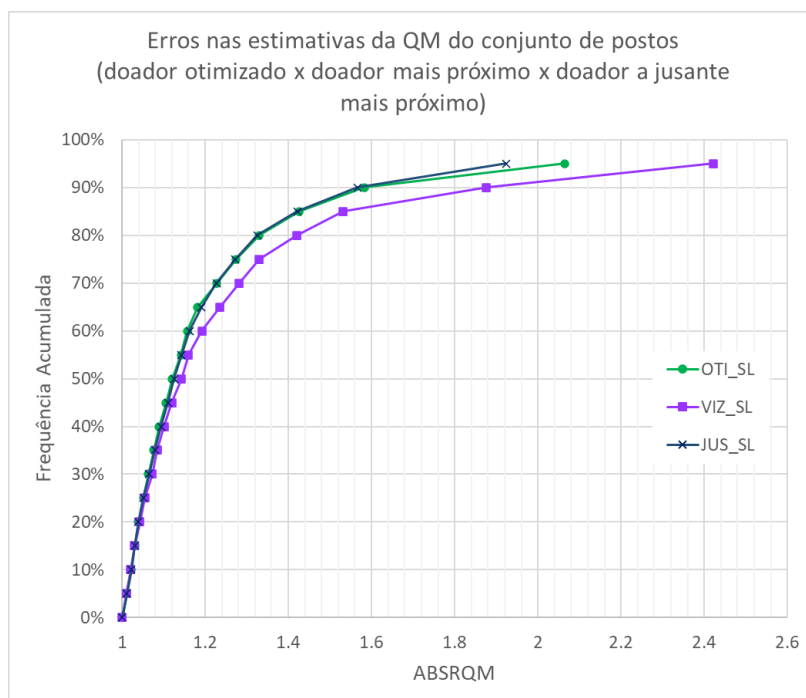


Figura 9: Distribuição dos erros na estimativa da vazão média para o conjunto de postos, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), com doador pelo vizinho mais próximo (VIZ) e doador pelo vizinho mais próximo a jusante (JUS), em casos de vazões de referência obtidos de séries longas (_SL)

Os resultados da métrica de erro calculada para a Q95, ilustrados na Figura 10, podem ser interpretados de maneira similar. Da mesma forma que no caso da vazão média, no caso da vazão Q95, apresentado na Figura 10, o método de escolha de doador baseado no vizinho mais próximo (VIZ) é claramente inferior aos outros dois, pois resulta em erros maiores. Entretanto, ao contrário do caso da vazão média, a Figura 10 mostra também uma vantagem pequena, mas consistente, em utilizar o método OTI, em relação ao método JUS.

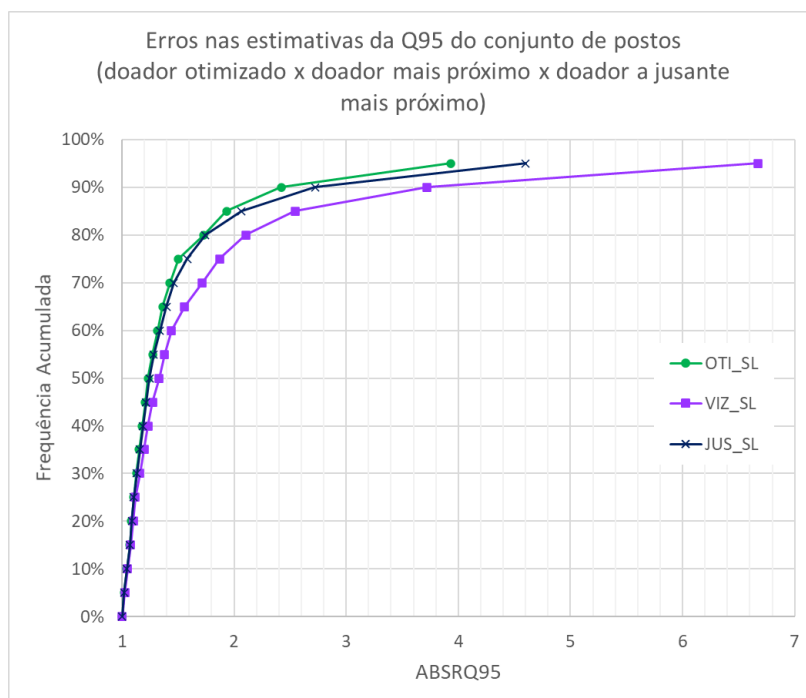


Figura 10: Distribuição dos erros na estimativa da vazão Q95 para o conjunto de postos, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), com doador pelo vizinho mais próximo (VIZ) e doador pelo vizinho mais próximo a jusante (JUS), em casos de vazões de referência obtidos de séries longas (_SL)

Estes resultados mostram que, entre os três métodos testados para escolher o posto fluviométrico doador, o método VIZ, que consiste em selecionar sempre o posto fluviométrico mais próximo do ponto de interesse, é o que tem o pior desempenho.

O outro método simples testado, que consiste em selecionar sempre o próximo posto a jusante (método JUS) tem desempenho claramente superior ao método VIZ tanto na vazão média como na vazão Q95.

Finalmente, o método OTI parece ter um desempenho tão bom, ou até melhor, do que o método JUS. Isto sugere que foi bem-sucedida a tentativa de emular, com o método OTI, a escolha do posto fluviométrico doador que seria realizada por um hidrólogo experiente, embora, possivelmente, um hidrólogo experiente levasse em consideração outras informações complementares, como a geomorfologia, o tipo de vegetação e características da topografia.

Para ilustrar o resultado da seleção de postos doadores utilizando o método OTI, a Figura 11 apresenta um detalhe do Noroeste do Rio Grande do Sul, pertencente a região hidrográfica do rio Uruguai, com pontos mostrando a localização dos postos fluviométricos e com setas indicando a ligação com os postos doadores. Nesta figura as setas indicam a ligação entre o posto doador e o posto receptor. Por exemplo, a seta ligando do ponto 5 para o ponto 6 indica que os dados de vazão específica do ponto 5 foram utilizados para estimar a vazão no ponto 6, ou seja, o doador escolhido para o ponto 6 é o ponto 5. Já a seta nos dois sentidos entre os pontos 10 e 11 significa que o doador escolhido para o ponto 11 foi o ponto 10 e vice-versa.

Observa-se que, na maioria dos casos, o posto escolhido como doador está encadeado (a montante ou a jusante) do posto receptor. Entretanto, em alguns casos, especialmente quando dois postos encadeados estão muito distantes, ou tem áreas de drenagem muito diferentes, a escolha recai sobre um posto fluviométrico de uma bacia vizinha, não encadeada. Este é o caso

do ponto 14, para o qual foi escolhido como doador o ponto 13, embora estes dois pontos não sejam encadeados. O mesmo ocorre no caso do ponto 16, que foi escolhido como doador para o ponto 17. Esta escolha foi feita embora tanto o ponto 14 como o ponto 17 estejam localizados a montante do ponto 1, portanto o ponto 14 e o ponto 17 são encadeados com o ponto 1.

Outro caso interessante de escolha de ponto doador é o que relaciona os pontos 1 e 7. A seta apontando de 7 para 1 indica que o ponto 7 foi escolhido como doador para o ponto 1. Isto ocorreu porque o ponto 7 está encadeado com o ponto 1, e, entre todos os postos encadeados com o ponto 1, é o que compartilha a maior fração de área de drenagem.

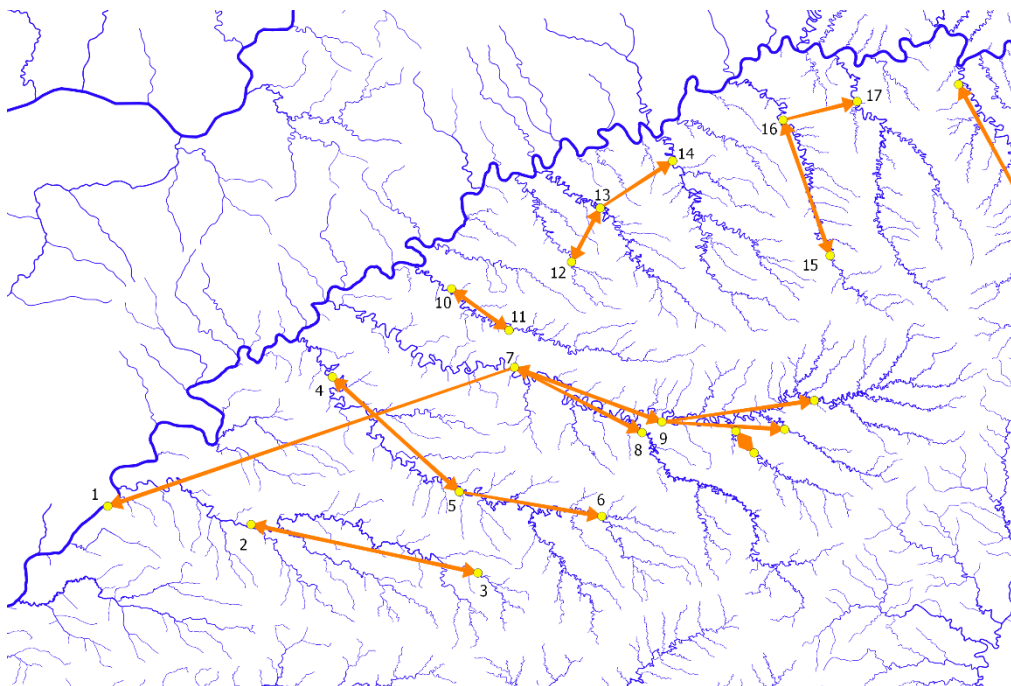


Figura 11: Detalhe da posição dos postos fluiiométricos sobre a rede de drenagem com setas identificando a ligação do posto doador (origem da seta) com o posto receptor (ponta da seta).

Este teste de comparação entre métodos de escolha de posto fluiiométrico doador permite concluir que o método otimizado (OTI) reproduz, razoavelmente, a tomada de decisão de um hidrólogo confrontado com a necessidade de aplicar o método da vazão específica para estimar a vazão de referência em um local sem dados. Por isso, os demais resultados são relatados apenas para este método.

4.3 INFLUÊNCIA DO ENCADEAMENTO

Um dos fatores que mais influencia o desempenho do método de estimativa de vazão de referência baseado na vazão específica de um posto vizinho é a existência ou não de encadeamento entre os postos. Quando o local de interesse e o posto doador são encadeados, uma parte da área da bacia é compartilhada por ambos, o que aumenta a probabilidade da vazão específica ser semelhante.

A Figura 12 apresenta os resultados da métrica ABSRQM na estimativa da vazão média nos 1336 postos fluiiométricos utilizando a vazão específica do posto doador, escolhido pelo método OTI. Os resultados são divididos em dois grupos. A linha laranja apresenta os resultados nos casos em que o ponto de interesse e o posto fluiiométrico doador escolhido encontram-se encadeados, e a linha azul apresenta os resultados dos casos em que esses locais não são

encadeados. Observa-se, claramente, que há um benefício em utilizar postos que estão conectados entre si, seja rio acima ou abaixo. O valor de ABSRQM no percentil 75%, por exemplo, é igual a 1,24 quando os locais estão encadeados e 1,48 quando os locais não estão encadeados.

O valor ABSRQM=1,24 no percentil 75%, no caso de locais encadeados, significa que a vazão média real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo que vai desde um valor 19% inferior e 23% superior à vazão média estimada com base no método da vazão específica com um doador único, caso este doador esteja encadeado (a montante ou a jusante) com o local sem dados.

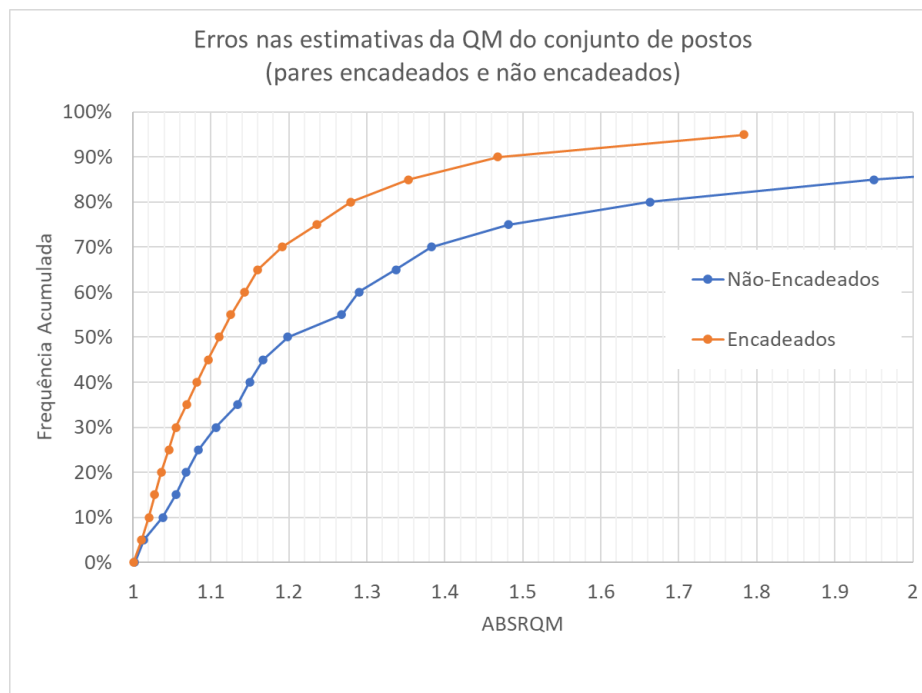


Figura 12: Erros (ABSRQM) na estimativa da vazão média para o conjunto de postos, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), em pares de postos encadeados e não encadeados, considerando apenas postos fluviométricos com séries longas (mais de 30 anos).

O valor ABSRQM=1,48 no percentil 75%, no caso de locais não-encadeados significa que, quando o local sem dados não está nem a montante nem a jusante do posto fluviométrico, a vazão média real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo entre 32% inferior e 48% superior à vazão média estimada com base no método da vazão específica com um doador único.

De maneira similar, a Figura 13 apresenta os resultados para vazão Q95. Novamente a linha laranja representa os casos em que o local de interesse e o posto doador estão encadeados e a linha azul os casos em que os locais não estão encadeados. Também neste caso é evidente um benefício em utilizar, como posto doador, um local encadeado com o ponto de interesse. O valor de ABSRQ95 no percentil 75%, por exemplo, é igual a 1,43 quando os locais estão encadeados e 2,08 quando os locais não estão encadeados.

O valor ABSRQ95=1,43 no percentil 75%, no caso de locais encadeados, significa que a vazão Q95 real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo que vai desde um valor 30% inferior e 43% superior à vazão média estimada com base no método da vazão

específica com um doador único, caso este doador esteja a montante ou a jusante do local sem dados.

O valor $ABSRQ95=2,08$ no percentil 75%, no caso de locais não-encadeados, significa que a vazão Q95 real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo que vai desde a metade até o dobro da vazão média estimada com base no método da vazão específica com um doador único, caso este doador não esteja nem a montante nem a jusante do local sem dados.

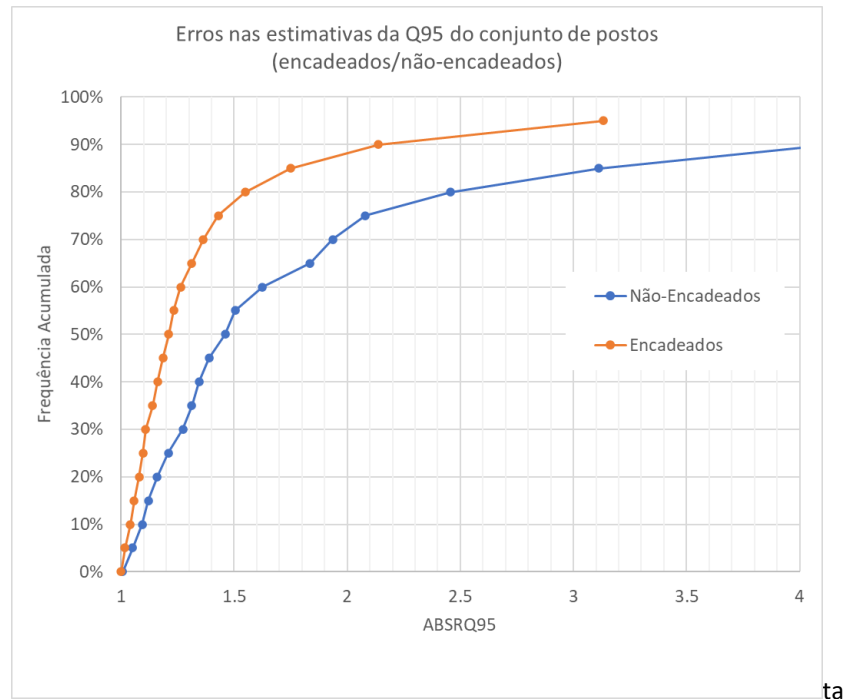


Figura 13: Erros na estimativa da vazão Q95 para o conjunto de postos, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), em pares de postos encadeados e não encadeados, considerando apenas postos fluviométricos com séries longas (mais de 30 anos).

A influência do encadeamento entre o ponto de interesse e o posto fluviométrico doador também pode ser avaliada em termos do grau, ou intensidade do encadeamento. Este grau de encadeamento pode ser medido pela semelhança do valor da área de drenagem dos dois locais. Quando a área de drenagem do posto fluviométrico doador (A_g) é aproximadamente igual à área de drenagem do local sem dados (A_u), a estimativa de vazão de referência pelo método da vazão específica tende a apresentar erros menores. Por outro lado, quando o posto doador está localizado muito distante a montante (A_g/A_u se aproxima de zero), ou quando o posto doador está localizado muito distante a jusante (A_g/A_u é muito maior do que 1), os erros tendem a aumentar.

A Figura 14 apresenta os resultados dos erros de estimativa da vazão média em locais encadeados, e como esses erros variam em função do grau de encadeamento. Os erros são apresentados como envoltórias que contém 50% (banda cinza escuro) e 75% (banda cinza claro) dos casos. Observa-se que, quando a relação A_g/A_u está no intervalo entre 0,66 e 1,50, os erros da vazão média, em 50% dos casos, ficam no intervalo entre -7% e +7%. Quando a relação A_g/A_u está no intervalo entre 2 e 4, ou seja, quando o local sem dados tem uma área de drenagem 2 a

4 vezes menor do que o local do posto doador, os erros da vazão média, em 50% dos casos, ficam na faixa entre -12% e +14%. E quando Ag/Au está no intervalo entre 0,25 e 0,5, ou seja, quando o local sem dados tem uma área de drenagem 2 a 4 vezes maior do que o local do posto doador, os erros também ficam na faixa entre -12% e +14% (considerando a banda escura que contém 50% dos casos).

A banda de cor cinza claro, que representa os limites que contém 75% dos casos analisados, também tem um comportamento semelhante, com os menores valores quando a relação Ag/Au é próxima de 1. Neste caso os menores valores estão na faixa entre -12% e +13% (ou 14%), quando Ag/Au é próximo de 1, e aumentam rapidamente, tanto quando Ag/Au diminui, como quando Ag/Au aumenta.

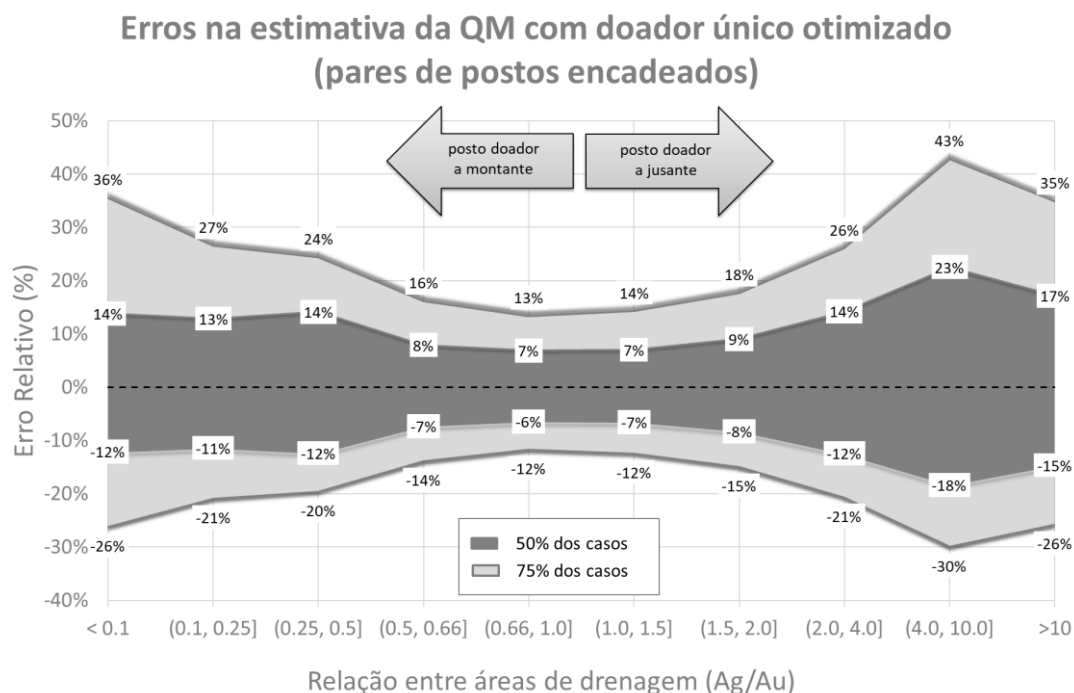


Figura 14: Relação entre o grau de encadeamento (medido pela relação entre áreas de drenagem Ag/Au) e as envoltórias dos erros relativos considerando 50% e 75% dos casos, na estimativa da vazão média, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), em pares de postos encadeados, considerando apenas postos fluviométricos com séries longas (mais de 30 anos).

A Figura 15 apresenta resultados semelhantes, para o caso da vazão Q95. Novamente, os erros são apresentados como envoltórias que contém 50% (banda cinza escuro) e 75% (banda cinza claro) dos casos analisados. Observa-se que o melhor desempenho do método de estimativa de vazão ocorre quando o posto doador encadeado está localizado logo a jusante do local de interesse, de tal forma que a área de drenagem do posto doador é, no máximo, 50% maior do que a área de drenagem no local de interesse. Neste caso, definido pelo intervalo em que Ag/Au é maior que 1 e menor que 1,5, os erros da estimativa da Q95 (em 75% dos casos) estão entre -20% e +25%.

Na mesma figura observa-se também que, quando Ag/Au está no intervalo entre 4 e 10, isto é, quando a área de drenagem no local de interesse é de 4 a 10 vezes menor do que a área de drenagem no posto doador encadeado, a faixa de erros que contém 75% dos dados vai de -43% até +74%.

Além disso, a Figura 15 mostra que os erros também aumentam quando o local de interesse está localizado muito a jusante do posto doador encadeado, ou seja, quando o valor da relação Ag/Au se aproxima de zero. Quando Ag/Au está no intervalo entre 0,1 e 0,25, isto é, quando a área de drenagem no local de interesse é de 4 a 10 vezes maior do que a área de drenagem no posto doador encadeado, a faixa de erros que contém 75% dos dados vai de -31% até +45%.

O gráfico da Figura 15 não é simétrico em torno do valor Ag/Au igual a 1. Aparentemente, os erros crescem mais rapidamente quando o local de interesse está localizado a montante do posto doador do que quando o local de interesse está a jusante do posto doador.

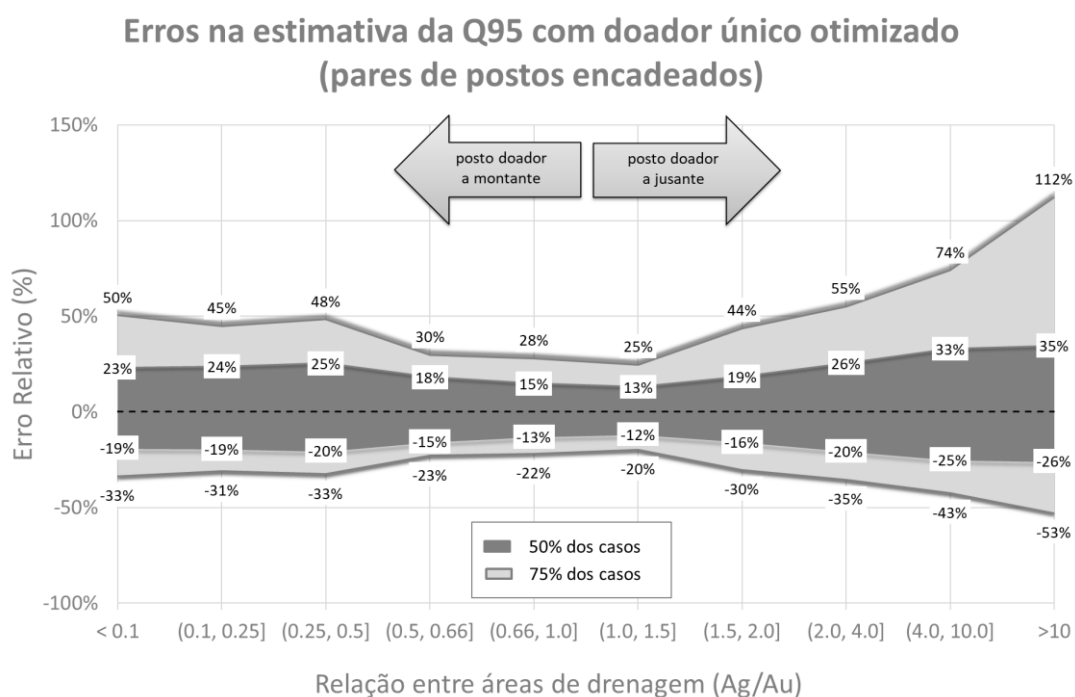


Figura 15: Relação entre o grau de encadeamento (medido pela relação entre áreas de drenagem Ag/Au) e as envoltórias dos erros relativos considerando 50% e 75% dos casos, na estimativa da vazão Q95, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), em pares de postos encadeados, considerando apenas postos fluviométricos com séries longas (mais de 30 anos).

É importante frisar que os resultados apresentados aqui são semelhantes, mas não completamente iguais aos apresentados por Sorribas et al. (2021a) em um artigo no XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Isto ocorre porque naquele trabalho, os resultados consideram as incertezas de um conjunto maior de cenários, incluindo até 10 postos doadores para cada local em análise e comparação da aplicação do método sem considerar, por exemplo, o critério de séries longas. Ao comparar as estimativas de erro obtidas para vazão QM e Q95 no presente estudo (Figura 14 e Figura 15) com os apresentados por Sorribas et al. (2021a) ilustrados nas Figura 1 e Figura 2, observa-se valores bastante similares na faixa central (50%, cinza escura). As diferenças se tornam mais visíveis ao se considerar a faixa de 75% dos casos, e à medida que as relações de áreas aumentam. A análise com múltiplos cenários demonstra claramente uma tendência de aumento de erros com a relação de áreas, pois abrange um conjunto maior de possibilidade de doadores em cada local. Ao considerar somente um doador e, visando uma boa escolha, o método OTI tende a produzir erros menores, mas os gráficos resultantes não incluem as incertezas de decisões alternativas. Assim, enquanto o estudo

presente demonstra as incertezas relacionadas ao utilizar um doador único escolhido de maneira análoga ao processo de decisão de profissionais especialistas, o estudo de Sorribas et al. (2021a) apresenta resultados que condizem com a possibilidade de erros na estimativa de vazões com o método da vazão específica, de maneira mais geral.

4.4 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA SÉRIE

Conforme descrito na metodologia, a avaliação do método da vazão específica foi aplicada para postos fluviométricos com vazões de referência (i) obtidas diretamente dos dados de séries longas e, também, (ii) obtidas com suporte de ajuste climático (séries curtas ajustadas). Os resultados apresentados até aqui referem-se apenas aos postos fluviométricos com séries longas. Entretanto, este trabalho contemplou também a aplicação do método para estimar a vazão média e Q95 em postos fluviométricos com séries curtas. Nesses locais, a vazão de série longa foi estimada pela série curta corrigida pela técnica do ajuste climático, conforme descrito em relatório anterior (Sorribas et al., 2021b). A seguir, os erros foram calculados ao utilizar a vazão específica de um doador otimizado com vazões de série longa, com a ressalva de que nessa situação, assume-se que a vazão obtida pelo ajuste climático na primeira etapa é a vazão “real”.

A Figura 16 e Figura 17 apresentam as curvas de distribuição dos erros, comparando as amostras de postos com séries curtas ajustadas (_SCA) com postos de séries longas (_SL). Observa-se que, tanto na vazão média como na Q95, os erros da estimativa em postos fluviométricos com série curta ajustada são maiores do que os erros em postos fluviométricos com série longa.

No caso das vazões médias (Figura 16), os erros ABSRQM apresentaram mediana e percentil 75% de 1,12 e 1,27, respectivamente, para as séries longas; e 1,18 e 1,44 para séries curtas ajustadas.

No caso das vazões Q95, os erros ABSRQ95 apresentaram mediana e percentil 75% de 1,23 e 1,50, respectivamente, para as séries longas; e 1,43 e 2,07 para séries curtas ajustadas. Os valores de 1,43 e 2,07 representam erros entre -30% a +43%, e entre -52% e +107%, respectivamente.

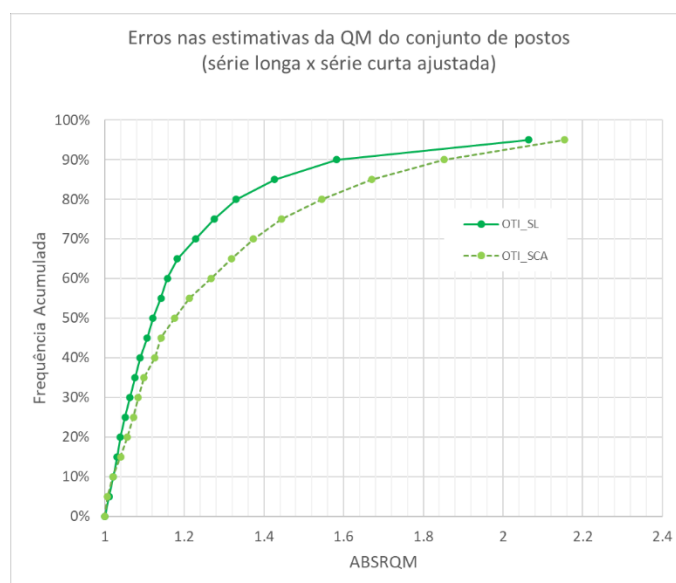


Figura 16: Erros nas estimativas de vazões médias do conjunto de postos, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), em casos de vazões de referência obtidos de séries longas (_SL) e séries curtas com ajuste climático (_SCA)

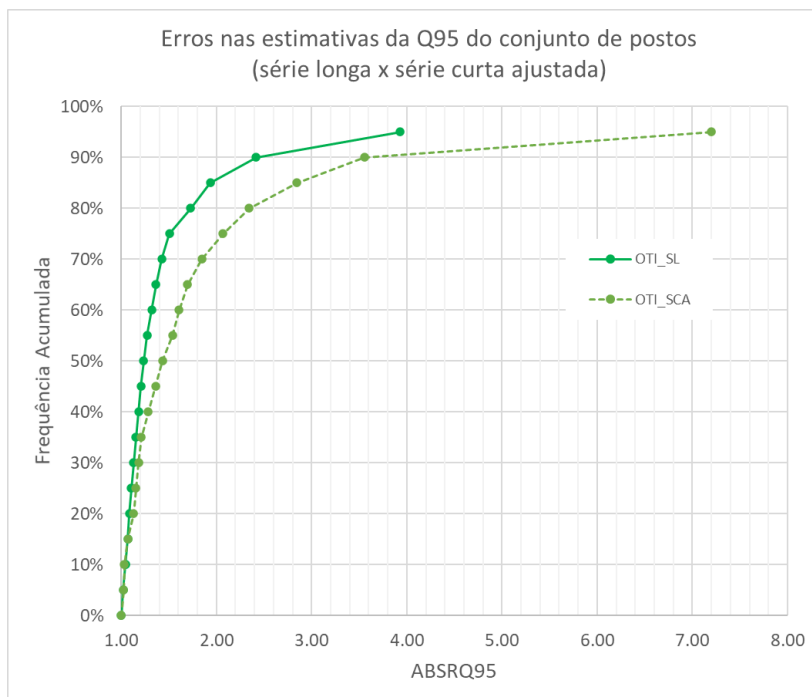


Figura 17: Erros nas estimativas de vazões Q95 do conjunto de postos, obtidos pela aplicação do método da vazão específica com doador otimizado (OTI), em casos de vazões de referência obtidos de séries longas (_SL) e séries curtas com ajuste climático (_SCA).

Esses resultados mostram que, em locais com vazões estimadas com séries curtas ajustadas, os erros esperados são maiores do que em locais com séries longas. Entretanto, não é possível saber, com segurança, se o procedimento de ajuste climático de séries curtas é o responsável por esses erros maiores, já que outros aspectos devem ser levados em conta.

Em primeiro lugar, nos locais com série curta ajustada existe a limitação das vazões reais não serem, de fato, conhecidas.

Em segundo lugar, os locais com séries curtas são diferentes dos locais com séries longas. Pode haver um viés de amostragem em que postos fluviométricos com séries curtas sejam diferentes de postos com séries longas. Por exemplo, é possível que locais com séries curtas sejam menos adequados para medição de vazão, com maiores erros na curva-chave.

Em terceiro lugar, os postos fluviométricos com séries curtas tendem a ter área de drenagem menor do que postos fluviométricos com séries longas. A área de drenagem mediana dos postos com série longa é 2640 km², e a área mediana dos postos com série curta ajustada é de 1570 km². E como os erros tendem a ser maiores em locais com menor área de drenagem, é natural que tenham sido encontrados diferenças entre as séries curtas e as séries longas como as apresentadas na Figura 16 e na Figura 17.

Por outro lado, análises anteriores (Sorribas et al., 2021b) demonstram que a aplicação do ajuste climático em séries curtas (com pelo menos 10 anos) é capaz de produzir vazões de referência com erros de 6% para vazão média e 14% para vazão Q95, na maior parte dos casos. Com essas considerações, não é possível descartar que as vazões de referência a partir de séries curtas ajustadas podem ter erros nas estimativas da vazão média entre -36% e +50%; e, na vazão Q95 entre -66% e +157%.

4.5 AVALIAÇÃO REGIONAL DA ESTIMATIVA DE VAZÃO COM BASE NA VAZÃO ESPECÍFICA

Devido à grande escala espacial do estudo realizado, a comparação de resultados foi realizada também para as diferentes regiões hidrográficas, enumeradas de R1 a R8, listadas na Tabela 1 da metodologia. O apêndice II apresenta figuras com os valores das métricas de erros RQM e RQ95 em cada região.

Nessa seção, apresenta-se gráficos de boxplot para os erros estimados (ABSRQM e ABSRQ95) nas vazões de referência obtidos de postos de cada região hidrográfica, em diferentes tons de cores. Para cada região, os resultados apresentam dois grupos, um para vazões obtidas em postos com série longa (_SL) e outro para os postos com série curta ajustada (_SCA). A linha central de cada “box” (ou “caixa”, traduzido do inglês) representa a mediana, enquanto os limites inferior e superior representam os percentis de 25 e 75%. Dessa maneira, o tamanho da caixa expressa a variabilidade dos dados entre 25 e 75% dos casos em cada grupo. Adotando a parte superior do box como referência para comparação, indica-se a ocorrência dos erros em 75% dos casos.

4.5.1 Erros nas estimativas da vazão média

A Figura 18 apresenta gráficos de boxplot para os erros na estimativa de vazão média (ABSRQM) obtidos ao utilizar o doador único otimizado (OTI) nas regiões R1 a R8.

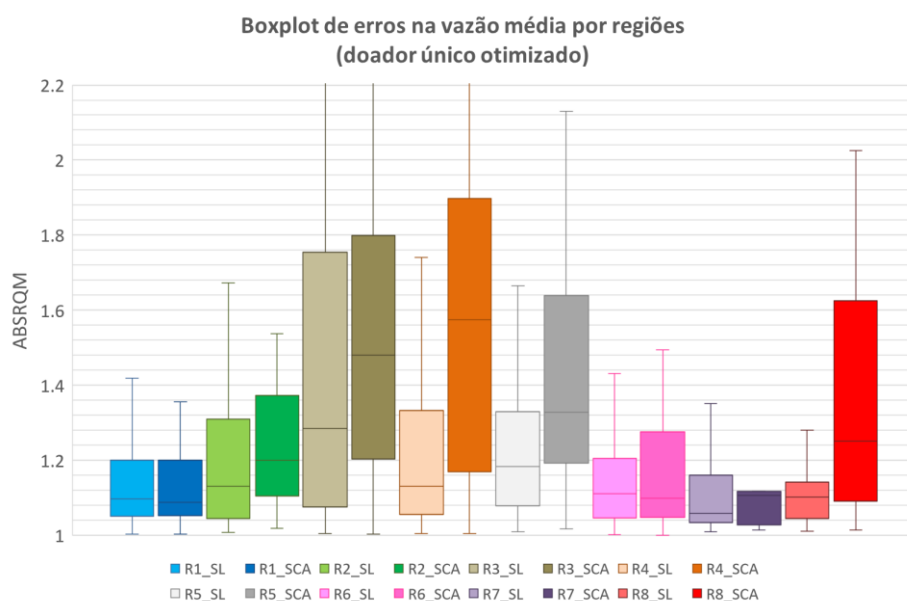


Figura 18: Boxplot de erros na estimativa da vazão média (ABSRQM) pelo método da vazão específica em cada região hidrográfica, com postos de séries longas ou séries curtas ajustadas, com o doador único otimizado

Na Figura 18 é possível observar que, na região Amazônica (R1), na maioria dos casos (75%), os valores de ABSRQM se encontram abaixo de 1,2 tanto nos resultados com séries longas e com séries curtas ajustadas. Na região Tocantins-Araguaia (R2) já é possível perceber uma amplitude maior dos erros, especialmente nos locais em que a vazão média foi calculada com séries curtas ajustadas.

A região que inclui Atlântico Nordeste e Parnaíba (R3) foi a que apresentou a maior amplitude de erros nos locais com série longa. O percentil 75% do erro ABSRQM se aproxima de 1,76 nesta região. Em locais com séries curtas ajustadas nesta região, os erros foram ainda maiores.

A região R4, que corresponde à bacia do rio São Francisco apresentou ABSRQM abaixo de 1,3 para a maior parte dos casos de séries longas, ou seja, indicando erros entre -23% e +30%. No entanto, em locais em que a vazão média foi estimada com base em séries curtas ajustadas, o valor do percentil 75% de ABSRQM é de, aproximadamente, 1,9, equivalente a erros entre -47% e +90%.

A região do Atlântico Leste e Sudeste (R5) abrange boa parte da costa brasileira, e a métrica ABSRQM, no percentil 75%, passou de 1,33 para 1,64 entre os postos de série longa e série curta, respectivamente. Em locais com séries longas os erros na região R5 são semelhantes aos encontrados na bacia do rio São Francisco (R4).

Na região do Paraná-Paraguai (R6), a métrica de ABSRQM sugere erros inferiores a 20% em postos com séries longas e, inferiores a 27% em locais com séries curtas ajustadas.

A região do rio Uruguai (R7) apresentou os menores erros de estimativa de vazão média pelo método da vazão específica com doador único. Nos locais com séries longas, o percentil 75% de ABSRQM, foi de 1,16, que corresponde a erros relativos entre -13% e +16%. E de forma diversa de todas as outras regiões hidrográficas, na R7 os erros da estimativa em locais com série curta ajustada foram menores do que os encontrados em locais com série longa.

Na região do Atlântico Sul (R8) a métrica ABSRQM, no percentil 75%, foi de 1,14 para séries longas e 1,63 para séries curtas ajustadas; indicando erros equivalente as faixas de -12 a +14% e, entre -38% e +63%, respectivamente.

4.5.2 Erros nas estimativas da vazão Q95

A Figura 19 apresenta gráficos de boxplot para os erros na estimativa de vazão Q95 (ABSRQ95) obtidos ao utilizar o doador único otimizado para as regiões R1 a R8.

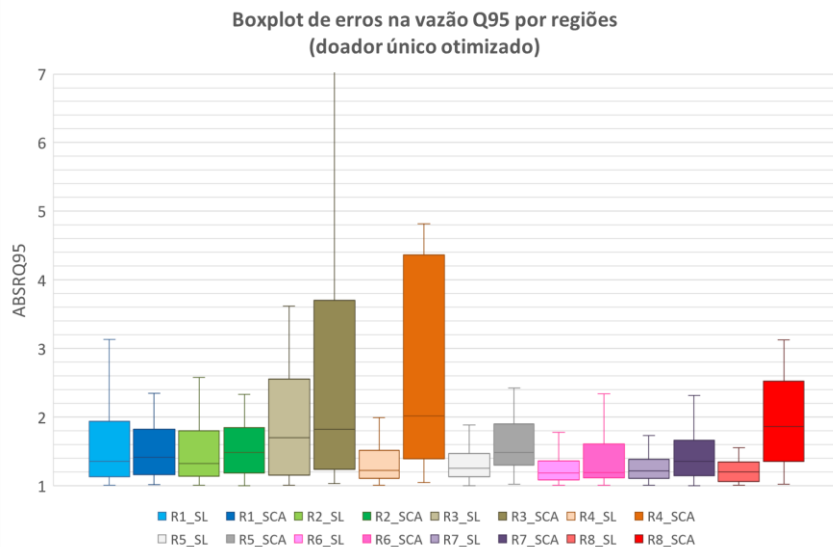


Figura 19: Boxplot de erros na estimativa da vazão Q95 (ABSQRQ95) pelo método da vazão específica em cada região hidrográfica, com postos de séries longas ou séries curtas ajustadas, com o doador único otimizado

É possível observar que na região Amazônica (R1), na maioria dos casos, os valores de ABSQRQ95 se encontram abaixo de 1,94, ou seja, entre -48% e +94%. Além disso, nessa região, os erros em locais com série longa e com série curta ajustada são da mesma ordem de grandeza.

A região Tocantins-Araguaia (R2), na maioria dos casos, apresentou ABSQRQ95 abaixo de 1,84, ou erros equivalentes entre -45 e +84%. Também não houve diferença grande entre os erros em locais com série longa e com série curta ajustada.

A região que inclui Atlântico Nordeste e Parnaíba (R3) apresentou erros mais acentuados. O percentil 75% de ABSQRQ95 foi de 2,5 nos locais com série longa, e de 3,7, aproximadamente, nos locais com série curta ajustada.

A região do São Francisco (R4) apresentou ABSQRQ95 abaixo de 1,5 para a maior parte dos casos de séries longas, ou seja, indicando erros na Q95 entre -33% e +50%. Em locais com séries curtas ajustadas, os erros são muito superiores, com o percentil 75% de ABSQRQ95 maior do que 4.

A região do Atlântico Leste e Sudeste (R5) abrange boa parte da costa brasileira, e a métrica ABSQRQ95, no percentil 75%, foi de 1,47 para os postos de série longa, ou seja, erros entre -32% e +47%. A aplicação do ajuste climático em postos com série curta produziu erros mais acentuados, sendo o percentil 75% de ABSQRQ95 igual a 1,90, ou seja, estimativas que podem estar, na prática, entre a metade ou o dobro da vazão observada.

Na região do Paraná-Paraguai (R6), o percentil 75% da métrica de ABSQRQ95 foi de 1,36 – ou, erros de -26 a +36% – em postos com séries longas e, de 1,61 – ou, erros de -38 a +61% em locais com séries curtas ajustadas.

A região do rio Uruguai apresentou os menores valores para o percentil 75% de ABSQRQ95, sendo de 1,37 para séries longas e 1,66 para séries curtas ajustadas. No primeiro caso, os valores equivalem a erros relativos entre -12 e +37%.

Na região do Atlântico Sul (R8) a métrica ABSRQ95, no percentil 75%, foi de 1,35 para séries longas e 2,52 para séries curtas ajustadas; indicando erros equivalente as faixas de -26 a +35% e, entre -60% e +152%, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

A avaliação de resultados da modelagem hidrológica para fins de regionalização de vazão, tem como etapa fundamental a comparação com métodos clássicos de estimativa de vazões em locais sem dados. O método da vazão específica é, possivelmente, o mais simples destes métodos clássicos.

Foi utilizado um método automático de escolha de posto fluviométrico doador que procura simular a escolha que seria realizada de forma manual, por uma pessoa com qualificação em hidrologia. Este método foi comparado com outros dois métodos simples e teve resultados claramente melhores do que escolher o posto fluviométrico mais próximo ao local sem dados, e ligeiramente melhores do que escolher o posto fluviométrico mais próximo a jusante, levando a concluir que o método otimizado simula razoavelmente a escolha de posto fluviométrico doador que seria realizada por uma pessoa qualificada.

O método de escolha automática de posto fluviométrico doador foi, então, aplicado para estimar as vazões de referência em 1336 postos fluviométricos no Brasil, como se nestes locais não houvesse dados, e a análise dos erros permite as conclusões que seguem.

- A vazão média real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo entre 19% a menos e 23% mais do que a vazão média estimada com base no método da vazão específica com um doador único, localizado a montante ou a jusante do local sem dados.
- Quando o local sem dados e o posto fluviométrico não estão encadeados, isto é, o local sem dados não está nem a montante nem a jusante do posto fluviométrico, a vazão média real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo entre 32% inferior e 48% superior à vazão média estimada com base no método da vazão específica com um doador único.
- Quando o posto fluviométrico doador está localizado a montante ou a jusante do local sem dados, de tal forma que mais da metade da área de drenagem é compartilhada, o método da vazão específica tem os menores erros. Neste caso, a vazão média real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo entre 12% a menos e 14% mais do que a vazão média estimada com base no método da vazão específica com um doador único.
- Os erros do método de vazão específica para estimar a vazão média em locais sem dados utilizando um posto fluviométrico doador único, localizado a montante ou a jusante, tendem a aumentar com a distância entre os postos. Quando a razão entre as áreas de drenagem dos dois locais é inferior a 1/10 ou superior a 10/1, os erros são apenas um pouco menores do que os erros encontrados quando o posto fluviométrico doador não está nem a montante nem a jusante do local sem dados.
- A vazão Q95 real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo que vai desde um valor 30% inferior e 43% superior à vazão Q95 estimada com base no método da vazão específica com um doador único, caso este doador esteja a montante ou a jusante do local sem dados.
- A vazão Q95 real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo que vai desde a metade até o dobro da vazão Q95 estimada com base no método da vazão específica com um doador único, caso este doador não esteja nem a montante nem a jusante do local sem dados.

- Quando o posto fluviométrico doador está localizado a montante ou a jusante do local sem dados, de tal forma que mais da metade da área de drenagem é compartilhada, o método da vazão específica tem os menores erros. Neste caso, a Q95 real de um local sem dados, na maioria das vezes (75%), está em um intervalo entre 22% a menos e 28% a mais do que a Q95 estimada com base no método da vazão específica com um doador único.
- Os erros do método de vazão específica para estimar a Q95 em locais sem dados utilizando um posto fluviométrico doador único, localizado a montante ou a jusante, tendem a aumentar com a distância entre os postos. Quando o local sem dados está situado a montante do posto fluviométrico doador, em um local em que a área de drenagem é menor do que 1/10 da área de drenagem do posto fluviométrico, a estimativa da Q95 tem erros tão grandes quanto os encontrados em locais não encadeados com o posto fluviométrico doador.
- O tamanho da série de dados observados parece afetar os erros das estimativas de vazões de referência utilizando o método da vazão específica, mesmo quando se procura remover o viés, por um procedimento de ajuste climático.
- Os erros do método, tanto no caso da vazão média como na vazão Q95, não são iguais em todas as regiões do Brasil. Os maiores erros foram encontrados em bacias com menor índice pluviométrico anual, como as regiões R3, R4 e R5 (Atlântico Nordeste, Rio Parnaíba, Rio São Francisco e Atlântico Leste). Os menores erros foram encontrados em bacias mais úmidas. A densidade de postos fluviométricos, maior em regiões como a bacia do rio Paraná, por exemplo, também parece estar associada a erros menores do método da vazão específica.
- Os resultados obtidos aqui refletem os erros da aplicação do método da vazão específica ao utilizar uma metodologia de escolha de posto doador único para cada local, emulando a decisão de profissionais especializados. Assim, apesar de existirem similaridades com os descritos por Sorribas et al. (2021b), destaca-se que por contemplar diferentes alternativas de postos fluviométricos doador para um mesmo local, o estudo anterior relata incertezas que abrangem a aplicação do método de forma mais ampla e generalizada.

6 REFERÊNCIAS

- Clarke R. T. & Tucci C. E. M. (2003) Regionalização Hidrológica. Em: Paiva J. B. D. de & Paiva E. M. C. D. DE (Orgs.), Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 169-222, 2003.
- Collischonn, W.; Sorribas, M. V.; Paiva, R.C.D. 2021. IPH-ANA-HGE-SR-R4 Relatório Técnico: O efeito da variabilidade amostral sobre a estimativa de vazões de referência. Porto Alegre, 2021.
- Laaha G. & Blöschl G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records—a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 264-286.
- Reis J. A. T., Guimarães M. A., Barreto Neto A. A., Bringheti J. (2008) Indicadores Regionais Aplicáveis à Avaliação do Regime de Vazão dos Cursos D'Água da Bacia Hidrográfica do Rio Itabapoana. 2008. *Geociências*, São Paulo, v. 27, n. 4, pp-509-516.
- Ries K.G., Friez P.J. (2000) Methods for estimating lowflow statistics for Massachusetts streams: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4135, 81 p.
- Salinas J. L., Laaha G., Rogger M., Parajka J., Viglione A., Sivapalan M., Blöschl G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins--Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 10(1).
- Silva, O. B., Bueno, E. D. O., Tucci, C. E., & Castro, N. M. (2003). Extrapolação espacial na regionalização da vazão. *RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(1), 21-37.
- Sorribas M. V., Collischonn W., Paiva R. C. D, et al. (2021a) Estudo sobre erros do método da vazão específica na estimativa de vazão em locais sem dados: uma primeira análise. Em: Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.
- Sorribas, M. V.; Collischonn, W.; Paiva, R.C.D. 2021. IPH-ANA-HGE-SR-R5 Relatório Técnico: O efeito do ajuste climático em séries curtas sobre a estimativa de vazões de referência. Porto Alegre, 2021.
- Tallaksen L. M., & Van Lanen H. A. (Eds.). (2004). *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*.
- Tucci C. E. M. (2002) Regionalização de vazões. Editora da Universidade. UFRGS. 1a edição. Porto Alegre.

7 APÊNDICE

7.1 MÉTODO OTIMIZADO DE ESCOLHA DE POSTO DOADOR

A avaliação de resultados da modelagem hidrológica para fins de regionalização de vazão, tem como etapa fundamental a comparação com métodos clássicos de estimativa de vazões em locais sem dados. O método da vazão específica é, possivelmente, o mais simples destes métodos clássicos.

O método da vazão específica consiste em multiplicar um valor de vazão específica, obtido em um posto fluviométrico na vizinhança do local de interesse, pelo valor área de drenagem do local de interesse. O posto fluviométrico com dados, ao qual se recorre para calcular a vazão específica, é chamado de posto doador, e a qualidade da estimativa da vazão pelo método da vazão específica depende do grau de homogeneidade hidrológica entre o posto “doador” e o local de interesse.

Uma hidróloga experiente provavelmente escolheria um posto fluviométrico doador cuja bacia tivesse a maior semelhança possível com a bacia do local de interesse. Neste sentido, a hidróloga poderia ponderar informações como a distância entre os locais, o encadeamento sobre a rede de drenagem, a diferença de magnitude das áreas de drenagem, as características geológicas, pluviométricas e topográficas.

Procurando simular a escolha que seria realizada por esta hidróloga, foi criado um método automático e replicável de escolha de posto doador.

Assim, a partir da base de vazões específicas simuladas e os respectivos erros previamente calculados, considerou-se a definição de uma função de utilidade que pondera medidas de vizinhança entre os pares de postos:

- distância entre postos
- distância entre centróides de bacia
- relação de áreas de drenagem
- grau de embutimento (encadeamento) das bacias de drenagem

A partir dessas considerações, uma função de utilidade por distância euclidiana (ED) foi elaborada, considerando coordenadas em três dimensões:

$$ED^2 = (w_{DR}F_{DR})^2 + (w_A F_A)^2 + (F_E)^2$$

onde: F_{DR} é a função das distâncias entre centróides das bacias e distância entre os postos; F_A é a função da relação de áreas de drenagem; F_E é a função do encadeamento entre postos; w_{DR} e w_A são ponderadores que podem ser utilizados para explorar o campo de otimização. Na aplicação realizada, os resultados foram obtidos otimização via enumeração, ou seja, pelo cálculo direto da função objetivo para diferentes pares w_{DR} e w_A .

As funções em cada dimensão são definidas da seguinte maneira:

$$F_A = 1 - \min\left(\frac{AD_X}{AD_D}, \frac{AD_D}{AD_X}\right)$$

$$F_D = \min\left(\frac{D_{CG}}{D_E}, \frac{D_E}{D_{CG}}\right)$$

$$F_R = \max \left(\frac{D_{CG}}{\sqrt{\frac{AD_X}{2\pi}}}, \sqrt{\frac{AD_X}{2\pi}} \right)$$

$$F_{DR} = \begin{cases} 1 - F_D F_R, & F_R < 1 \\ 1 - \frac{F_D}{F_R}, & F_R > 1 \end{cases}$$

$$F_E = \begin{cases} 1, & P_X \cap P_D = \emptyset \\ F_A, & P_X \cap P_D \neq \emptyset \end{cases}$$

onde: AD_X é o valor da área de drenagem no posto de referência (local de interesse) e AD_D é o valor área de drenagem do posto doador; D_{CG} é a distância entre centróides das bacias no posto de referência (local de interesse) e do posto doador; D_E é a distância entre o local de interesse e o posto doador; P_X e P_D , são os polígonos das áreas de drenagem no posto de referência e do posto doador. Em geral, as funções acima priorizam: postos com bacias embutidas (ou seja, rio abaixo ou acima); postos com áreas de drenagem mais similares; postos mais próximos; postos com bacias de drenagem próximas; e quanto maior o valor, maior a penalização.

Para uma visão mais intuitiva a respeito, podemos observar as figuras a seguir. Tomando a Figura 20 como referência a localização de postos candidatos a doadores em relação ao local/posto em X, podemos verificar qualitativamente as medidas de vizinhança.

A Figura 21 demonstra como pares de postos com magnitude similares de área de drenagem são priorizadas, em relação a pares onde o posto doador possui uma bacia muito pequena (ou grande) em relação ao local de interesse. A Figura 22 apresenta o conceito para as distâncias entre centroides de bacias, tal que, quanto maior essa distância, maior a penalização. Por fim, a Figura 23 demonstra a qualificação de doadores encadeados ou não-encadeados, tal que os postos encadeados são balanceados pela relação de áreas, enquanto os não-encadeados são candidatos inicialmente penalizados.

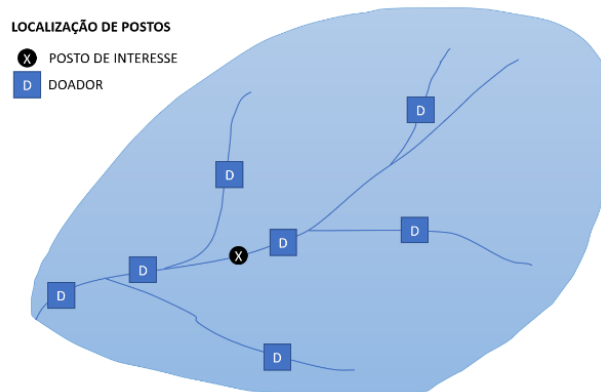


Figura 20: Exemplo de postos candidatos a doadores (D) em relação ao local/posto X.

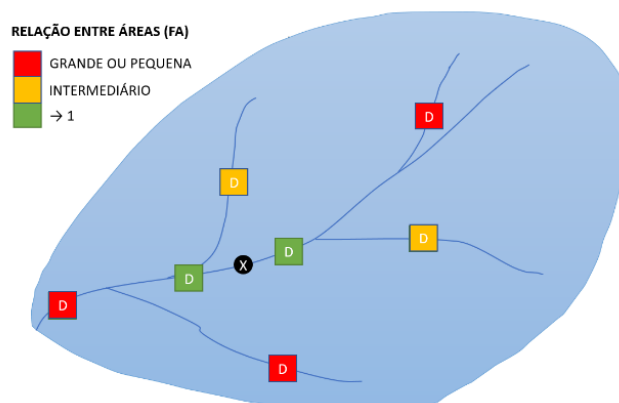


Figura 21: Exemplo da medida de relação entre áreas dos postos candidatos a doadores (D) em relação ao local/posto X.

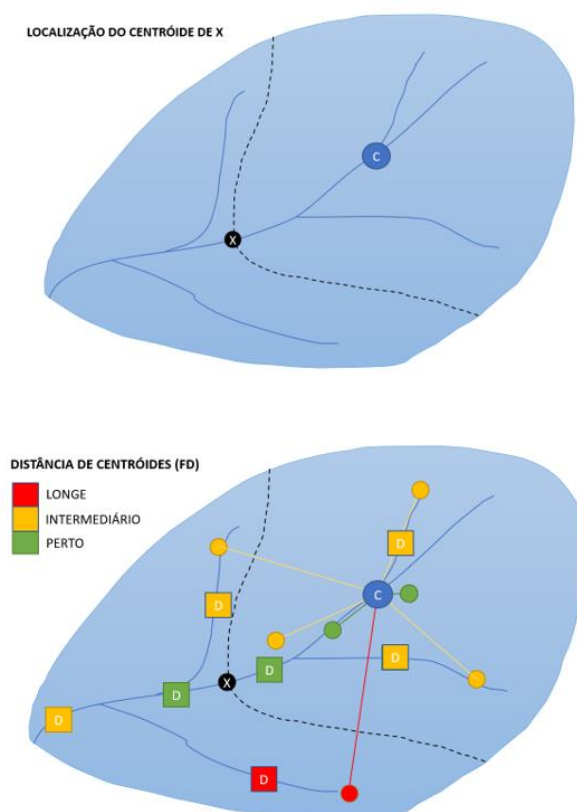


Figura 22: Exemplo de localização do centróide do local/posto X (acima) e medida de distância de centróides dos postos candidatos a doadores (abaixo).

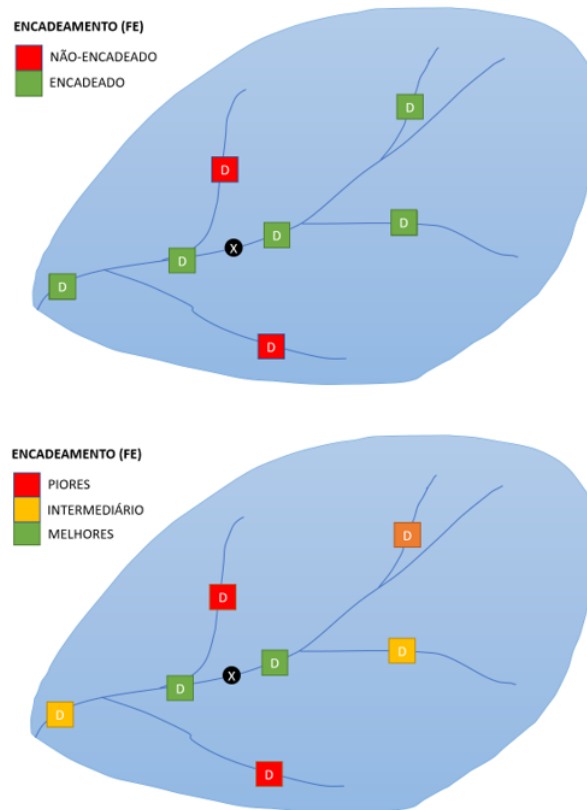


Figura 23: Exemplo da medida de encadeamento dos postos candidatos a doadores em relação ao local/posto X (acima) e pontuação dos postos encadeados (abaixo).

Uma função objetivo global pode ser definida identificando os valores de w_{DR} e w_A que resultam na escolha do doador único para cada local que minimiza a distribuição global do conjunto de erros das estimativas da vazão, em todos os postos, simultaneamente. Na prática, para cada posto de referência ($x=1\dots N$) indexado, busca-se o índice do posto doador que resulta no menor ED_x e o valor de uma métrica de erro. Ao repetir esse processo para todos os postos, obtém-se um conjunto de erros. A escolha do doador depende dos pesos de cada fator que são orientados pelos parâmetros (w_{DR}, w_A) que podem ser otimizados para minimizar o conjunto total de erros. Ao considerar a otimização desses parâmetros, na minimização dos erros da Q95 foram obtidos os parâmetros $(w_{DR}, w_A) = (0.333, 0.068)$. Cabe mencionar que esses valores não significam que o fator relacionado às distâncias é mais importante do que o fator de relação de área, pois as unidades de medida não são comparáveis. Os resultados demonstram que, em geral, a seleção otimizada busca os postos com áreas similares em bacias embutidas, e tende a favorecer postos em bacias vizinhas não-embutidas caso os demais doadores sejam penalizados pela distância.

Para facilitar a compreensão da otimização global, podemos partir de um exemplo onde a determinação do doador ótimo é aparentemente simples. Suponha a Figura 24, onde a vazão no posto X foi estimada utilizando diferentes candidatos a postos doadores na região. A partir dos erros calculados (coloridos qualitativamente), seria possível arbitrar que o doador ótimo para esse local seja aquele que fornece o menor erro, um posto próximo logo a montante (em verde). Por outro lado, o posto Y possui doadores que produzem erros parecidos, onde a escolha do doador ótimo talvez não é tão óbvia.

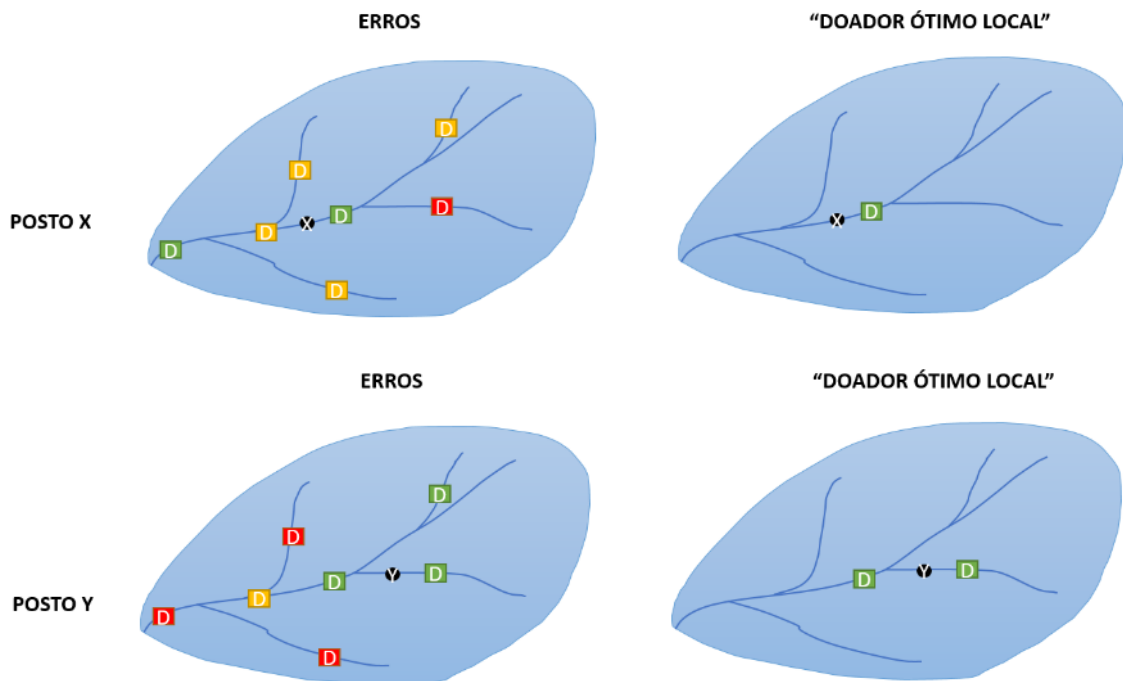


Figura 24: Exemplo de identificação do doador ótimo local (D) para um local de interesse ou posto fluviométrico (X) com base no erro de estimativa (acima); exemplo de local de interesse ou posto fluviométrico (Y) não possui um doador ótimo óbvio (abaixo).

No caso da otimização global, busca-se uma solução mais robusta, considerando dentre as diferentes possibilidades de pares de postos e doadores, aquela que fornece um único doador ótimo para cada local, mas considerando as propriedades de localização, medidas pelas funções de distância especificadas, adotando uma regra geral. Na prática, a modificação dos ponderadores não altera os erros entre posto receptor e doador, mas sim a decisão entre utilizar um posto candidato a doador, ou outro. O processo de decisão funciona minimizando o erro global decorrente da seleção de um conjunto ótimo de doadores, conforme descrito anteriormente e ilustrado a seguir (Figura 25).

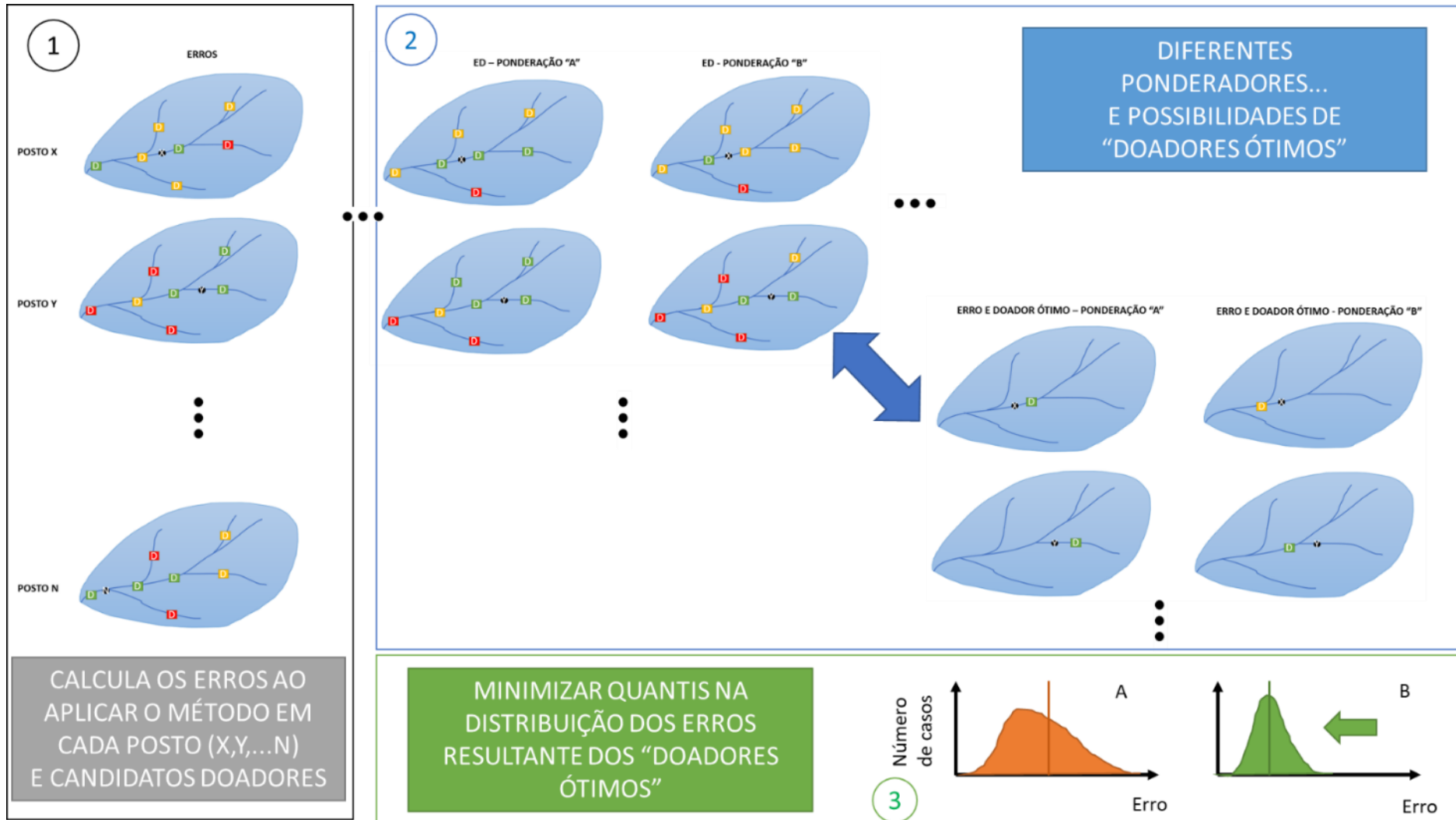


Figura 25 – Metodologia para otimização global de erros na estimativa (de todos os postos) e identificação de doador único pela enumeração de ponderadores

7.2 ERROS NAS ESTIMATIVAS DE VAZÃO MÉDIA E Q95 PARA DOADORES ÚNICOS OTIMIZADOS

O conjunto de mapas ilustrados na Figura 26 a Figura 33 apresentam os erros calculados para as vazões médias e vazões Q95, pelas métrica de RQM e RQ95, por regiões hidrográficas.

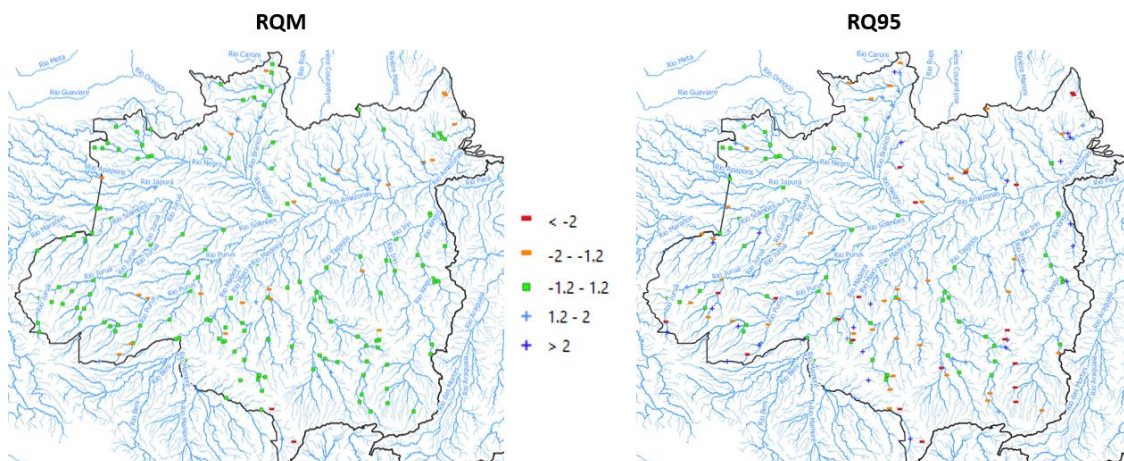


Figura 26: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) obtidos pelo método da vazão específica com doador otimizado para a região R1 - Amazônica

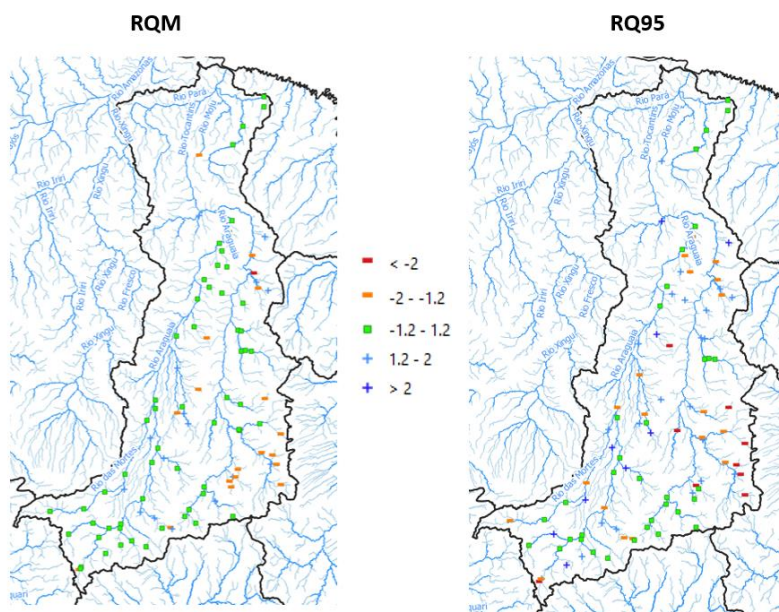


Figura 27: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) obtidos pelo método da vazão específica com doador otimizado para a região R2 - Tocantins-Araguaia

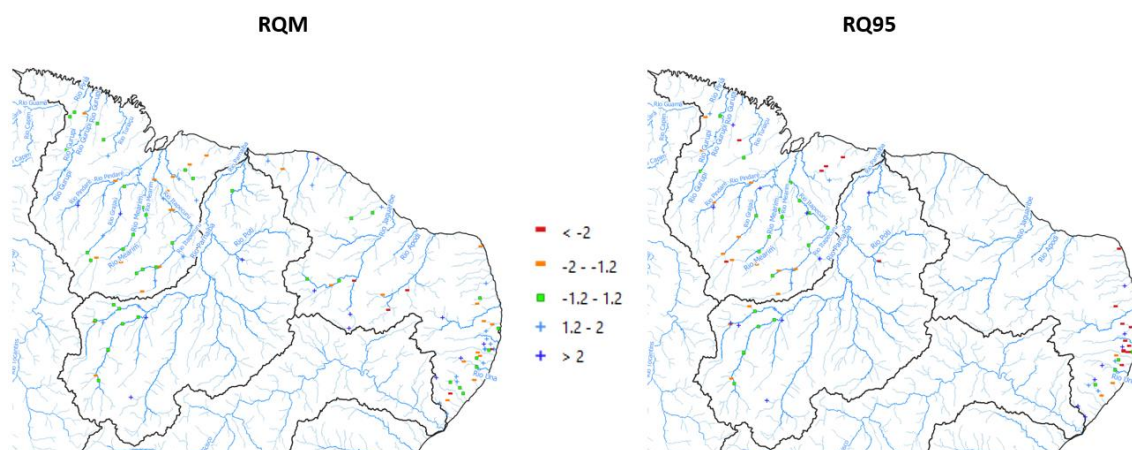


Figura 28: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) com a vazão específica do doador otimizado para a região R3 - Atlântico Norte, Parnaíba e Atlântico Nordeste

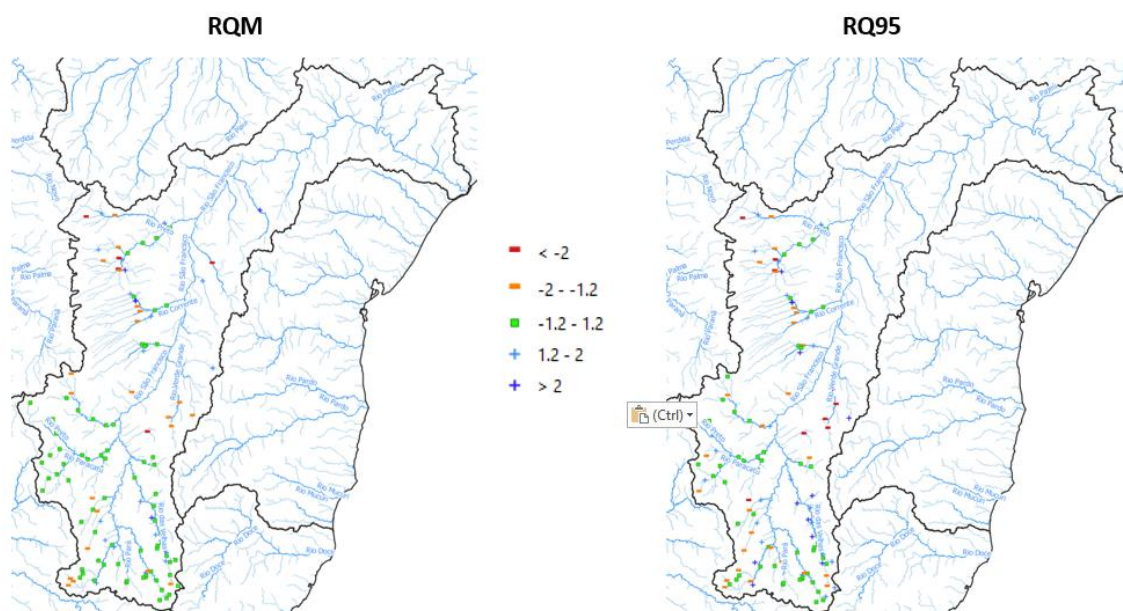


Figura 29: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) com a vazão específica do doador otimizado para a região do São Francisco

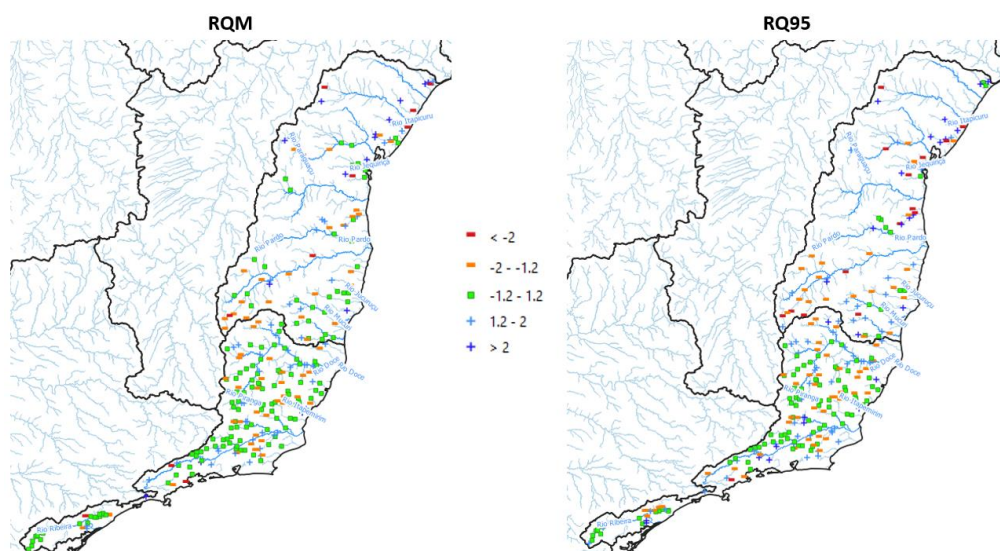


Figura 30: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) com a vazão específica do doador otimizado para a região do Atlântico Leste e Sudeste

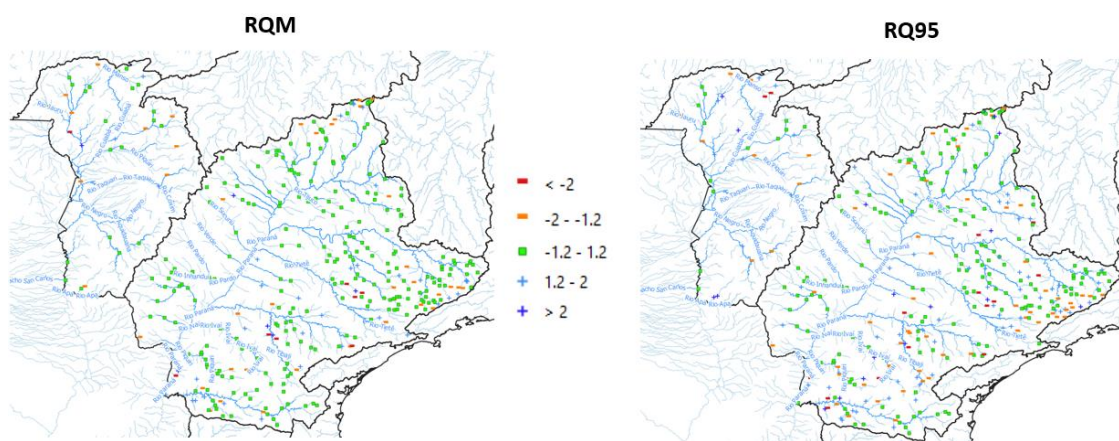


Figura 31: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) com a vazão específica do doador otimizado para a região do Paraná-Paraguai

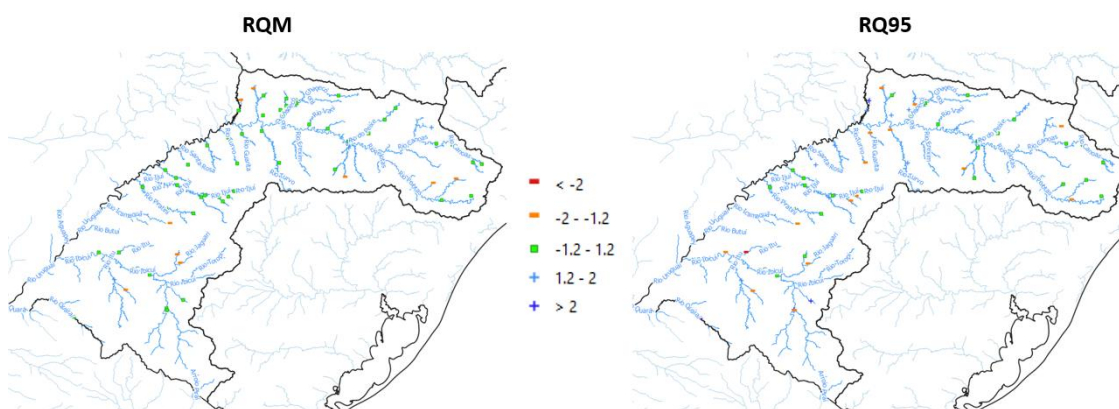


Figura 32: Mapa de erros na estimativa de vazão média (RQM) e vazão Q95 (RQ95) com a vazão específica do doador otimizado para a região do Uruguai

