

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

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

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA
ESTIMATIVAS DE VAZÕES DE REFERÊNCIA:
VAZÃO MÉDIA E Q95**

IPH-ANA-HGE-SR-R10

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

**Comparação de métodos
para estimativas de vazões
de referência: vazão média e Q95**



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, Cléber Henrique de Araújo Gama, Rafael Fontana, Larissa de Castro Ribeiro, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

COMO CITAR: Sorribas M. V., Collischonn, W., Gama, C. H. de A, Fontana, R., Ribeiro, L. de C., Paiva, R. C. D., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Comparação de métodos para estimativas de vazões de referência: Vazão média e Q₉₅: IPH-ANA-HGE-SR-R10. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Sumário

1	Apresentação	4
2	Introdução	5
3	Metodologia	7
3.1	Bases para comparação	7
3.2	Seleção de postos fluviométricos.....	8
3.3	Métricas de erro	9
4	Resultados	10
4.1	Resultados gerais da vazão média	10
4.2	Resultados gerais da Q95	11
4.3	Resultados da vazão média de acordo com a área de drenagem.....	13
4.4	Resultados da Q95 de acordo com a área de drenagem	15
4.5	Resultados de acordo com a disponibilidade de dados no entorno.....	17
4.5.1	Resultados da vazão média no caso 1.....	17
4.5.2	Resultados da vazão Q95 no caso 1	19
4.5.3	Resultados da vazão média no caso 2	20
4.5.4	Resultados da vazão Q95 no caso 2	22
4.5.5	Resultados da vazão média no caso 3.....	23
4.5.6	Resultados da vazão Q95 no caso 3	25
4.5.7	Resultados da vazão média no caso 4.....	26
4.5.8	Resultados da vazão Q95 no caso 4	28
4.6	Resumo de resultados em locais com área drenagem superior a 1000 km ²	29
4.7	Resumo de resultados em locais com área drenagem inferior a 1000 km ²	31
5	Conclusões.....	33
6	Referências	34

1 APRESENTAÇÃO

Este relatório é um dos produtos 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).

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 de estimativas de vazão obtidas com o modelo MGB-AS com as estimativas obtidas através de métodos mais tradicionais, como a regionalização de vazões.

Nesse contexto foram elaboradas bases para comparação de estimativas de vazões média e Q95 (vazão diária igualada ou superada em 95% do tempo) com resultados de modelagem hidrológica. Em relatórios individuais anteriores cada um dos métodos é apresentado com mais detalhes da metodologia e dos respectivos erros. Os métodos comparados no presente relatório foram:

- Estimativa baseada na simulação com modelo MGB Open Loop (Gama et al. 2021)
- Estimativa baseada na simulação com modelo MGB com assimilação de dados (Gama et al., 2021)
- Método da vazão específica com doador único (Sorribas et al., 2021a)
- Método da vazão específica incremental (Collischonn et al., 2021b)
- Machine-learning (Barbedo et al., 2021)

Nos dois primeiros métodos acima, as vazões de referência foram obtidas a partir de simulações do Modelo MGB da América do Sul (MGB-AS) em duas configurações, denominadas, retrospectiva (sem assimilação de dados) e reanálise hidrológica (com assimilação de dados) também descritos anteriormente.

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.

O método da vazão específica é, possivelmente, a mais simples técnica utilizada para estimar vazões de referência em locais sem dados em estudos hidrológicos de pequeno porte. As análises realizadas anteriormente nesse projeto (Collischonn et al 2021a; Sorribas et al., 2021a; 2021b) sugerem que incertezas de 10% na estimativa de uma vazão de referência a partir de séries longas em um posto fluviométrico é um valor bastante plausível. Da mesma maneira, para o método da vazão específica observa-se que postos fluviométricos localizados muito próximos uns dos outros podem ter vazões de referência específicas com diferenças da ordem de 10%.

O método baseado na vazão específica incremental considera que a área incremental entre duas ou mais postos fluviométricos é homogênea, admitindo-se assim uma vazão específica incremental constante nessa região. A estimativa da vazão específica incremental é realizada a partir da diferença entre a vazão do posto de jusante e as vazões dos postos imediatamente a montante dividida pelas respectivas diferenças de área (ANA 2020, NOTA TÉCNICA Nº 75/2020/SPR). Uma das vantagens do método da vazão específica incremental é a relação linear entre a vazão incremental e a área de drenagem. Esta relação linear diminui o risco de ser definida uma região cuja vazão incremental é negativa e mantém a continuidade de vazões ao longo da rede de drenagem.

Análises descritas em capítulo anterior (Collischonn et al. 2021b) sugerem que os erros dos métodos da vazão específica incremental podem depender da disponibilidade (topológica) dos dados de vazão. A Figura 1 apresenta quatro tipos de situação na aplicação do método da vazão incremental identificados, dependendo da disponibilidade de dados a montante do local sem dados (K), e em cursos d'água vizinhos.

- O caso 1 resulta em situação idêntica ao método da vazão específica com posto doador a jusante.
- O caso 2 ilustra a situação em que não há postos a montante do local sem dados, e a incremental é formada por pelo menos um posto fluviométrico adicional.
- Os casos 3 e 4 apresentam situações em que há postos a montante do local sem dados, e a área incremental possui (ou não, no caso 3) outros postos no delineamento da área incremental.

As análises do método da vazão incremental indicaram que o erro do método da vazão incremental quando existem dados de postos fluviométricos a montante e a jusante do local sem dados é da ordem de 10%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão média, e da ordem de 20%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão Q95. Entretanto, para situações em que não existem postos fluviométricos a montante do local sem dados, e em que o local sem dados está localizado em um rio que drena para um outro curso d'água localizado entre dois postos fluviométricos (Caso 2, na Figura 1), o método da vazão incremental não é superior ao método da vazão específica. O erro da estimativa do método da vazão incremental é da ordem de -30% a +43%, na maioria desses casos, quando é estimada a vazão média, e de -50% a +115%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão Q95.

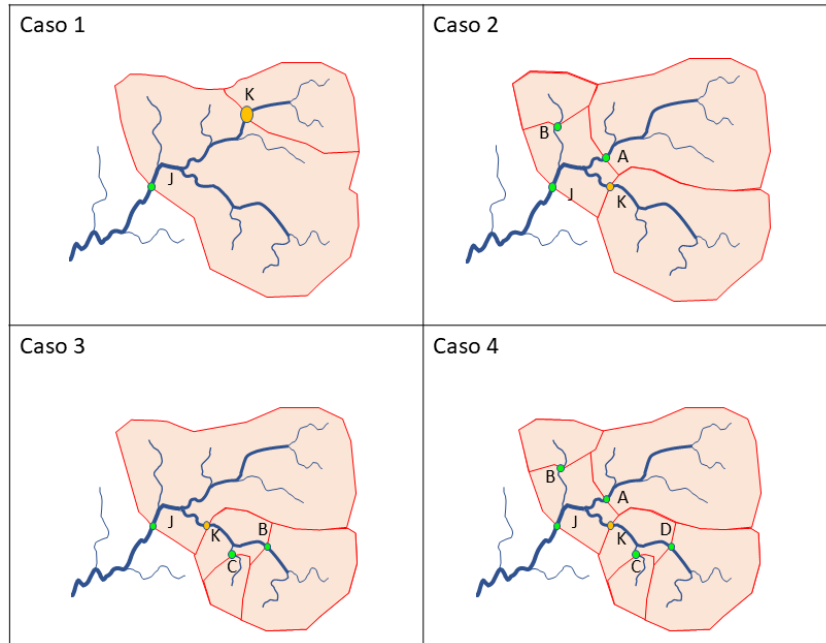


Figura 1: Casos típicos de combinações da localização de postos fluviométricos em relação ao local sem dados K, onde se deseja estimar a vazão, utilizando o método da vazão específica incremental.

A estimativa de vazões de referência via simulação hidrológica é um grande desafio, pois além das aproximações conceituais do modelo em relação a realidade, existem as incertezas relacionadas nos parâmetros, nos dados observados utilizados para calibração, mas também nos forçantes climáticos (e.g. chuva). Por outro lado, a aplicação de modelos de simulação tipicamente busca reproduzir não somente vazões de referência, mas o comportamento do regime de vazões ao longo do tempo. Para reduzir as incertezas associadas ao processo de simulação, as técnicas de Assimilação de Dados retroalimentam o modelo com os dados de observações, buscando aproximar as condições simuladas das observações disponíveis. Ao aplicar o método Ensemble Kalman Filter (EnKF) com o modelo MGB para aplicação na bacia do rio Taquari Antas, Wongchuig (et al. 2019) demonstrou ser eficiente em estimar vazões de referência, quando comparadas a métodos simplificados de regionalização.

A avaliação expandida da aplicação dessa técnica na simulação em rios nacionais e da América do Sul, já descrita em relatório anterior (Gama et al. 2021), demonstrou que a implementação da técnica de assimilação de dados no modelo MGB-SA permite melhorar o desempenho médio do modelo na estimativa de vazões diárias em todas as métricas avaliadas. A valor mediano do índice de Nash Sutcliffe apresentou um aumento de 0,65 da versão sem assimilação de dados (“Open-Loop”) para 0,71 com a utilização da assimilação de dados. O RMSE mediano do modelo foi reduzido de 59% para 49%. De forma semelhante, a assimilação de dados possibilitou uma significativa melhoria na estimativa de vazões de referência. Para a Q95, houve uma redução na mediana dos erros relativos de +26% para -2% e uma diminuição da dispersão dos erros, com redução da diferença entre o primeiro e terceiro quartis. Para as simulações com assimilação de dados, 50% dos postos avaliados tiveram erro na faixa -30 a +28%, enquanto na simulação original a faixa correspondia de -21 a +104%.

Neste capítulo apresentamos uma comparação dos erros obtidos pela modelagem hidrológica, em relação a resultados obtidos por métodos tradicionais de utilizados na estimativa de vazões em locais sem dados, para estimar vazões de referência (vazão média e Q95), considerando uma base de dados de 1069 postos fluviométricos do Brasil.

3 METODOLOGIA

A comparação dos erros de estimativa de vazão em locais sem dados utilizando a modelagem hidrológica com o MGB-AS foi realizada a partir das bases e resultados descritos nos relatórios anteriores.

3.1 BASES PARA COMPARAÇÃO

Assim, considera-se duas bases de modelagem hidrológica:

- MGB-AS no modo retrospectiva hidrológica, sem assimilação de dados, identificado aqui por MGB-OL (do inglês “open-loop”)
- MGB-AS no modo reanálise hidrológica, com assimilação de dados, identificado aqui por MGB-DA (do inglês “data assimilation”)

E, bases obtidas a partir de métodos tradicionais:

- método da vazão específica com doador único otimizado (OTI)
- método da vazão específica incremental (INC)
- método baseado em dados (ML)

Para isto foram selecionados postos fluviométricos da base de dados Hidroweb, e foram utilizadas métricas de quantificação dos erros (em relação aos dados observados), conforme descrito mais adiante.

Para o método da vazão específica e para o método da vazão específica incremental, os erros foram obtidos a partir da simulação da ausência de dados em locais em que efetivamente existem dados de vazão observada (“leave-one-gauge out”). Dessa forma, as estimativas de vazões e erros decorrentes são representativos da aplicação da técnica de maneira generalizada, com enfoque na capacidade preditiva.

Para os resultados da modelagem hidrológica, as vazões calculadas e erros foram obtidos considerando uma validação por agrupamento. Isso porque em um cenário ideal, a aplicação do procedimento de “leave one gauge out”, isto é, a realização de múltiplas simulações, assimilando dados de todos os N postos fluviométricos exceto um posto por vez e verificando alterações no desempenho do modelo na estimativa das vazões no mesmo local não utilizado na assimilação (emulando um local sem dados) exigiria a aplicação do método N vezes, inviabilizando a aplicação em tempo hábil devido ao alto custo computacional. Assim, optou-se por reduzir o número de simulações a partir do agrupamento de postos fluviométricos adotando um procedimento que pode ser denominado “leave 1/10 gauges out”, em que o conjunto de postos foi dividido em 10 grupos compostos por 10% das estações. Assim, cada experimento realizado é simulado 10 vezes, onde em cada simulação são assimilados os dados de 10% dos postos fluviométricos. Esse processo de validação foi realizado para os postos fluviométricos em que a área de drenagem é superior a 1000 km².

Para postos fluviométricos com área inferior a 1000 km², as vazões foram obtidas após a aplicação da técnica de downscaling para Base Hidrográfica Ottocodificada 5K 2017 conforme descrito em Sorribas et al. (2021) e, portanto, refletem as incertezas da transferência de resultados das simulações, em locais a parte da resolução original do MGB-AS.

3.2 SELEÇÃO DE POSTOS FLUVIOMÉTRICOS

O estudo foi realizado a partir de vazões de referência, Q95 e vazão média, calculados a partir de séries diárias 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 20 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. 2021a) demonstraram que as estimativas a partir de 20 anos de dados apresentam erros inferiores a 5% na vazão média e inferiores a 15% na Q95 (quando comparados a séries de 30 a 35 anos) na maioria dos casos avaliados.

Considerando esses critérios, foram identificados 1069 postos fluviométricos. Desses, 795 postos apresentaram posto fluviométrico a jusante e, portanto, são locais onde o método da vazão específica incremental pode ser aplicado. Os demais são utilizados como suporte para delineamento das áreas incrementais. A comparação é realizada considerando somente os postos fluviométricos onde foi realizada estimativas para todos os métodos. Por fim, a avaliação foi realizada a partir de 705 postos fluviométricos, dos quais 465 possuem área de drenagem superior a 1000 km² (compatíveis a discretização do MGB-AS) e 240 possuem área de drenagem inferior a 1000 km² (obtidos via downscaling).

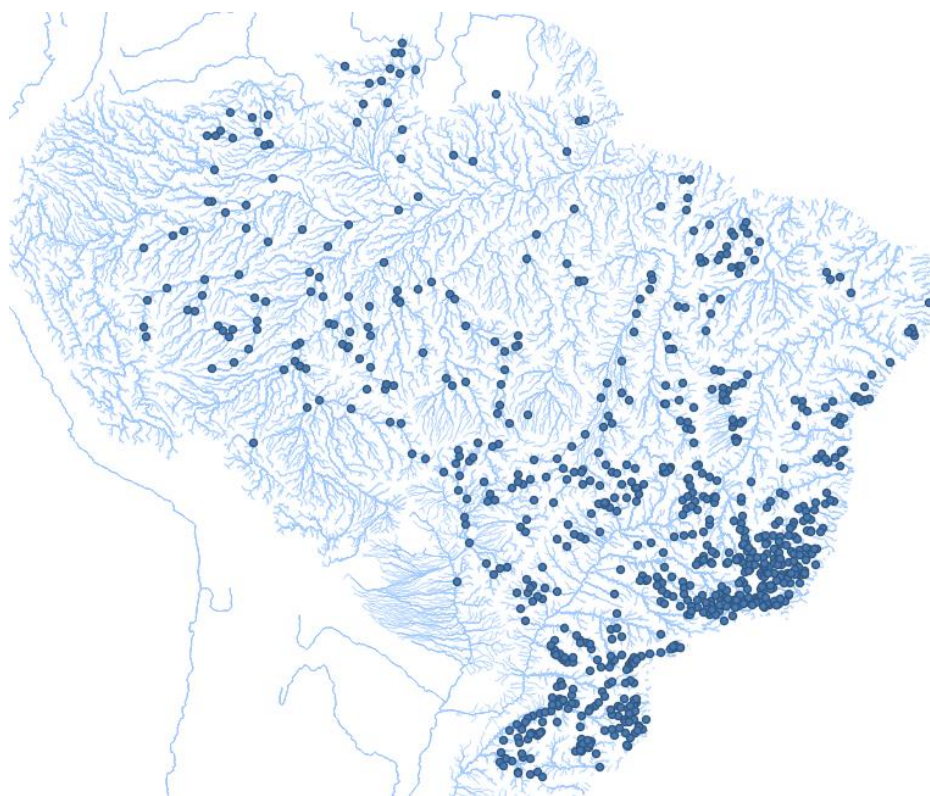


Figura 2: Postos fluviométricos utilizados para comparação dos erros dos diferentes métodos para estimativa de vazões.

Por fim, na análise de erros, considerou-se o tipo de situação de disponibilidade de dados em relação ao local sem dados, referentes aos casos 1, 2, 3 e 4 já descritos anteriormente. Foram

identificados 151, 250, 107 e 197 postos fluviométricos para cada caso, respectivamente. Devido à ocorrência de casos isolados de vazão esp. incremental negativa ou vazões Q95 nulas, alguns postos foram removidos da análise (*viz.* quatro na vazão média e quatorze na Q95).

3.3 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:

$$RES = QR_{est} - QR_{real} \quad (1)$$

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:

$$RES = \frac{QR_{est} - QR_{real}}{A} \quad (2)$$

onde A é a área de drenagem da bacia hidrográfica.

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

$$ER(\%) = 100 \left(\frac{QR_{est} - QR_{real}}{QR_{real}} \right) \quad (2)$$

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.

$$RQM = \text{Sinal}(QM_{est} - QM_{real}) \cdot \text{Máximo} \left(\frac{QM_{est}}{QM_{real}}, \frac{QM_{real}}{QM_{est}} \right) \quad (3)$$

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:

$$ABSRQM = \text{Máximo} \left(\frac{QM_{est}}{QM_{real}}, \frac{QM_{real}}{QM_{est}} \right) \quad (4)$$

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 3, adaptada para a vazão de referência Q95, resulta na métrica RQ95, e a equação 4, adaptada para a Q95, resulta na métrica ABSRQ95.

4 RESULTADOS

A avaliação comparativa foi realizada a partir da distribuição de frequência dos erros de estimativa das vazões média e Q95 nos locais dos postos fluviométricos, sempre considerando “leave one gauge out”, conforme descrito antes.

Inicialmente foram analisados os resultados gerais, considerando todos os métodos em todos os locais testados.

Num segundo momento, os resultados foram testados separando os locais em dois grupos, de acordo com a área de drenagem: a) postos com mais de 1000 km²; b) postos com menos de 1000 km². Esta divisão foi adotada porque as estimativas de vazão obtidas com o modelo MGB seguem duas metodologias diferentes, dependendo de o local estar ou não representado pela rede de drenagem definida na discretização do modelo MGB-AS. Por esse critério, os resultados do MGB-AS nos locais com área de drenagem superior a 1000 km² podem ser obtidos diretamente a partir da vazão calculada em trechos da rede de drenagem do modelo, enquanto nos locais com área de drenagem inferior a 1000 km² os resultados são obtidos a partir da vazão calculada internamente em cada mini-bacia do modelo MGB.

Posteriormente, os resultados foram analisados considerando os quatro casos diferentes de aplicação do método de vazão específica incremental, que são definidos em função da disponibilidade de dados a montante e a jusante do local sem dados, conforme ilustrado na Figura 1.

4.1 RESULTADOS GERAIS DA VAZÃO MÉDIA

A Figura 3, apresenta a distribuição da métrica ABSRQM dos diferentes métodos de estimativa de vazão em locais sem dados nos postos fluviométricos em que foi possível aplicar todos os métodos.

Observa-se, na Figura 3, que as duas curvas das distribuições de erros relativos às estimativas de vazão obtidas com o modelo MGB estão posicionadas acima das demais curvas. Isto significa que as estimativas de vazão média obtidas com o modelo MGB-AS, tanto na simulação MGB-OL (sem assimilação de dados) como na reanálise MGB-DA (com assimilação de dados), apresentam erros maiores do que os outros métodos.

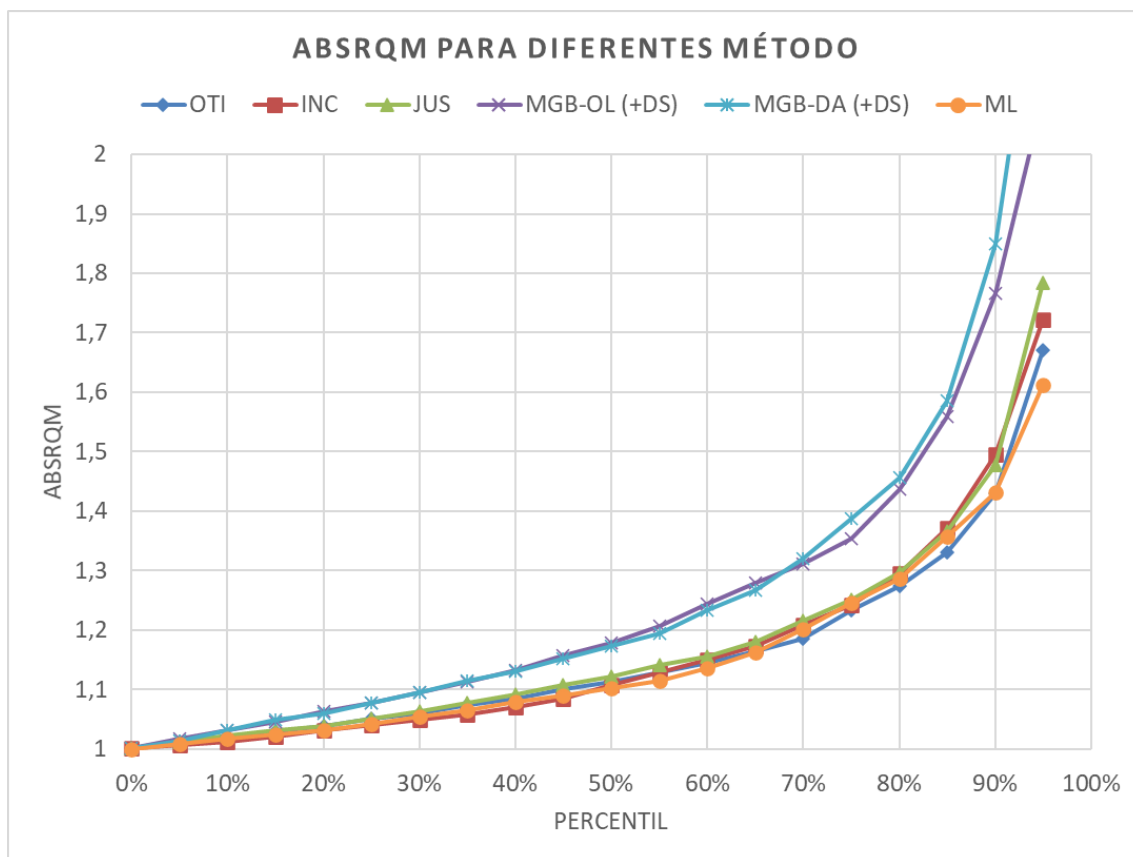


Figura 3: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando todos os locais em que foi possível aplicar todos os métodos.

Além disso, a Figura 3 também mostra que, na estimativa da vazão média em locais sem dados, há poucas diferenças entre os resultados do MGB da América do Sul nas rodadas com e sem assimilação de dados. O valor mediano da métrica ABSRQM nas duas estimativas baseadas no MGB é da ordem de 1,17, o que corresponde a erros de 15% a menos até 17% a mais do que a vazão real, na estimativa da vazão média em um local sem dados.

Da mesma forma, a Figura 3 mostra que há pouca diferença entre os demais métodos considerados (Vazão específica baseada nos dados de um único posto; Vazão específica incremental; Machine-Learning), todos eles com valores medianos de ABSRQM da ordem de 1,11, indicando erros de estimativa da vazão média na faixa de 10% a menos até 11% mais, aproximadamente.

4.2 RESULTADOS GERAIS DA Q95

A Figura 4 apresenta a distribuição da métrica ABSRQ95 dos diferentes métodos de estimativa de vazão Q95 em locais sem dados nos postos fluviométricos em que foi possível aplicar todos os métodos.

Observa-se, na Figura 4, que as duas curvas das distribuições de erros relativos às estimativas de vazão Q95 obtidas com o modelo MGB estão posicionadas acima das demais curvas. Isto significa que as estimativas de Q95 obtidas com o modelo MGB-AS, tanto na simulação MGB-OL (sem assimilação de dados) como na reanálise MGB-DA (com assimilação de dados), apresentam

erros maiores do que os outros métodos. Entretanto, a curva relativa às estimativas obtidas com o modelo MGB com assimilação de dados (MGB-DA) está localizada abaixo da curva relativa a MGB sem assimilação de dados (MGB-OL), mostrando o benefício da assimilação de dados na estimativa das vazões mínimas.

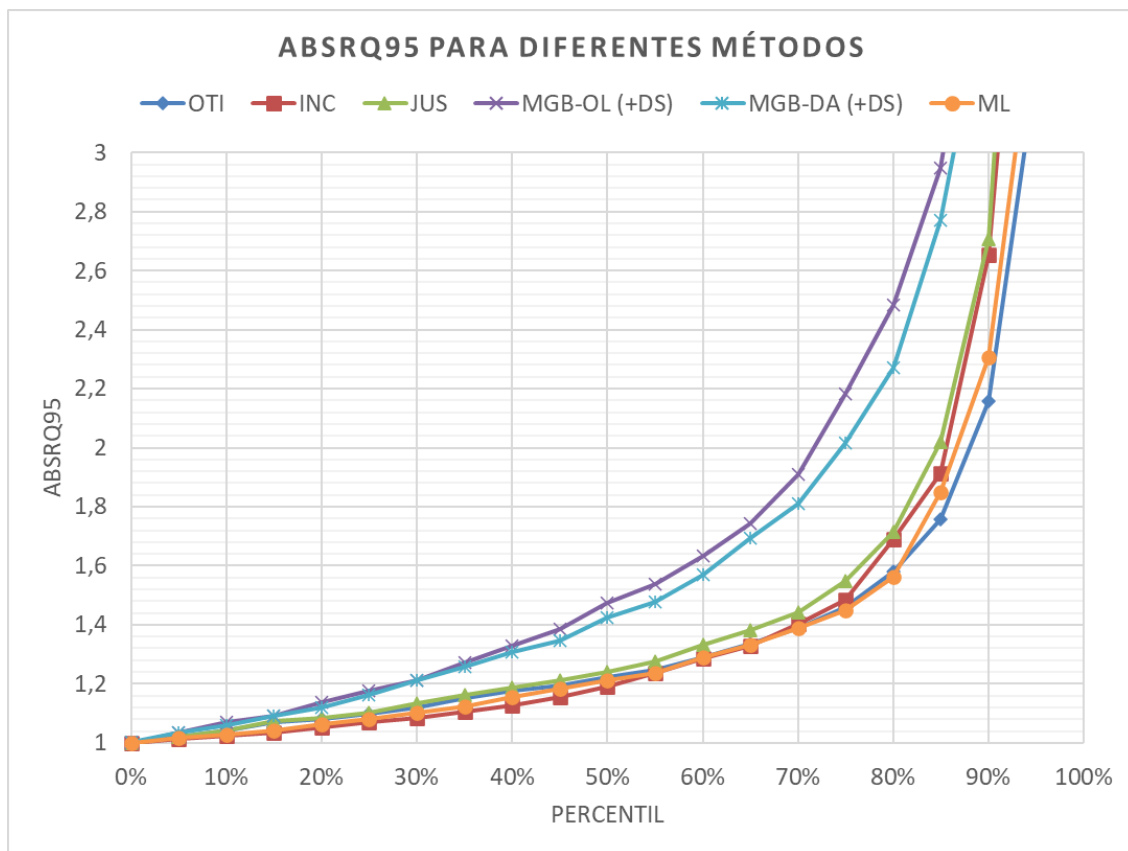


Figura 4: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando todos os locais em que foi possível aplicar todos os métodos.

O valor mediano da métrica ABSRQ95 da estimativa MGB-OL é 1,47, e da estimativa MGB-DA é 1,43. Estes valores da métrica indicam que, em 50% dos casos, a vazão de referência Q95 real está dentro de um intervalo entre 32% a menos e 47% a mais do que a estimativa MGB-OL, e que, em 50% dos casos, a vazão de referência Q95 real está dentro de um intervalo entre 30% a menos e 43% a mais do que a estimativa MGB-DA.

O valor do percentil 75% da métrica ABSRQ95 da estimativa MGB-OL é 2,18, e da estimativa MGB-DA é 2,01. Estes valores da métrica indicam que, em 3 de cada 4 casos, a vazão de referência Q95 real está dentro de um intervalo entre 54% a menos (menos da metade) e 118% a mais (mais do que o dobro) do que a estimativa MGB-OL, e que, em 3 de cada 4 casos, a vazão de referência Q95 real está dentro de um intervalo entre 50% a menos (metade) e 101% a mais (o dobro) do que a estimativa MGB-DA.

Entre os métodos utilizados como benchmark, o melhor desempenho (considerando o percentil 75% da métrica ABSRQ95) é do método de estimativa baseado em Machine-Learning (método ML), com valor de ABSRQ95 igual a 1,45, seguido do método da vazão específica com doador único otimizado (método OTI), com valor de ABSRQ95 igual a 1,46, e do método da vazão específica incremental (método INC), com valor de ABSRQ95 igual a 1,48.

4.3 RESULTADOS DA VAZÃO MÉDIA DE ACORDO COM A ÁREA DE DRENAGEM

As vazões de referência obtidas com o modelo MGB descritas neste relatório referem-se à aplicação do modelo MGB em toda a América do Sul. No desenvolvimento do modelo foi adotada uma discretização em mini-bacias, com área de drenagem individual de, aproximadamente, 1000 km². Em locais com área de drenagem superior a 1000 km², a estimativa da vazão de referência a partir dos resultados do MGB foi obtida de forma relativamente simples, porque nesta escala espacial o modelo gera resultados. Já em locais com área de drenagem inferior a 1000 km², foi necessário aplicar uma extrapolação inferior, a partir das vazões calculadas pelo modelo em locais com mais de 1000 km². Por esse motivo, considerou-se importante analisar separadamente os resultados em locais com área superior e inferior a este limite.

A Figura 5 apresenta as distribuições dos valores da métrica ABSRQM utilizando os diferentes métodos de estimativa de vazão média em locais sem dados, considerando apenas os postos fluviométricos com área de drenagem superior a 1000 km², e a Figura 6 apresenta o mesmo resultado, porém para os locais com área de drenagem inferior a 1000 km². Com base nestas duas figuras é possível observar que as estimativas obtidas com o modelo MGB têm desempenho pior do que os outros métodos, tanto em locais com área de drenagem superior a 1000 km² como em locais com área de drenagem inferior a 1000 km².

Em locais com área de drenagem maior do que 1000 km², a assimilação de dados aplicada ao modelo MGB resulta em um benefício, reduzindo os erros na estimativa da vazão média na maioria dos casos. Já em locais com área de drenagem menor do que 1000 km², a assimilação de dados aplicada ao modelo MGB resulta em um desempenho pior, em relação a simulação sem assimilação de dados, na maioria dos casos.

Em locais com área de drenagem superior a 1000 km², o método que apresenta os melhores resultados é o método da vazão incremental, com valor mediano de ABSRQM igual a 1,08. Em locais com área de drenagem inferior a 1000 km², o método que apresenta o melhor desempenho é o ML, com valor mediano de ABSRQM igual a 1,12.

Em locais com área de drenagem inferior a 1000 km², o método de vazão incremental (INC) tem erros maiores do que os métodos ML, OTI e JUS.

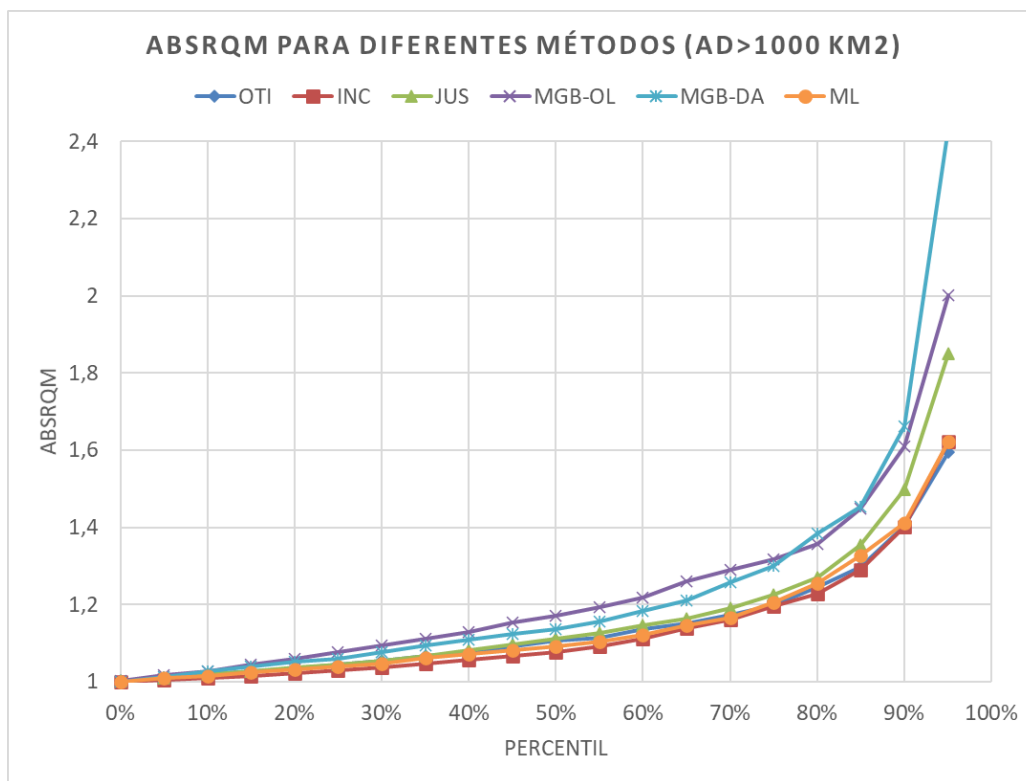


Figura 5: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km² em que foi possível aplicar todos os métodos.

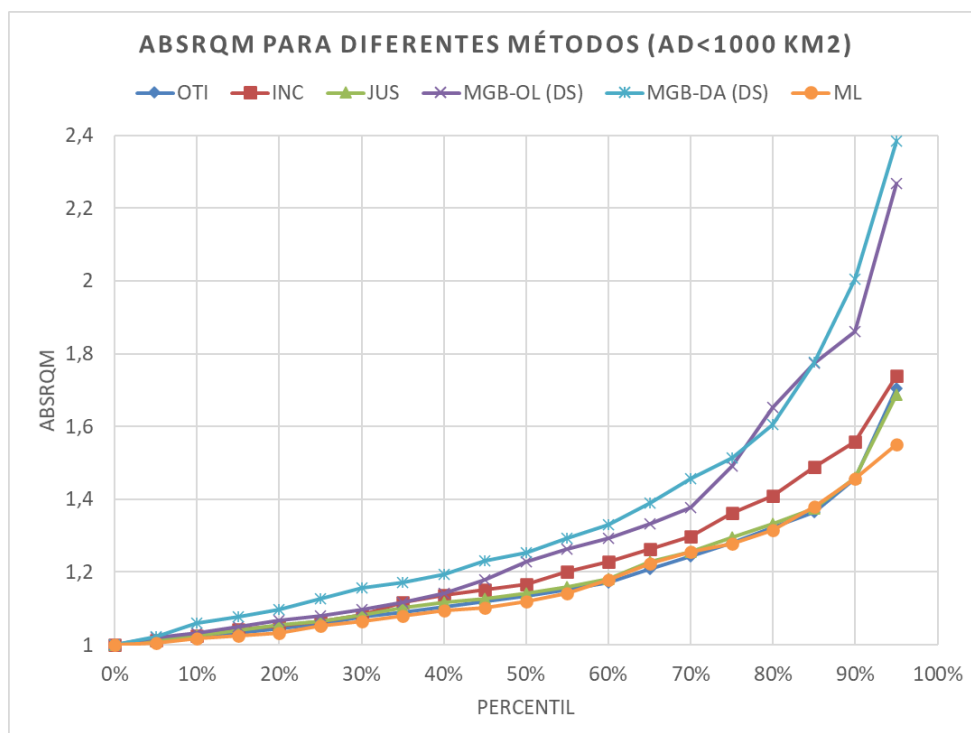


Figura 6: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km² em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.4 RESULTADOS DA Q95 DE ACORDO COM A ÁREA DE DRENAGEM

A Figura 7 apresenta as distribuições dos valores da métrica ABSRQ95 utilizando os diferentes métodos de estimativa de Q95 em locais sem dados, considerando apenas os locais com área de drenagem superior a 1000 km², e a Figura 8 apresenta o mesmo resultado, porém para os locais com área de drenagem inferior a 1000 km². Com base nestas duas figuras é possível observar que as estimativas obtidas com o modelo MGB têm desempenho pior do que os outros métodos, tanto em locais com área de drenagem superior a 1000 km² como em locais com área de drenagem inferior a 1000 km².

A Figura 7 mostra que, em locais com área de drenagem maior do que 1000 km², os valores da métrica ABSRQ95 do método MGB-DA são inferiores aos do método MGB-OL, mostrando o benefício da técnica de assimilação de dados para a estimativa da vazão Q95 nesta escala espacial. Tomando o percentil 75% como representativo, o valor de ABSRQ95 cai de mais de 2,2 (MGB-OL) para menos de 1,9 (MGB-DA) com a introdução da assimilação de dados.

A Figura 8, por outro lado, mostra que em locais com área de drenagem menor do que 1000 km², os valores da métrica ABSRQ95 do método MGB-DA são superiores aos do método MGB-OL, mostrando que a técnica de assimilação de dados piora o desempenho do modelo nesta escala espacial. Tomando o percentil 75% como representativo, o valor de ABSRQ95 aumenta de, aproximadamente, 1,9 (MGB-OL) para mais de 2,0 (MGB-DA), com a introdução da assimilação de dados.

A Figura 7 mostra que, em locais com área de drenagem superior a 1000 km², o método da vazão incremental parece ter vantagens, com erros menores do que todos os outros métodos em boa parte das situações (na faixa de percentis de 0% a 70%). Entretanto, tomando como representativo o percentil 75%, o método da vazão incremental fica ligeiramente atrás dos métodos ML e OTI. Já a Figura 8 mostra que, em locais com área de drenagem inferior a 1000 km², o método da vazão incremental é superado pelos métodos OTI, JUS e ML.

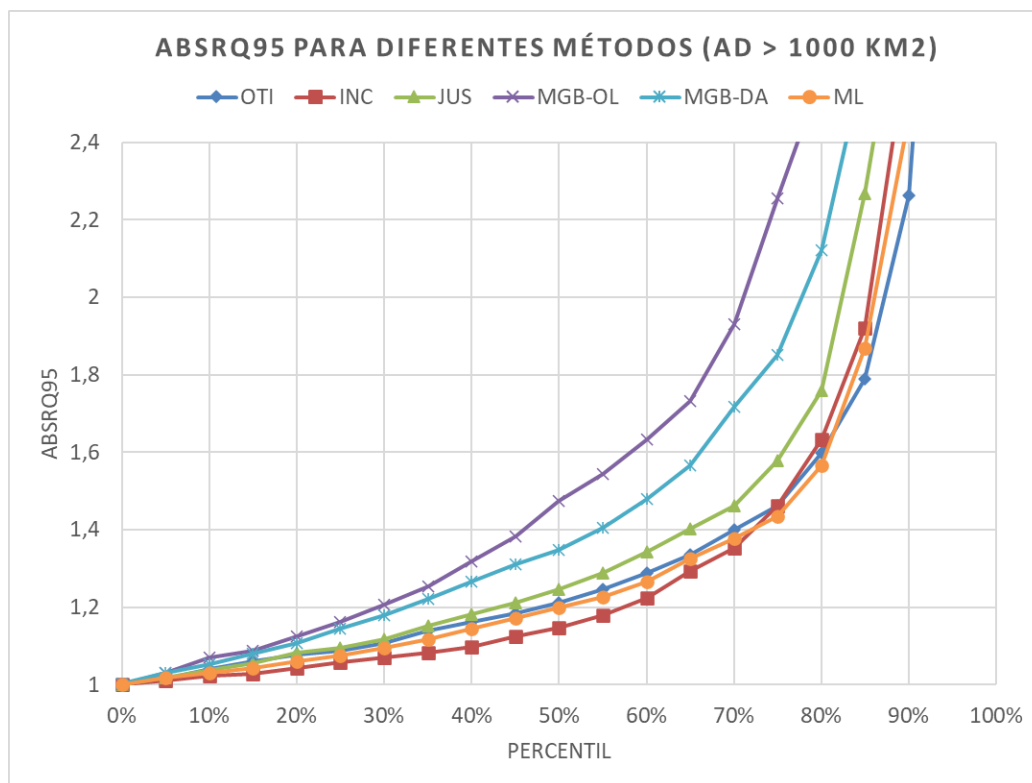


Figura 7: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km² em que foi possível aplicar todos os métodos.

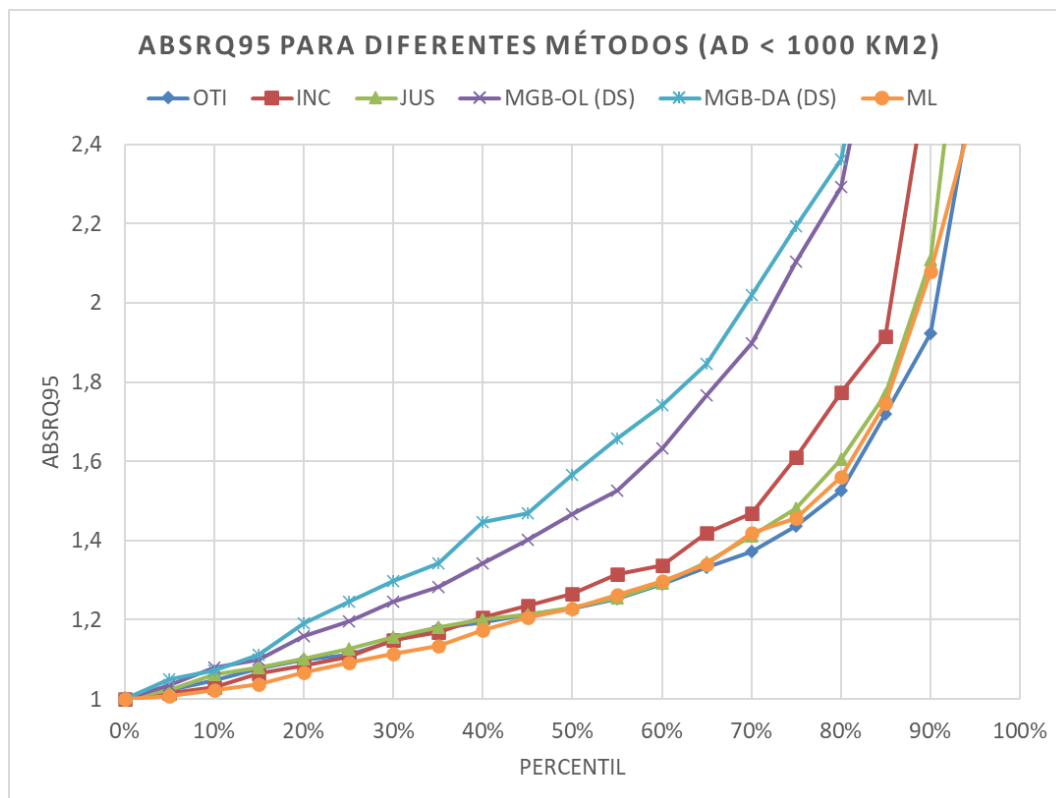


Figura 8: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km² em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5 RESULTADOS DE ACORDO COM A DISPONIBILIDADE DE DADOS NO ENTORNO

Em um dos relatórios anteriores, observou-se que o método da vazão incremental tem desempenho diferente, de acordo com a situação de disponibilidade de dados no entorno do local sem dados em que se pretende estimar a vazão. Foram identificados quatro casos, previamente apresentados na Figura 1.

No citado relatório sobre o método da vazão incremental, observou-se que este método tem desempenho melhor nos casos 3 e 4, em que há postos fluviométricos a montante do local sem dados. No caso 1, o seu desempenho é igual ao do método da vazão específica com dados do posto de jusante (JUS), porque os dois métodos são equivalentes do ponto de vista teórico e prático. Finalmente, no caso 2, observou-se que o método da vazão incremental apresentava erros consideravelmente maiores do que nos outros casos, sendo esse fato associado a um efeito de amplificação de erros pela operação de subtração entre ao menos dois valores incertos de vazão.

Por este motivo, na comparação de resultados entre todos os métodos testados, apresentada no presente relatório, foi incluída a análise em separado para cada um dos casos, de 1 a 4, ilustrados na figura 1.

4.5.1 Resultados da vazão média no caso 1

A Figura 9 apresenta as distribuições de frequência da métrica ABSRQM dos diferentes métodos de estimativa de vazão média em locais sem dados, considerando apenas os locais que se enquadram no caso 1 (ver Figura 1), e onde a área de drenagem é superior a 1000 km². A Figura 10 apresenta o mesmo resultado, porém em locais cuja área de drenagem é inferior a 1000 km².

Observando as duas figuras é possível notar que os métodos baseados no modelo MGB-AS tem desempenho inferior aos demais, especialmente nos locais com área de drenagem menor do que 1000 km². A assimilação de dados (MGB-DA) reduz o valor do erro (considerando o percentil 75%) em locais com mais de 1000 km², mas não tem benefício em locais com menos de 1000 km².

As figuras também mostram que o desempenho dos métodos JUS e INC é igual, conforme o esperado, e que o método OTI, baseado em vazão específica de um doador único, também tem desempenho praticamente idêntico a estes dois métodos. Estes três métodos tem os melhores resultados, tomando como referência o percentil 75% de ABSRQM.

Finalmente, o método ML apresenta desempenho equivalente aos melhores métodos, sendo melhor do que todos os outros métodos tanto na mediana, como nos percentis 90% e 95%.

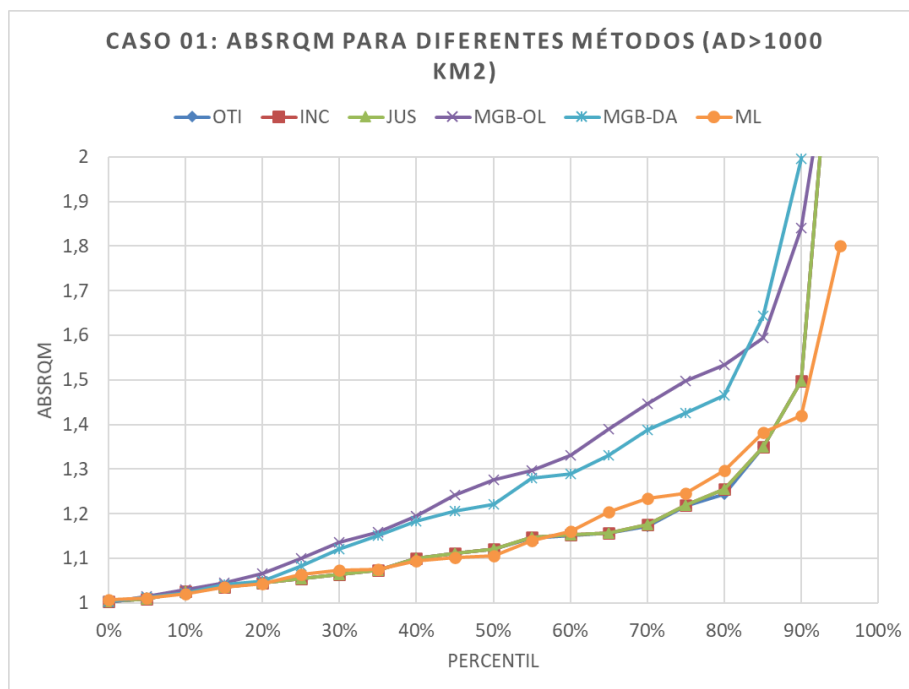


Figura 9: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 1 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

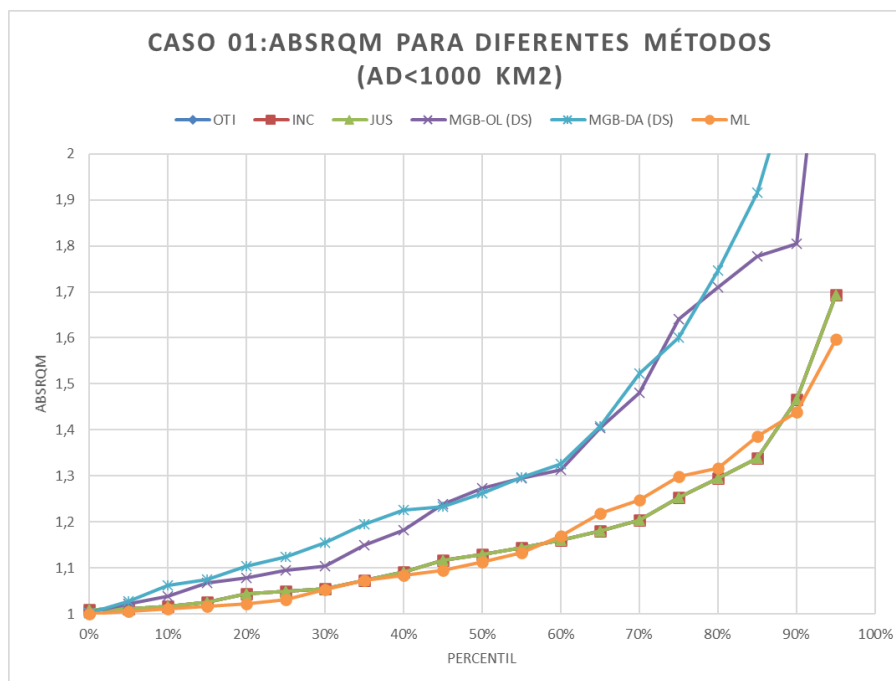


Figura 10: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 1 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.2 Resultados da vazão Q95 no caso 1

A Figura 11 apresenta as distribuições de frequência da métrica ABSRQ95 dos diferentes métodos de estimativa de vazão Q95 em locais sem dados, considerando apenas os locais que se enquadram no caso 1 (ver Figura 1), e onde a área de drenagem é superior a 1000 km². A Figura 12 apresenta o mesmo resultado, porém em locais cuja área de drenagem é inferior a 1000 km².

Observando as duas figuras é possível notar que os métodos baseados no modelo MGB-AS tem desempenho inferior aos demais. Também se observa que a assimilação de dados (MGB-DA) reduz bastante o valor do erro em locais com mais de 1000 km², mas não tem benefício em locais com menos de 1000 km², chegando a aumentar o erro mediano, por exemplo.

As duas figuras também mostram que o melhor desempenho no caso 1 é dos métodos OTI, INC e JUS, que são equivalentes (as curvas estão sobrepostas). O método ML também apresenta um bom desempenho, sendo ligeiramente inferior em locais com área de drenagem maior do que 1000 km², e praticamente equivalente em locais com área de drenagem inferior a 1000 km².

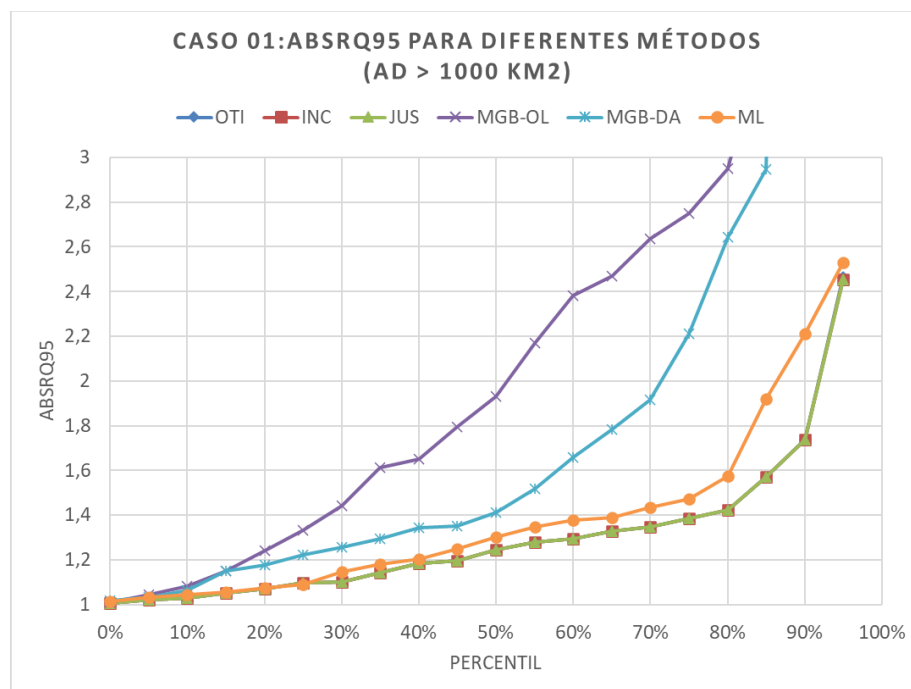


Figura 11: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 1 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

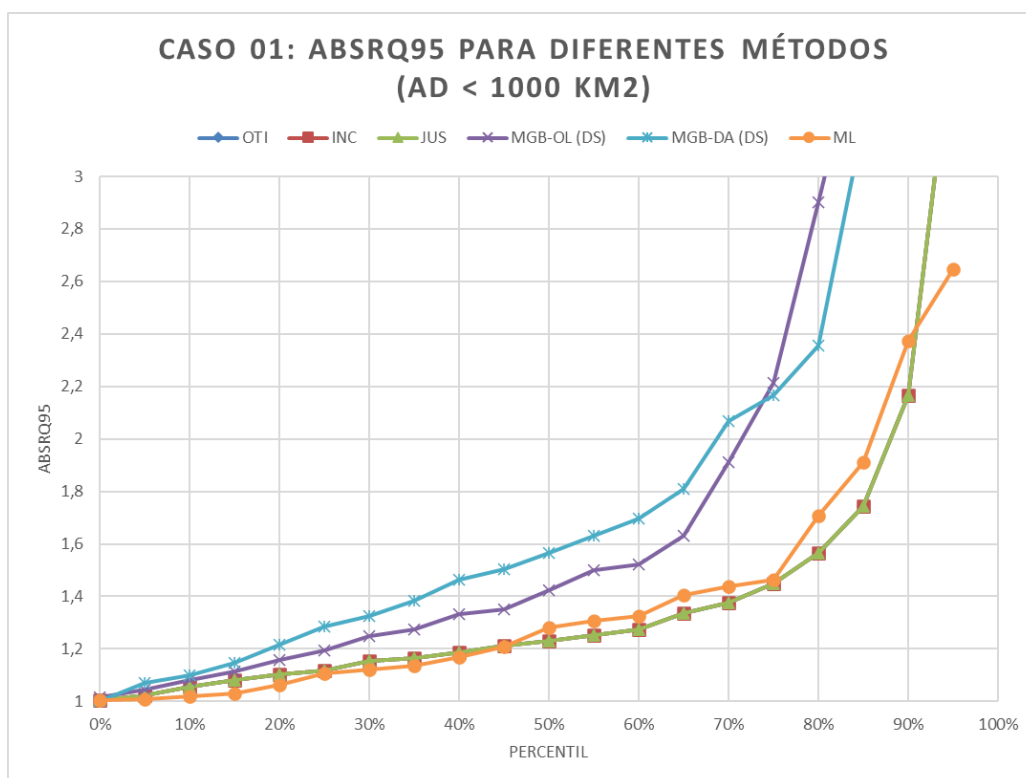


Figura 12: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 1 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.3 Resultados da vazão média no caso 2

A Figura 13 apresenta as distribuições de frequência da métrica ABSRQM dos diferentes métodos de estimativa de vazão média em locais sem dados, considerando apenas os locais que se enquadram no caso 2 (ver Figura 1), e onde a área de drenagem é superior a 1000 km². A Figura 14 apresenta o mesmo resultado, porém em locais cuja área de drenagem é inferior a 1000 km².

Na Figura 13 é possível observar que, em locais do caso 2, com área de drenagem superior a 1000 km², o desempenho do método MGB-DA (MGB com assimilação de dados) é o pior entre todos os métodos testados. Já o desempenho do método MGB-OL (MGB sem assimilação de dados) é equivalente ao do método da vazão incremental (INC), e ao método da vazão específica com dados de um posto fluviométrico doador a jusante (JUS). Tomando por base percentil 95%, o método MGB-OL é o que tem melhor desempenho entre todos os métodos. Já na faixa do percentil 75%, os melhores métodos são OTI e ML.

Na Figura 14 observa-se que em locais que se enquadram no caso 2, e que tem área de drenagem inferior a 1000 km², o desempenho do método MGB com assimilação de dados (MGB-DA) é equivalente ao desempenho do método da vazão incremental (INC), mas ambos são os piores métodos, pelo menos até o percentil 75%. Além disso, observa-se que os resultados do método MGB-OL são, em geral, melhores do que os resultados do método MGB-DA, sugerindo que a assimilação de dados, da forma que foi implementada, não trouxe benefícios na estimativa da vazão média em locais de pequena área de drenagem.

Entre todos os métodos testados, a Figura 14 mostra que, em locais que se enquadram no caso 2, e que tem área de drenagem inferior a 1000 km², os melhores resultados são obtidos pelos métodos OTI, JUS e ML.

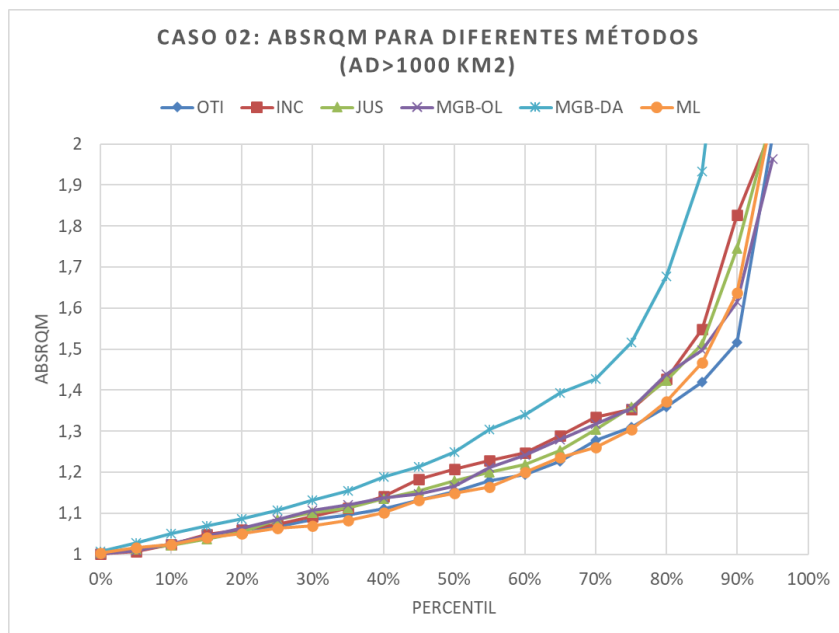


Figura 13: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 2 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

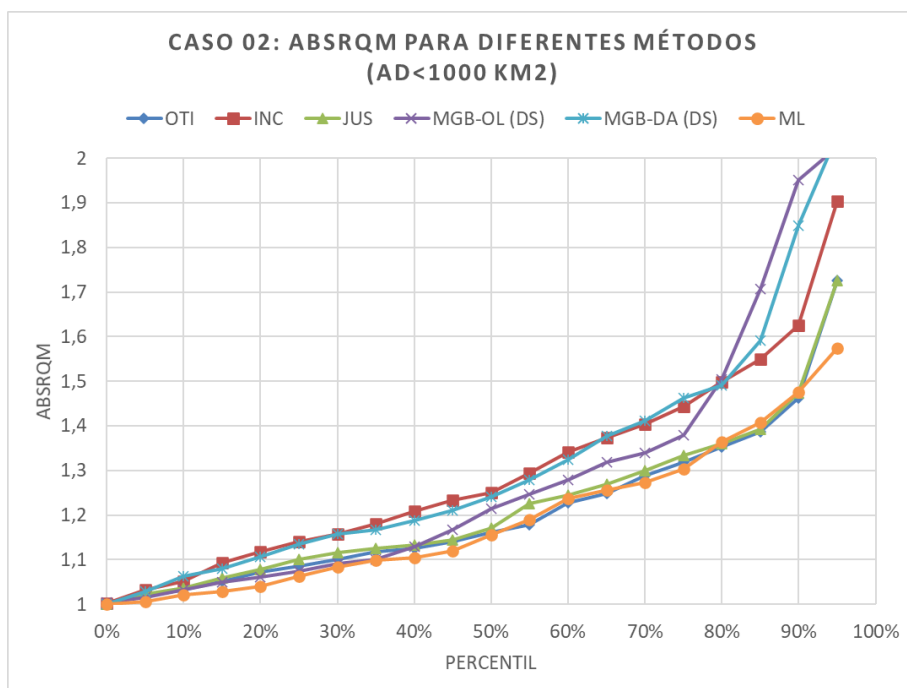


Figura 14: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 2 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.4 Resultados da vazão Q95 no caso 2

A Figura 15 apresenta as distribuições de frequência dos valores da métrica ABSRQ95, relacionada aos erros da estimativa da vazão de referência Q95, utilizando os diferentes métodos de estimativa de vazão em locais sem dados, considerando os locais que podem ser enquadrados no caso 2 (ver Figura 1), e em que a área de drenagem é superior a 1000 km².

Observa-se, na Figura 15, que o desempenho do método MGB-DA é quase equivalente ao desempenho dos métodos ML e OTI, que são os melhores métodos nesta situação. No percentil 70%, o valor de ABSRQ95 destes três métodos (OTI, ML e MGB-DA) é aproximadamente igual a 2,0, o que significa que, em 70% dos casos, a vazão Q95 real em um local sem dados estaria numa faixa entre a metade e o dobro do valor estimado por estes três métodos.

A Figura 15 também mostra que a assimilação de dados traz um grande benefício na estimativa da vazão Q95 neste tipo de situação, porque o desempenho do método MGB-DA é claramente superior ao do método MGB-OL.

Além disso, a Figura 15 confirma que o método da vazão incremental tem um desempenho relativamente ruim na estimativa da vazão Q95, nas situações que se enquadram no caso 2, conforme amplamente discutido no relatório sobre o método da vazão incremental. De acordo com a Figura 15, as estimativas de vazão de referência Q95 em locais sem dados que se enquadram no caso 2, e onde a área de drenagem é maior do que 1000 km², são igualmente ruins, utilizando o modelo MGB-OL (sem assimilação de dados) e usando o método da vazão incremental (INC). Tomando como referência o percentil 75%, o valor de ABSRQ95 do método da vazão incremental é igual a 3, o que equivale a dizer que, em 75% dos casos, a vazão Q95 real em um local sem dados estaria numa faixa entre um terço e o triplo do valor estimado pelo método da vazão incremental.

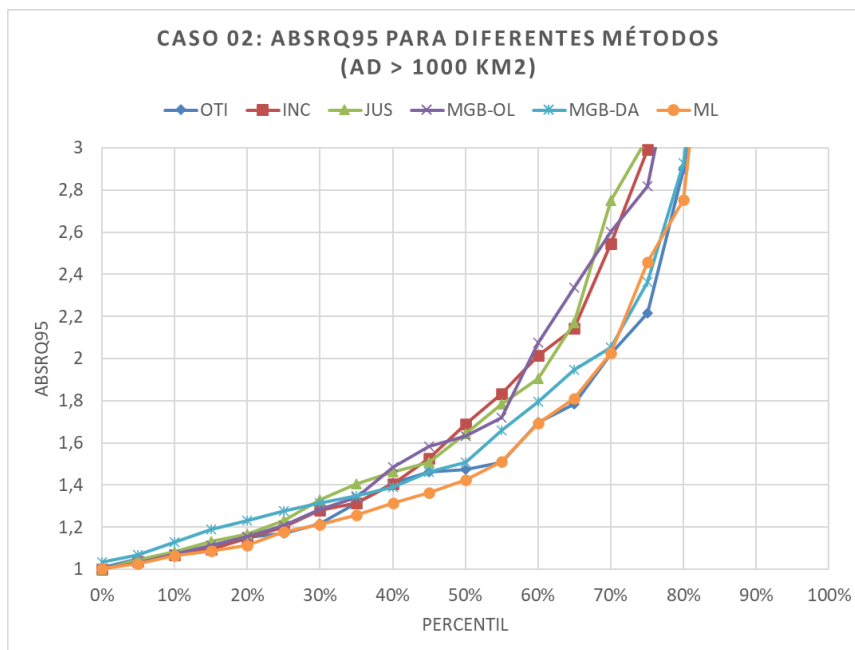


Figura 15: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 2 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

Nos locais que se enquadram no caso 2, porém onde a área de drenagem é inferior a 1000 km², para os quais os resultados estão ilustrados na Figura 16, a situação é um pouco diferente, ao menos no que se refere ao benefício trazido pela técnica de assimilação de dados. Observa-se que o desempenho do método MGB-DA é inferior ao desempenho do método MGB-OL, mostrando que a assimilação de dados atua no sentido de aumentar os erros na estimativa da Q95 nesta escala espacial.

A Figura 16 também mostra que o melhor método para estimar a vazão nestes locais (caso 2 e área de drenagem menor que 1000 km²) é o método OTI, seguido muito de perto pelo método ML, e um pouco mais longe pelo método JUS. Já o método da vazão incremental tem um desempenho intermediário entre aquele obtido pelos métodos baseados no modelo MGB e os melhores métodos (OTI e ML).

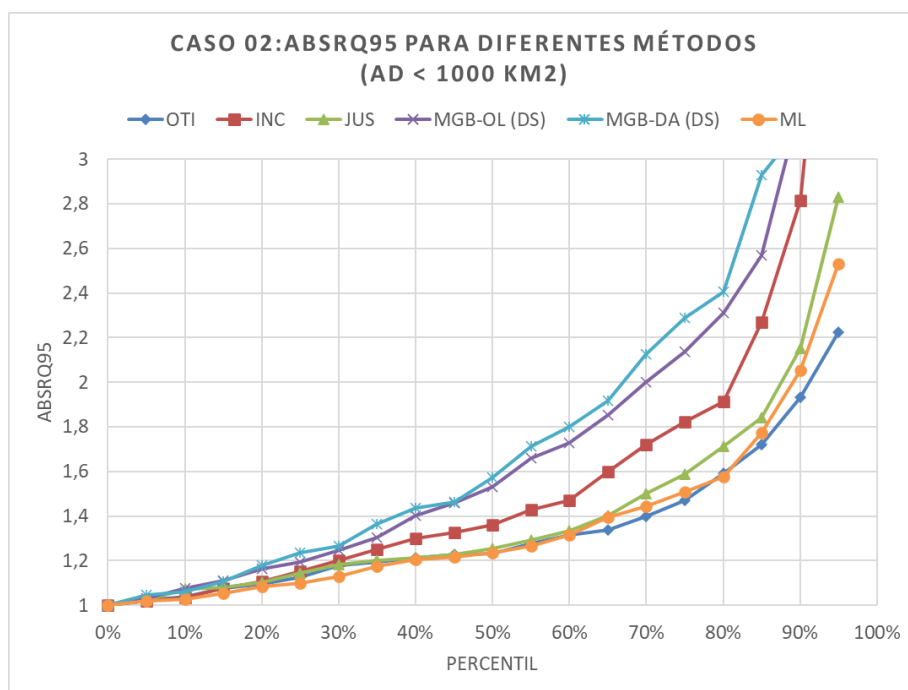


Figura 16: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 2 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.5 Resultados da vazão média no caso 3

A Figura 17 apresenta as distribuições de frequência da métrica ABSRQM dos diferentes métodos de estimativa de vazão média em locais sem dados, considerando apenas os locais que se enquadram no caso 3 (ver Figura 1), e onde a área de drenagem é superior a 1000 km². A Figura 18 apresenta o mesmo resultado, porém em locais cuja área de drenagem é inferior a 1000 km².

Conforme pode ser observado na Figura 1, o caso 3 corresponde à situação em que há pelo menos um posto fluviométrico a montante e um posto fluviométrico a jusante do local sem dados. A Figura 17 mostra que, nesta situação, quase todos os métodos têm desempenho muito melhor do que quando não existem postos fluviométricos a montante, como nos casos 1 e 2. A

Figura 17 também mostra que, entre todos os métodos testados, o melhor desempenho nos locais que se enquadram no caso 3, e cuja área de drenagem supera 1000 km², é o do método da vazão incremental (INC). Tomando como referência o percentil 75% do valor de ABSRQM, o método da vazão incremental (INC) permite estimar a vazão média com erros da ordem de 10%.

Outra observação importante relacionada à Figura 17 é que a assimilação de dados representa um grande benefício na redução dos erros das estimativas obtidas a partir do modelo MGB. Tomando como referência, novamente, o percentil 75%, o valor da métrica ABSRQM cai de 1,3 no método MGB-OL (sem assimilação) para 1,2 no método MGB-DA (com assimilação).

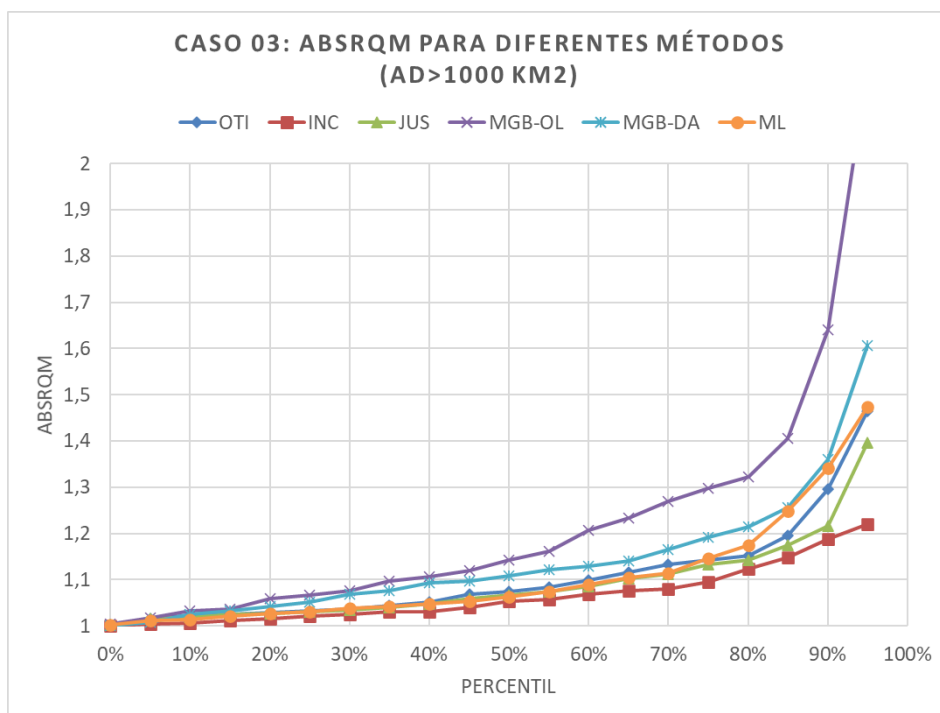


Figura 17: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 3 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

Foram encontrados apenas 11 postos fluviométricos que se enquadram no caso 3 e que tem área de drenagem menor do que 1000 km², o que limita um pouco a validade da análise, neste caso. Os resultados são apresentados na Figura 18. Aparentemente, nestes locais a assimilação de dados não contribui para reduzir os erros das estimativas baseadas nos resultados do modelo MGB, pois o desempenho do método MGB-DA é pior do que o desempenho do método MGB-OL. Entre os demais métodos, o melhor desempenho é do método da vazão incremental, seguido de perto pelo método ML.

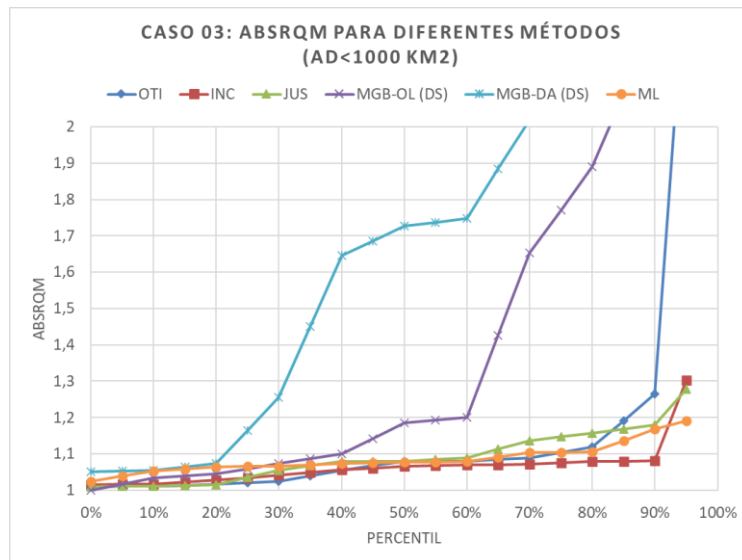


Figura 18: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 3 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.6 Resultados da vazão Q95 no caso 3

A Figura 19 apresenta as distribuições de frequência dos valores da métrica ABSRQ95, relacionada aos erros da estimativa da vazão de referência Q95, utilizando os diferentes métodos de estimativa de vazão em locais sem dados, considerando os locais que podem ser enquadrados no caso 3 (ver Figura 1), e em que a área de drenagem é superior a 1000 km².

Observa-se, na Figura 19, que o desempenho dos métodos baseados no modelo MGB, com e sem assimilação de dados, é inferior ao desempenho dos demais métodos na estimativa da Q95.

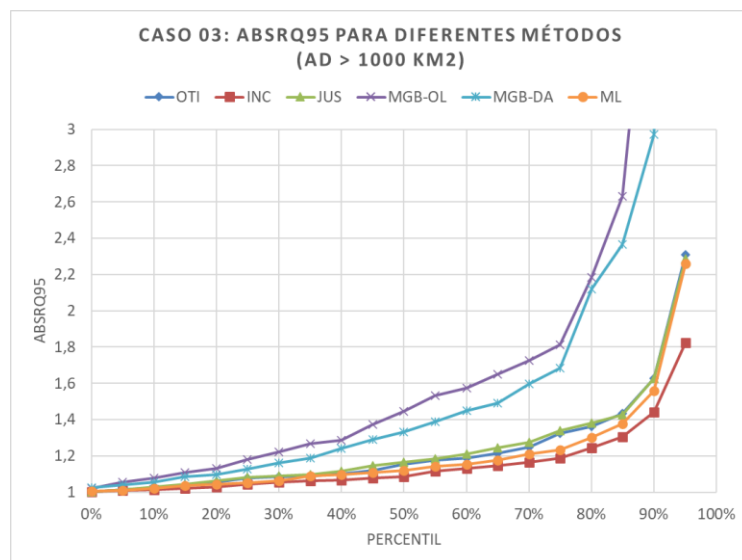


Figura 19: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 3 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

A Figura 19 também mostra que a assimilação de dados traz benefício na estimativa da vazão Q95 neste tipo de situação, porque o desempenho do método MGB-DA é superior ao do método MGB-OL.

Tomando como referência o percentil 75%, o melhor método para estimar a Q95, nas situações que se enquadram no caso 3, e em que a área de drenagem é superior a 1000 km², é o método da vazão incremental (INC), seguido de perto pelo método ML.

Foram encontrados apenas 11 postos fluviométricos que se enquadram no caso 3 e que tem área de drenagem menor do que 1000 km², o que limita a validade da análise, neste caso. Os resultados são apresentados na Figura 20. Aparentemente, nestes locais a assimilação de dados não contribui para reduzir os erros das estimativas baseadas nos resultados do modelo MGB, pois o desempenho do método MGB-DA é pior do que o desempenho do método MGB-OL. Entre os demais métodos, o melhor desempenho é do método da vazão incremental, seguido de perto pelo método ML e pelo método OTI.

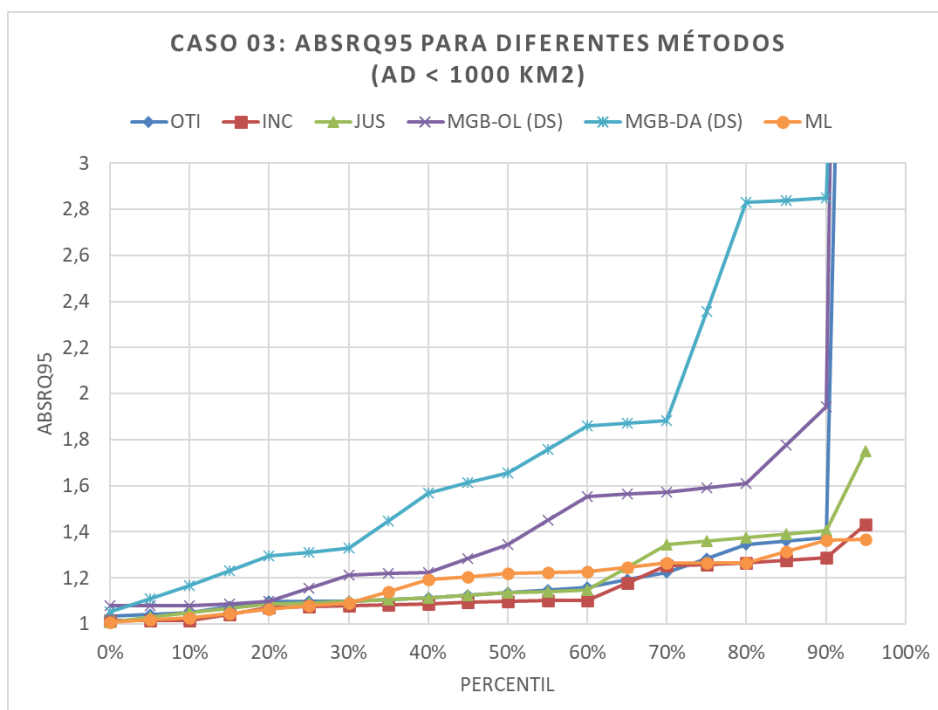


Figura 20: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 3 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.7 Resultados da vazão média no caso 4

A Figura 21 apresenta as distribuições de frequência da métrica ABSRQM dos diferentes métodos de estimativa de vazão média em locais sem dados, considerando apenas os locais que se enquadram no caso 4 (ver Figura 1), e onde a área de drenagem é superior a 1000 km². A Figura 22 apresenta o mesmo resultado, porém em locais cuja área de drenagem é inferior a 1000 km².

Nos locais com área de drenagem superior a 1000 km² (Figura 21), observa-se que o melhor desempenho entre os métodos é o do método INC, com valor ABSRQM igual a 1,1 no percentil 70%. Em seguida vêm, em ordem decrescente de desempenho, os métodos ML, OTI, MGB-DA, JUS e MGB-OL. Esse resultado também demonstra que houve um benefício ao realizar a assimilação de dados no modelo MGB.

Nos locais com área de drenagem inferior a 1000 km² (Figura 22), observa-se que o melhor desempenho também é o do método INC, entretanto, os resultados ilustrados foram obtidos com base em dados de apenas 18 postos fluviométricos, o que limita a sua validade.

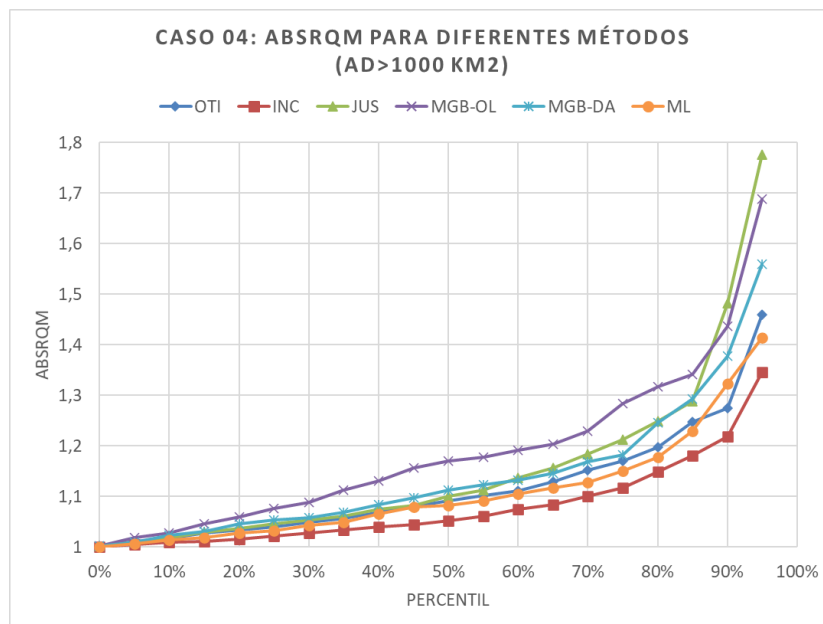


Figura 21: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 4 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

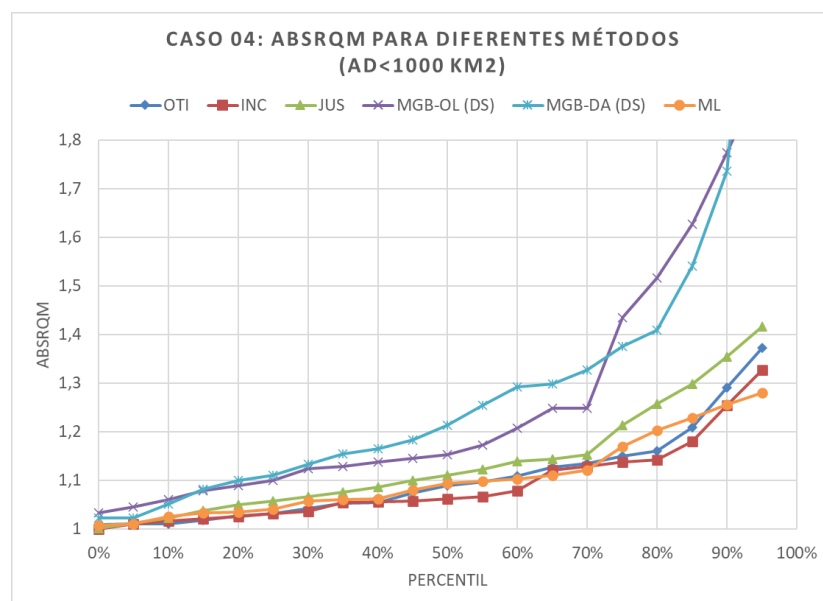


Figura 22: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 4 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.5.8 Resultados da vazão Q95 no caso 4

A Figura 23 apresenta as distribuições de frequência da métrica ABSRQ95 dos diferentes métodos de estimativa de vazão Q95 em locais sem dados, considerando apenas os locais que se enquadram no caso 4 (ver Figura 1), e onde a área de drenagem é superior a 1000 km². A Figura 24 apresenta o mesmo resultado, porém em locais cuja área de drenagem é inferior a 1000 km².

Nos locais com área de drenagem superior a 1000 km² (Figura 23), observa-se que o melhor desempenho entre os métodos de estimativa da Q95 é o do método INC, com valor ABSRQM inferior a 1,2 no percentil 70%. Entretanto, em percentis mais altos, o desempenho do método ML é equivalente ao do método INC. Na figura também é possível observar que houve um benefício ao realizar a assimilação de dados no modelo MGB, porém, apesar de ser melhor do que o método MGB-OL, o método MGB-DA não teve desempenho superior a nenhum dos outros métodos.

Nos locais com área de drenagem inferior a 1000 km² (Figura 24), observa-se que o melhor desempenho é dos métodos ML e INC, entretanto, os resultados ilustrados foram obtidos com base em dados de apenas 18 postos fluviométricos, o que limita a sua validade.

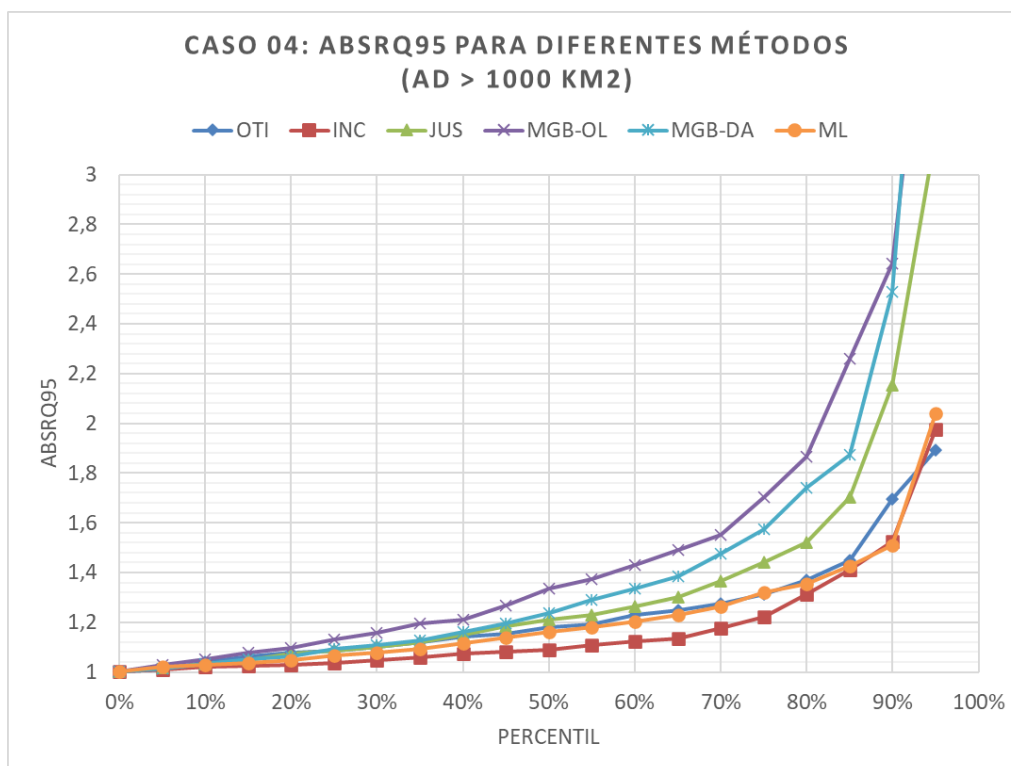


Figura 23: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem superior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 4 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

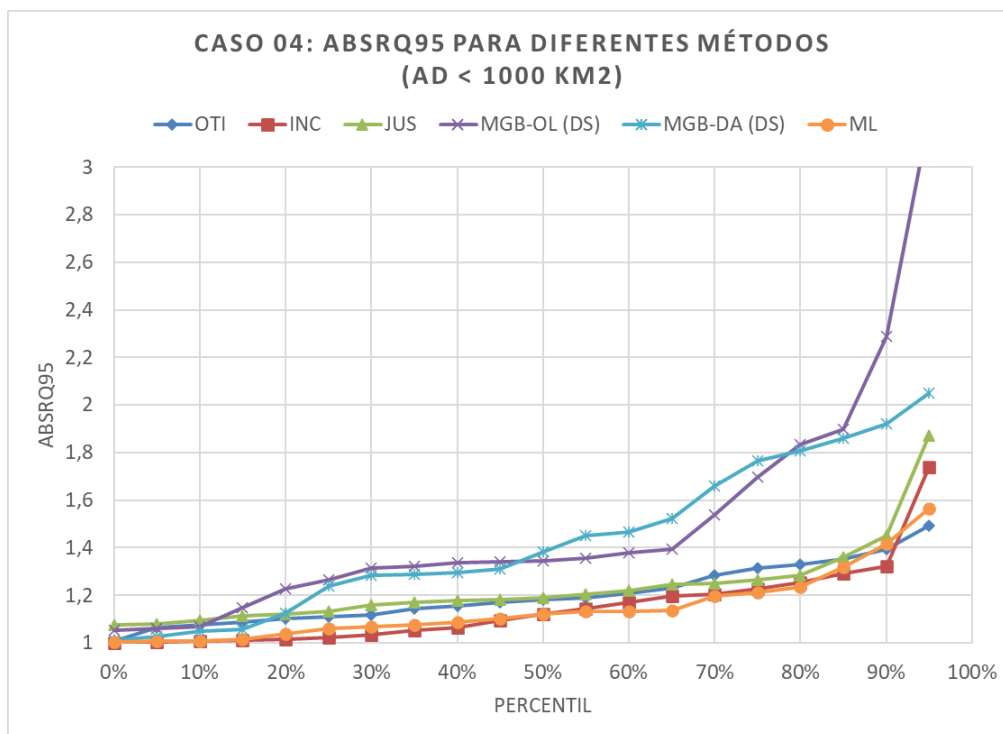


Figura 24: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) para os diferentes métodos, considerando os locais com área de drenagem inferior a 1000 km², em que a disponibilidade de dados no entorno corresponde ao caso 4 (identificado na Figura 1), e em que foi possível aplicar todos os métodos.

4.6 RESUMO DE RESULTADOS EM LOCAIS COM ÁREA DRENAGEM SUPERIOR A 1000 KM²

Conforme mencionado antes, na aplicação do modelo MGB a toda a América do Sul, a rede de drenagem representada explicitamente pelo modelo possui área de contribuição superior a 1000 km², de tal forma que somente postos fluviométricos também com essa característica foram utilizados no processo de assimilação de dados e validação com processo de “leave one-tenth gauge out”.

Os resultados nos locais correspondentes aos postos fluviométricos com área de drenagem superior a 1000 km² estão resumidos na Tabela 1, no caso da vazão média, e na Tabela 2, no caso da Q95.

A Tabela 1 apresenta os valores da mediana e percentil 75% de ABSRQM obtidos nos locais correspondentes aos postos fluviométricos com área de drenagem superior a 1000 km², utilizando os seis métodos apresentados aqui. Os resultados são apresentados tanto para o conjunto completo de postos fluviométricos como para os casos de 1 a 4, que representam as diferentes situações reais de disponibilidade de dados na vizinhança do local de interesse.

De maneira geral, observa-se na Tabela 1, que o método da vazão incremental (INC) teve o melhor desempenho, considerando a totalidade dos postos fluviométricos com área superior a 1000 km² em que os métodos foram testados. O valor ABSRQM do método INC foi de 1,08 no percentil 50% e de 1,20 no percentil 75%. Isto significa que em metade dos casos, a vazão média real em um local sem dados estaria entre 8% a menos e 8% a mais do que o valor estimado pelo método da vazão incremental, e que em 75% dos casos a vazão média real em um local sem

dados estaria entre 17% a menos e 20% a mais do que o valor estimado pelo método da vazão incremental.

Entretanto, considerando o percentil 75%, o método de estimativa baseado na vazão específica de um único posto fluviométrico vizinho (método OTI) teve o mesmo desempenho que o método de vazão incremental. Da mesma forma, o método Machine-Learning (ML) foi apenas ligeiramente inferior ao método INC, tanto no percentil 50% como no percentil 75%.

Nos locais que se enquadram no caso 1 (ver Figura 1), o método com menor erro no percentil 50% é o método ML, seguido de perto pelos métodos OTI, INC e JUS, que dão exatamente o mesmo resultado neste tipo de situação, em que só há um posto fluviométrico a jusante do local sem dados. No percentil 75%, os melhores métodos são OTI, INC e JUS, seguidos pelo método ML.

Tabela 1. Resumo de erros nas vazões médias pela métrica de ABSRQM (percentis 50% e 75%) por método de estimativa, em locais com área de drenagem superior a 1000 km² (o valor em negrito é o melhor em cada coluna).

Ad >1000 km ²		todos os casos		caso 1		caso 2		caso 3		caso 4	
Vazão Ref.	MÉTODO	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75
Vazão Média	OTI	1,11	1,20	1,12	1,22	1,15	1,31	1,07	1,14	1,09	1,15
	INC	1,08	1,20	1,12	1,22	1,21	1,35	1,05	1,09	1,05	1,10
	JUS	1,11	1,23	1,12	1,22	1,18	1,36	1,07	1,13	1,10	1,18
	MGB-OL	1,17	1,32	1,28	1,50	1,17	1,35	1,14	1,30	1,17	1,23
	MGB-DA	1,14	1,30	1,22	1,43	1,25	1,52	1,11	1,19	1,11	1,17
	ML	1,09	1,21	1,11	1,25	1,15	1,30	1,06	1,15	1,08	1,13

Nos locais que se enquadram nos casos 3 e 4, que se caracterizam por contar com ao menos um posto fluviométrico a montante e outro a jusante do local sem dados, o melhor desempenho é do método INC, com erros de 10% ou menos. Nestes locais, os métodos OTI e ML também são bons, com erros iguais ou inferiores a 15%.

Por outro lado, nos locais que se enquadram no caso 2, os erros de todos os métodos tendem a ser maiores. Os melhores resultados nestes locais são obtidos com o método ML e o método OTI.

As estimativas baseadas no modelo MGB apresentaram erros maiores do que os outros métodos, e a técnica de assimilação de dados parece ter contribuído pouco para a redução destes erros.

A Tabela 2 apresenta os mesmos resultados, porém considerando a vazão de referência Q95. São apresentados os valores da mediana e percentil 75% de ABSRQ95 obtidos nos locais correspondentes aos postos fluviométricos com área de drenagem superior a 1000 km², utilizando os seis métodos apresentados aqui.

Considerando o percentil 75%, observa-se na Tabela 2, que o método baseado em Machine Learning (ML) teve o melhor desempenho, considerando a totalidade dos postos fluviométricos com área superior a 1000 km², com valor ABSRQ95 igual a 1,44. Este valor significa que, em 75% dos casos, a Q95 real em um local sem dados estaria entre 31% a menos e 44% a mais do que o valor estimado pelo método ML.

Nos locais que se enquadram nos casos 3 e 4, o método da vazão incremental teve o melhor desempenho, com erros inferiores a 20%.

Por outro lado, nos locais que se enquadram no caso 2, o método da vazão incremental teve um desempenho ruim. No percentil 75%, o valor ABSRQ95 do método INC foi de 2,99, o que sugere que não são incomuns os casos em que a vazão estimada por este método é 3 vezes maior, ou 3 vezes menor, do que a Q95 real.

Os resultados obtidos com o modelo MGB, tanto com assimilação de dados (MGB-DA) como sem assimilação de dados (MGB-OL) foram, em geral, piores do que os dos outros métodos. Entretanto, o método de assimilação de dados foi efetivo em melhorar o desempenho do modelo MGB na estimativa da vazão Q95 e, nos locais que se enquadram no caso 2, as estimativas do método MGB-DA estiveram entre as melhores, sendo inferiores em desempenho apenas ao método OTI, quando avaliadas pelo percentil 75%.

Tabela 2. Resumo de erros nas vazões Q95 pela métrica de ABSRQ95 (percentis 50% e 75%) por método, em locais com área de drenagem superior a 1000 km² (o valor em negrito é o melhor em cada coluna).

Ad >1000 km ²		todos os casos		caso 1		caso 2		caso 3		caso 4	
Vazão Ref.	MÉTODO	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75
Q95	OTI	1,21	1,46	1,25	1,38	1,47	2,22	1,15	1,32	1,18	1,27
	INC	1,15	1,46	1,25	1,38	1,69	2,99	1,09	1,19	1,09	1,18
	JUS	1,25	1,58	1,25	1,38	1,64	3,05	1,16	1,34	1,21	1,37
	MGB-OL	1,47	2,25	1,93	2,75	1,63	2,82	1,45	1,81	1,34	1,55
	MGB-DA	1,35	1,85	1,41	2,21	1,51	2,36	1,33	1,68	1,24	1,48
	ML	1,20	1,44	1,30	1,47	1,42	2,46	1,12	1,23	1,16	1,26

4.7 RESUMO DE RESULTADOS EM LOCAIS COM ÁREA DRENAGEM INFERIOR A 1000 km²

Conforme mencionado, o processo de validação explícita do MGB-AS foi realizado somente para postos fluviométricos com área de drenagem superiores a 1000 km², devido a discretização do modelo. Assim, as vazões de referência em locais com postos fluviométricos com áreas de drenagem inferiores a 1000 km² foram obtidas a partir de um processo de downscaling que é baseado nas vazões simuladas do escoamento da área de contribuição local do MGB (i.e. “runoff” das minibacias) e relação de áreas.

Os resultados nos locais com área de drenagem inferior a 1000 km² estão resumidos na Tabela 3 (vazão média), e na Tabela 4 (Q95).

A Tabela 3 apresenta os valores da mediana e percentil 75% de ABSRQM obtidos para o conjunto de postos fluviométricos, nos diferentes métodos e, considerando a separação dos casos de topologia mencionados, em locais com área de drenagem < 1000 km². Ao considerar todos os casos, observa-se valores de mediana entre 1,12 e 1,17; e entre 1,28 e 1,36 no percentil 75%; para os métodos OTI, INC, JUS e ML. Esses valores indicam estimativas com valores entre 14% a menos e 17% a mais em relação valor observado para as medianas; e entre 26% a menos e 36% a mais do valor observado para o percentil 75%.

Em comparação, os valores obtidos para as simulações com MGB-OL e MGB-AS foram superiores, sendo a mediana de 1,23 e 1,25 e o percentil 75% de 1,49 e 1,51, sendo os valores

ligeiramente menores para a simulação com assimilação de dados. Assim, é possível dizer que as vazões médias estimadas com o MGB se concentram entre 20% a menos e 25% a mais do que o valor observado (em 50% dos casos); e entre 33% a menos e 51% a mais do que os valores observados (em 75% dos casos).

Uma análise similar para a vazão Q95 demonstra que enquanto as estimativas do MGB resultaram em valores de medianas de ABSRQ95 entre 1,47 e 1,57 (ou seja, até 36% a menos e 57% a mais em metade dos casos avaliados); os demais métodos apresentam medianas entre 1,23 e 1,27, apontando para uma faixa mais estreita de erros, com valores calculado entre 21% a menos e 27% a mais do que os valores observados. O percentil de 75% indica que mesmo os métodos mais acurados teriam, em $\frac{3}{4}$ dos casos avaliados, erros relativos entre 37% a menos e 61% a mais do que o valor observado. Considerando o conjunto geral, os resultados do MGB+Downscaling apresentou incertezas maiores, em que os valores estimados 36% a menos e 57% a mais do que os observados (na metade dos casos); e, em $\frac{3}{4}$ dos casos, no percentil 75% valores equivalentes à metade ou dobro dos valores observados.

Ambas as tabelas demonstram que nos casos 3 e 4, que ocorrem quando existe pelo menos um posto fluviométrico a montante do local de interesse, os erros tendem a ser menores. Em geral, o caso 2, ou seja, a ausência de postos a montante tende a produzir situações em que todos os métodos tradicionais, especialmente o método da vazão incremental, tendem a apresentar incertezas maiores.

Tabela 3. Resumo de erros nas vazões médias pela métrica de ABSRQM (percentis 50% e 75%) por método, em locais com área de drenagem inferior a 1000 km² (o valor em negrito é o melhor em cada coluna).

Ad <1000 km ²		todos os casos		caso 1		caso 2		caso 3		caso 4	
Vazão Ref.	MÉTODO	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75
Vazão Média	OTI	1,14	1,28	1,13	1,25	1,16	1,32	1,08	1,10	1,09	1,15
	INC	1,17	1,36	1,13	1,25	1,25	1,44	1,07	1,08	1,06	1,14
	JUS	1,14	1,30	1,13	1,25	1,17	1,33	1,08	1,15	1,11	1,21
	MGB-OL (DS)	1,23	1,49	1,27	1,64	1,21	1,38	1,19	1,77	1,15	1,44
	MGB-DA (DS)	1,25	1,51	1,26	1,60	1,24	1,46	1,73	2,07	1,21	1,38
	ML	1,12	1,28	1,11	1,30	1,16	1,30	1,08	1,10	1,09	1,17

Tabela 4. Resumo de erros nas vazões Q95 pela métrica de ABSRQ95 (percentis 50% e 75%) por método, em locais com área de drenagem inferior a 1000 km² (o valor em negrito é o melhor em cada coluna).

Ad <1000 km ²		todos os casos		caso 1		caso 2		caso 3		caso 4	
Vazão Ref.	MÉTODO	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75	P50	P75
Q95	OTI	1,23	1,44	1,23	1,45	1,23	1,47	1,14	1,29	1,18	1,31
	INC	1,27	1,61	1,23	1,45	1,36	1,82	1,10	1,26	1,12	1,23
	JUS	1,23	1,48	1,23	1,45	1,25	1,59	1,14	1,36	1,19	1,26
	MGB-OL (DS)	1,47	2,10	1,42	2,21	1,53	2,14	1,35	1,59	1,35	1,70
	MGB-DA (DS)	1,57	2,19	1,57	2,17	1,57	2,29	1,66	2,36	1,38	1,77
	ML	1,23	1,46	1,28	1,46	1,24	1,51	1,22	1,26	1,12	1,21

5 CONCLUSÕES

A comparação apresentada neste relatório mostra que as estimativas de vazões em locais sem dados baseadas na simulação com o modelo MGB continental tem, em geral, erros maiores do que as estimativas obtidas com métodos tradicionais, como o método da vazão específica e o método da vazão específica incremental.

A técnica de assimilação de dados, aplicada no modelo MGB, resulta em uma melhoria das estimativas de vazão em locais sem dados. Mesmo assim, as estimativas de vazão obtidas pelo modelo MGB com assimilação de dados tem erros maiores, em geral, do que os métodos tradicionais de regionalização.

Em locais com área de drenagem muito pequena, a técnica de assimilação de dados, na forma em que foi aplicada, não resultou em benefício, em termos de redução dos erros das estimativas das vazões de referência.

Foi identificada apenas uma situação de disponibilidade de dados em torno do local sem dados, em que as estimativas de vazão Q95 baseadas no modelo MGB, auxiliado pela assimilação de dados, apresentaram desempenho claramente superior ao tradicional método da vazão incremental. Esta condição recebeu o nome de “caso 2”, e corresponde à situação em que não existem postos fluviométricos a montante do local sem dados, porém existe um ou mais postos fluviométricos a montante do posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados. Nesta situação, o método da vazão incremental apresenta erros consideravelmente mais altos do que nas outras situações. Esta observação é importante, porque uma fração considerável da rede hidrográfica do Brasil pode corresponder a tributários não monitorados de rios principais que são monitorados tanto a montante como a jusante da confluência com os tributários não monitorados, que é a situação que caracteriza o “caso 2”, conforme denominação adotada neste relatório.

A comparação entre todos os métodos também revelou que, nos locais em que existem postos fluviométricos a montante e a jusante, o método da vazão incremental apresenta o melhor desempenho entre os seis métodos analisados.

Um método de aprendizado de máquina (Machine Learning) capaz de estimar vazões de referência em todo o Brasil, com base em variáveis preditivas tipicamente utilizadas na regionalização de vazões, apresentou desempenho muito bom, com erros semelhantes aos do método da vazão incremental na maior parte dos casos, e claramente menores na situação do “caso 2”, já mencionado antes.

Os resultados descritos aqui referem-se a uma aplicação do modelo MGB em escala continental, em que o modelo foi calibrado focando em gerar resultados acurados na escala das grandes bacias hidrográficas. Acredita-se que o desempenho do modelo, auxiliado pela técnica de assimilação de dados, possa ser aprimorado em aplicações regionais, ou em futuras versões aprimoradas do modelo continental, em que seria possível calibrar os parâmetros do modelo focando também nos resultados em postos fluviométricos de área de drenagem relativamente pequena.

6 REFERÊNCIAS

ANA (2020) NOTA TÉCNICA Nº 75/2020/SPR Atualização da Base de Disponibilidade Hídrica Superficial da ANA. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/files/7ac42372-3605-44a4-bae4-4dee7af1a2f8/NT75_2020.pdf

Barbedo, R; Sorribas, M. V.; Collischonn, W.; Paiva, R.C.D.; (2021). IPH-ANA-HGE-SR-R9 Relatório Técnico: Estimativas de vazões em locais sem dados usando Machine Learning. Porto Alegre, 2021.

Collischonn W., Paiva R. C. D., Sorribas M.V., Siqueira V.A., Breda J.P.L.F., Fontana R.B. (2020) Relatório Parcial sobre Transferência de Informações do Modelo MGB para a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO). Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional, Novembro, 2020. 69 p

Collischonn, W.; Sorribas, M. V.; Paiva, R.C.D. (2021a). IPH-ANA-HGE-SR-R4 Relatório Técnico: O efeito da variabilidade amostral sobre a estimativa de vazões de referência. Porto Alegre, 2021.

Collischonn, W.; Sorribas, M. V.; Paiva, R.C.D. (2021b). IPH-ANA-HGE-SR-R7 Relatório Técnico: Avaliação do método de estimativa de vazão de referência em locais sem dados a partir da vazão específica incremental. Porto Alegre, 2021.

Gama, C. H. A.; Ribeiro, L. C.; Paiva, R.C.D.; Collischonn, W.; Sorribas, M. V. (2021). IPH-ANA-HGE-SR-R9 Relatório Técnico: Estimativas de vazões de referência com modelo MGB-SA. Porto Alegre, 2021.

Sorribas, M. V.; Collischonn, W.; Paiva, R.C.D. (2021a) IPH-ANA-HGE-SR-R6 Relatório Técnico: Avaliação do método da vazão específica com doador único em postos fluviométricos do Brasil. Porto Alegre, 2021.

Sorribas, M. V.; Collischonn, W.; Paiva, R.C.D. (2021b) 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.

Wongchuig, C.S., Fleischman, A., de Paiva, R.C.D., Fadel, W.A. (2019). Towards the Discharge Estimation for Water Resources Management Uses with a Semi-Distributed Model and Ensemble Kalman Filter Data Assimilation. Hydrological Science Journal.