

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

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

**RELATÓRIO TÉCNICO: MGB-BHO POSTERIOR
- TRANSFERÊNCIA DE VAZÕES DE
REFERÊNCIA DO MGB-AS PARA A BASE
HIDROGRÁFICA OTTOCODIFICADA**

IPH-ANA-HGE-SR-T2

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

MGB-BHO Posterior - Transferência de Vazões de referência do MGB-AS para a Base Hidrográfica Ottocodificada



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, Vinícius Alencar Siqueira, João Paulo Lyra Fialho Brêda, Walter Collischonn, Rodrigo Paiva

COMO CITAR: Sorribas, M. V., Siqueira, V. A., Brêda, J. P. L. F., Collischonn, W., Paiva, R. C. D., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: MGB-BHO posterior - Transferência de vazões de referência do MGB-AS para a base hidrográfica ottocodificada: IPH-ANA-HGE-SR-T2. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

1 SUMÁRIO

2	Apresentação	4
3	Introdução	5
4	Comparação entre BHO e a discretização do MGB da América do Sul.....	6
5	Método de Downscaling Espacial.....	10
5.1	Vazões representadas no MGB	10
5.2	Visão conceitual para transferência por Downscaling	11
5.3	Tipos de transferência de vazão.....	12
5.4	Estrutura Lógica para transferência de vazões	15
5.4.1	Elaboração da tabela para o caso/tipo 1.....	15
5.4.2	Elaboração de tabelas para o caso/tipo 2	19
5.4.3	Elaboração de tabelas para o caso/tipo 3	20
5.4.4	Fechamento e outros casos	20
5.5	Fórmulas para transferência de vazões	20
5.5.1	Caso 1	20
5.5.2	Caso 2	21
5.5.3	Caso 3	21
5.5.4	Caso 4	22
5.6	Avaliação Quantitativa do Downscaling do MGB-AS para BHO 2017 5K.....	22
6	Repositório com scripts para Downscaling de vazões de referência do MGB-AS.....	27
7	Limitações e Recomendações	28
8	Apêndice A – Procedimentos e base de dados preliminar	29
8.1	Procedimentos para Downscaling.....	29
8.2	Bases de dados preliminar	33
8.3	Algoritmo de transferência tipo 1	36
9	Referências Bibliográficas	40

2 APRESENTAÇÃO

Este relatório é um dos produtos 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 transferência de resultados de vazões do MGB se faz necessária porque, em geral, a discretização da bacia hidrográfica adotada no modelo MGB-AS é diferente da divisão da rede de drenagem em trechos adotada na Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) da ANA.

Neste projeto foi identificado dois cenários para a integração e transferência entre a rede hidrográfica do MGB e a BHO. O primeiro cenário pode ser chamado de Cenário de Integração Anterior, em que um novo modelo MGB seria elaborado, para uma bacia ou para todo o continente, já integrado de forma total ou quase total à BHO. O segundo cenário pode ser chamado de Cenário de Integração Posterior, em que os resultados de vazões de referência do modelo MGB já existente são pós-processados para obter estimativas na BHO, sendo esse discutido nesse documento.

3 INTRODUÇÃO

A Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) é o núcleo dos dados de hidrografia do módulo de Inteligência Geográfica do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 1 demonstra a diferença na resolução da rede de drenagem do MGB-AS e da BHO5k2017. Por se tratar de um modelo numérico aplicado em escala continental o MGB AS busca reproduzir o regime hidrológico de grandes rios. Assim, o MGB-AS representa a drenagem a América do Sul, utilizando cerca de 34000 trechos de rio. Por outro lado, a BHO5k2017 apresenta um detalhamento que mapeia a rede de drenagem na ordem de 400 mil rios e cursos d'água. Dessa forma, existe uma diferença da ordem de grandeza de 10 vezes entre as duas bases, sendo necessária e importante uma compatibilização e/ou transferência dos resultados do MGB-AS para estimar e avaliar a regionalização de vazões na rede da BHO.

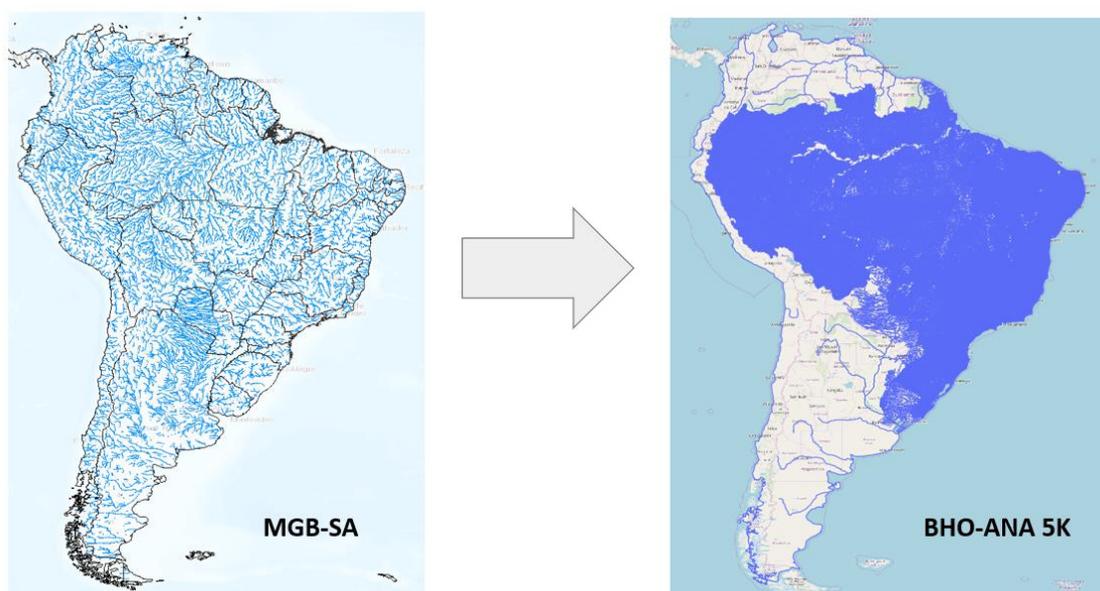


Figura 1. Problema conceitual da regionalização e transferência para BHO-ANA

A metodologia de Downscaling Espacial – também referida aqui como “Downscaling” – consiste em transferir as vazões calculada pelo modelo MGB-AS para a rede detalhada da BHO, utilizando análises espaciais de caráter vetorial. Esse método é computacionalmente eficiente pois o modelo hidrológico precisa ser rodado apenas na sua escala original, sem necessitar uma nova simulação na escala de detalhe desejada. Além de possibilitar um maior detalhamento espacial das vazões geradas pelo MGB-AS, o Downscaling permite que resultados de diferentes projetos de pesquisa relacionados ao desenvolvimento do modelo (e.g., mudanças climáticas, reanálises hidrológicas do passado, cenários de simulação com reservatórios, etc.) possam ser mais facilmente absorvidos.

Entretanto, os canais que não são representados explicitamente pelo modelo (e.g., $< 1000 \text{ km}^2$ no caso do MGB-AS) precisam ser tratados através de relações matemáticas simplificadas. Além disso, algumas dificuldades na transferência de resultados podem surgir em função da não homogeneidade espacial da densidade de canais da BHO, e principalmente em situações em que há incoerência entre a rede de drenagem das duas bases.

Assim, este processo pode ser realizado mediante o desenvolvimento de metodologias para realizar a transferência dos resultados do modelo MGB-AS para a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) da ANA, a exemplo do Downscaling Espacial, descrito neste documento.

4 COMPARAÇÃO ENTRE BHO E A DISCRETIZAÇÃO DO MGB DA AMÉRICA DO SUL

Na aplicação para a América do Sul, o MGB-AS foi segmentado em 33479 minibacias, visando obter trechos de rio com comprimento máximo de 15 km. A elaboração da topologia foi realizada com uma versão modificada do IPH-HydroTools (Siqueira et al., 2016), aplicado sobre o mapa de direções de fluxo do HydroSHEDS com resolução de 15 arco-segundos (aprox. 500 m na linha do equador) e um limiar de 1000 km² de área de drenagem para delimitar o início da rede de drenagem. Cada minibacia possui uma curva cota-área-volume associada obtida após o processamento do MDE do Bare-Earth SRTM após upscaling de 3 arco-segundos (~90 m) para 15 arco-segundos (~500 m), visando a compatibilização com os outros arquivos raster derivados do HydroSHEDS. O Bare-Earth é necessário principalmente para estimar com melhor acurácia a elevação do terreno e as curvas cota-área-volume nas regiões de planície da Amazônia, que são muito influenciadas pela altura das árvores e vegetação densa.

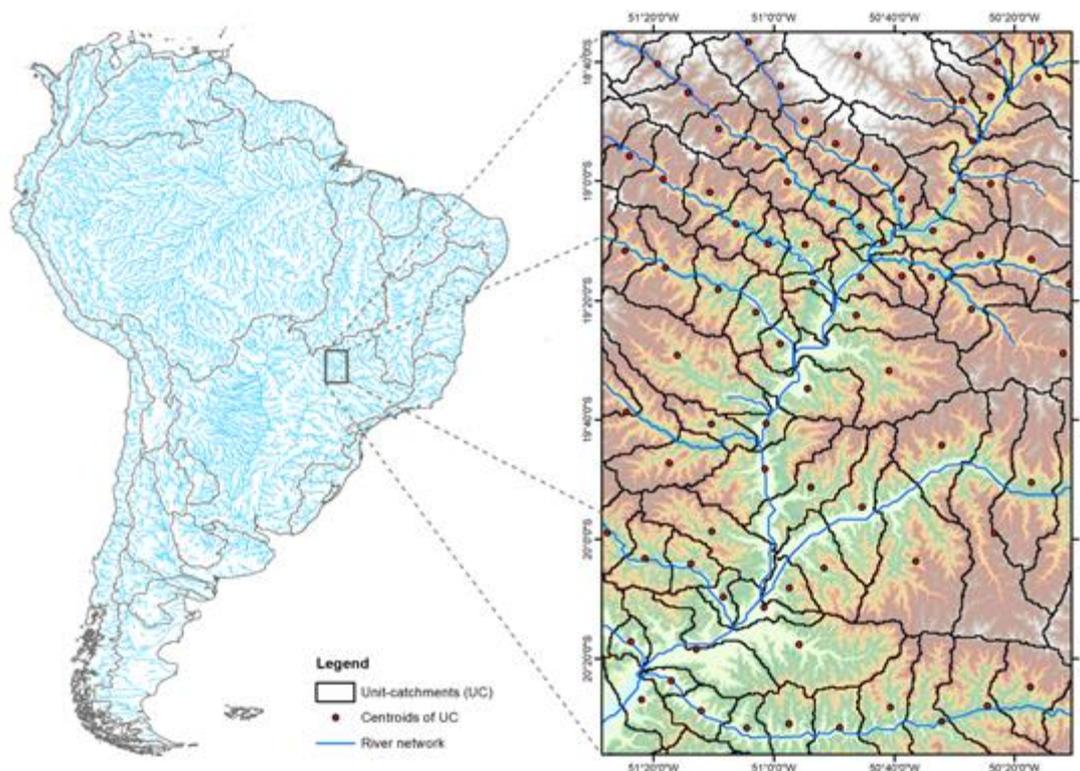


Figura 1. Mapa com a rede de drenagem da América do Sul derivada do HydroSHEDS, com as minibacias discretizadas a cada 15 km. O número de minibacias na versão inicial do modelo é de 33.749. Fonte: Siqueira et al., (2018).

Conforme descrito em Siqueira (2020), a base de dados espaciais do MGB-AS é composto por três arquivos:

- MGB_SA_UnitCatchments.shp: shapefile das minibacias do modelo.

- MGB_SA_Rivers.shp: shapefile da rede de drenagem do modelo;
- MGB_SA_Centroids.shp: shapefile dos centróides de cada minibacia do modelo.

A identificação de cada trecho é dada pelo atributo *Mini*, sendo a área de contribuição local (ou direta) e área de drenagem a montante dadas pelos atributos *Area_km²* e *AreaM_km²*, respectivamente.

A rede BHO é notavelmente diferente da rede gerada pelo MGB-AS (Figura 1). Enquanto a rede do MGB-AS é uniforme pelo continente e foi desenvolvida com base na área de contribuição mínima de 1000 km², a rede BHO procura detectar de fato o início da rede de drenagem natural, com nível de detalhamento variado ao longo do país, e ignorando parcialmente regiões externas ao Brasil hidrológico. O MGB-AS também ignora algumas bacias pequenas na região costeira e lagunas (e.g. Lagoa dos Patos), por não se inserirem dentro da abordagem de simulação hidrodinâmica unidimensional de grande escala. A Figura 2 ilustra as bacias representadas pelo MGB-AS na região da costa leste do Nordeste Brasileiro. Dessa forma, a BHO apresenta uma rede muito mais densa com cerca de 13 vezes mais elementos que a rede formada pelo MGB-AS, incluindo um domínio maior dentro do país.

A Figura 3 exemplifica como as minibacias e a rede de drenagem do MGB-SA (verde) se compara com a rede da BHO (azul). É possível observar nitidamente a diferença de detalhamento e, que nesse exemplo, a rede de drenagem do MGB-SA que representa o rio principal, é muito coerente com a BHO. O contorno das minibacias – que não é suavizado – fornece uma noção prática da resolução da base hidrológica que resultou do processamento de produtos do Hydrosheds. A diferença de detalhamento e resolução tem consequência prática nos atributos da rede. Por exemplo, podemos verificar trechos representados de forma mais retilínea pelo MGB-AS enquanto a BHO captura de forma mais precisa a sinuosidade do rio. Por consequência, isso tem um efeito direto, por exemplo, no cálculo do comprimento de trechos e consequente declividade.

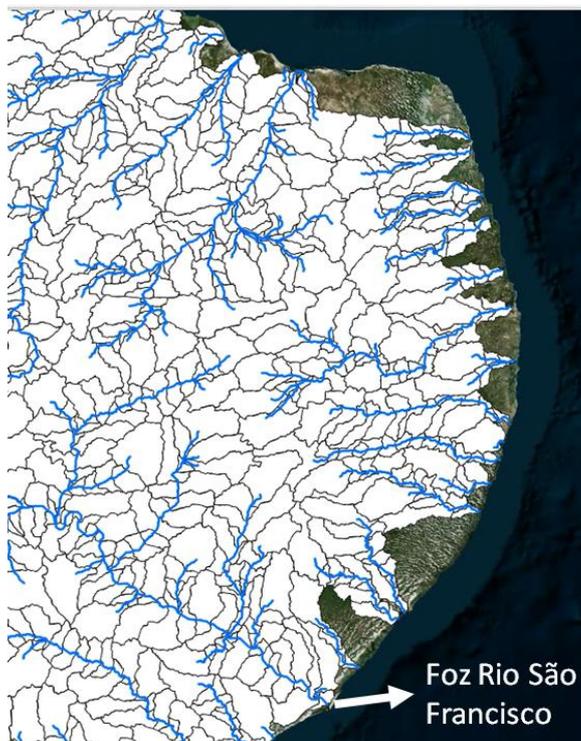


Figura 2. Demonstração das bacias representadas pelo MGB-AS na costa leste do Nordeste brasileiro.

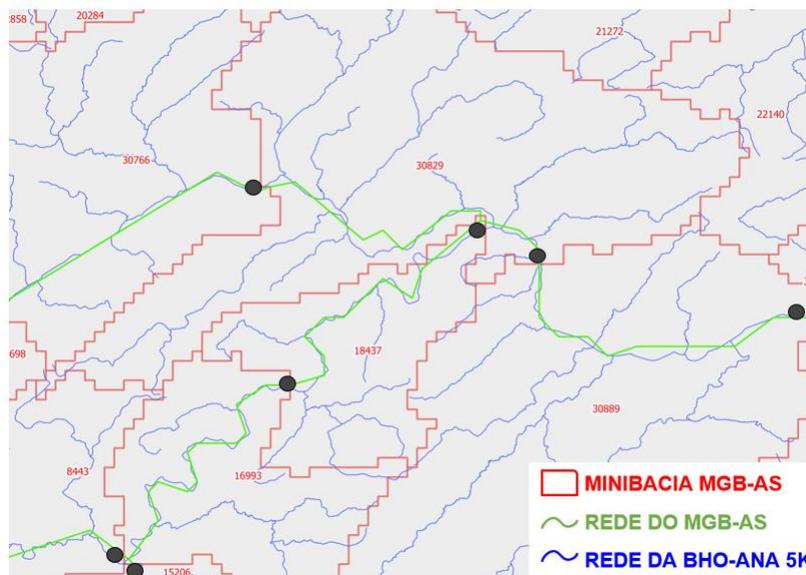


Figura 3. Exemplo comparativo entre a rede da BHO5K2017 e a rede/minibacias do MGB-AS

Na maior parte dos casos, a rede de drenagem do MGB-AS se assemelha bastante aos trechos principais da BHO (área de drenagem superior a 1000 km²), seguindo o mesmo percurso e topologia. Os mapas ilustrados na Figura 4 reproduzem o procedimento de ottocodificação adotado para a elaboração da BHO, mas na base de minibacias do MGB-AS. Podemos perceber, com esse exemplo da Bacia do Alto Paraná, que as sub bacias geradas pela ottocodificação em nível 2 (de 1 a 9) são muito semelhantes. Em geral, a similaridade se repete nas grandes bacias do país. Nessa figura também é interessante observar a diferença do tamanho das minibacias/cotrechos, constatando a discretização espacial maior para a BHO comparada com o MGB-AS. No entanto, principalmente em regiões muito planas, as redes MGB-AS e BHO podem ter algumas discordâncias. O exemplo do rio (Figura 5) mostra como os traçados das redes podem diferir em alguns casos. Em casos onde não há uma coerência de conectividade entre as duas bases hidrográficas, a transferência de vazão pode ser afetada de maneira negativa. Por outro lado, há de se entender que a complexidade da rede de drenagem em algumas regiões com bifurcações, ilhas e áreas inundáveis, em geral, não são triviais.

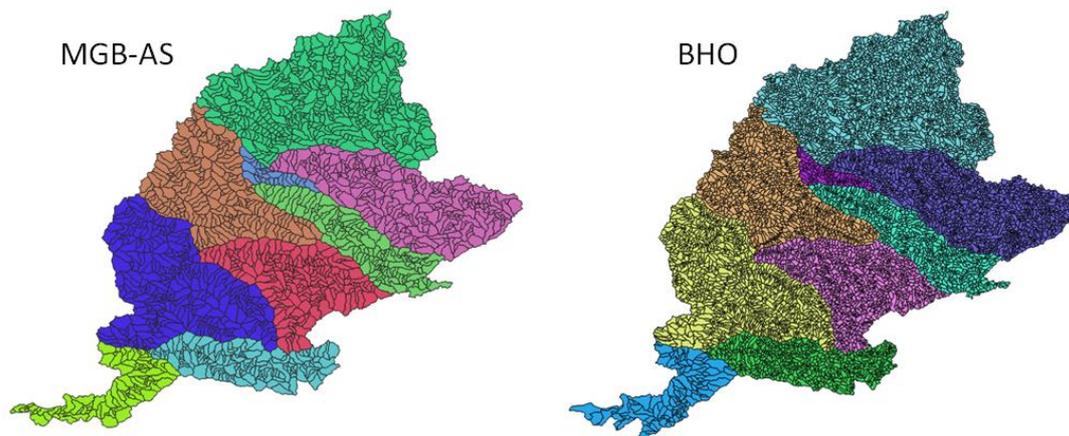


Figura 4. Comparação de Sub-bacias geradas pelo nível 2 da Ottocodificação da BHO e do MGB-AS para a bacia do alto Paraná.

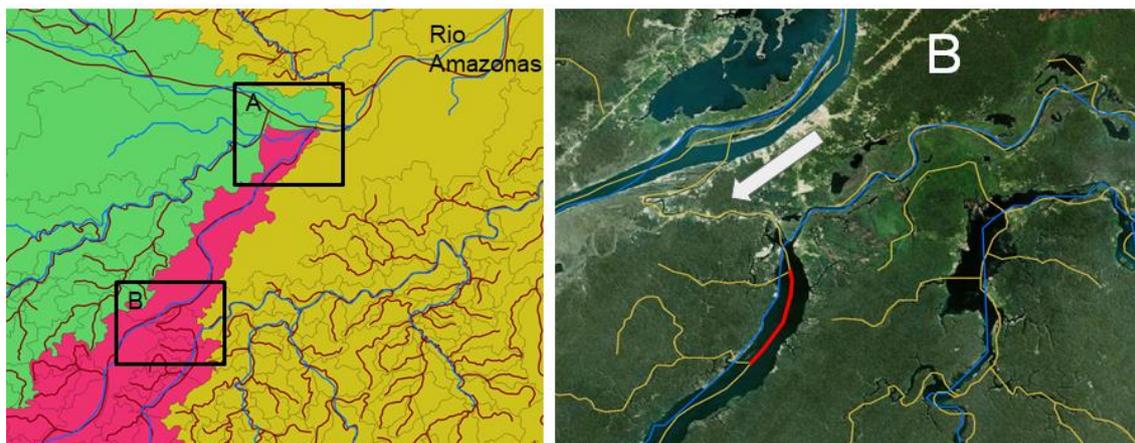


Figura 5. Região da foz do rio Madeira (A) em que é notada a presença de conexões laterais (B). A rede BHO está em cores vermelho (esquerda) e amarelo (direita) enquanto a rede do MGB-AS está em azul. As cores das sub-bacias (verde, rosa e amarelo) estão relacionadas à ottocodificação nível 2 da Bacia Amazônica.

5 MÉTODO DE DOWNSCALING ESPACIAL

O método aqui proposto é focado na transferência de vazões de referência, numa série de etapas pós-processamento, incluindo geoprocessamento e a aplicação de equações de transferência.

Para compreensão da metodologia, se faz necessário, em primeiro lugar, conhecer como as vazões são representadas nas minibacias e trechos do MGB, além de uma visão conceitual de como esses elementos se sobrepõem com a informação da BHO. A seguir, diferentes tipos de solução (isto é, métodos específicos) que permitem lidar com as situações de configuração topológica encontradas durante a aplicação do *Downscaling*. Adicionalmente, é feita uma descrição sobre a lógica utilizada nos algoritmos de processamento, bem como do equacionamento adotado para transferência indireta de vazões. Por fim é realizada uma apresentação dos resultados da transferência de vazões de referência do modelo MGB-AS para a BHO.

5.1 VAZÕES REPRESENTADAS NO MGB

Conforme mencionado, é necessário lembrar - ao menos, brevemente - a estrutura de funcionamento do modelo MGB. Em resumo, o modelo hidrológico é composto pelas componentes de: balanço de água no solo e evapotranspiração; escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo (contribuição lateral nas minibacias); e, por fim, o escoamento no rio principal; ilustrados na Figura 6.

Assim, para cada intervalo de tempo (tipicamente diário) do período de simulação escolhido, o MGB produz uma estimativa de estoques e fluxos de água em diferentes compartimentos hidrológicos. A vazão observada no rio principal é a variável que é utilizada para calibração e validação do modelo. Assim, é uma medida integradora dos processos hidrológicos que ocorrem a montante do trecho, além de ser a referência para medir o desempenho em estimar as vazões simuladas. Portanto, as vazões resultantes do modelo buscam reproduzir o fluxo médio de água no sentido longitudinal da seção transversal do exutório de cada minibacia. Essas vazões no exutório se tornam vazões afluentes aos trechos de jusante.

A vazão disponível é resultante do balanço hídrico (e de quantidade de movimento) no rio principal, incluindo os fluxos de montante e para jusante, mas também das contribuições de escoamento locais (ou da bacia incremental). O MGB considera esses dois aspectos, tendo estimado a vazão integrada no rio principal, mas também as vazões da área de contribuição local.

Na próxima sessão vamos ilustrar como essa característica pode ser utilizada para compor um modelo de transferência do MGB para a BHO, sobretudo, considerando as diferenças e similaridades já descritas das duas redes de drenagem.

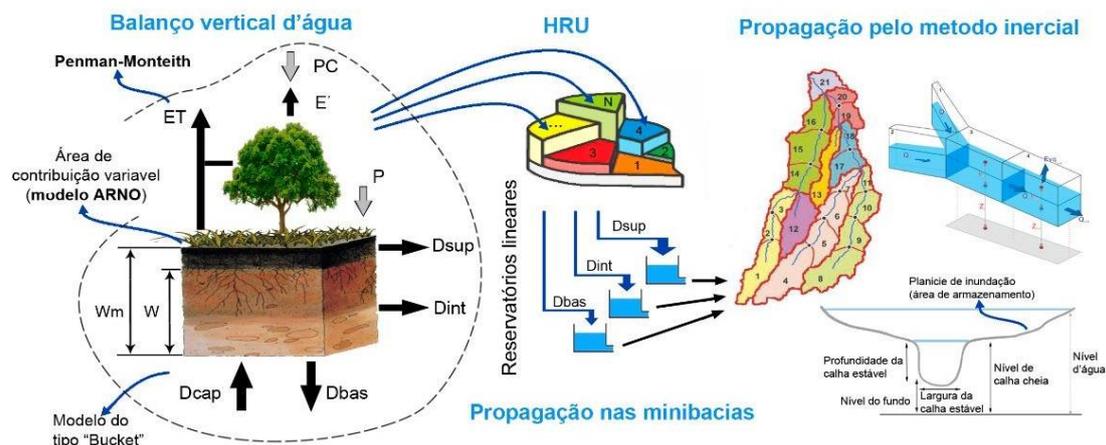


Figura 6. Funcionamento do modelo MGB (adaptado de PAIVA R. C., 2009).

5.2 VISÃO CONCEITUAL PARA TRANSFERÊNCIA POR DOWNSCALING

As redes de drenagem do MGB e da BHO possuem boa compatibilidade para os grandes rios simulados, possivelmente por serem derivadas de processos de natureza semelhante que consideram, por exemplo, bases de informações referentes a modelos de elevação e orientação da rede de fluxo topográfico. Por outro lado, a rede BHO possui na maioria dos casos um maior nível de detalhe e densidade, trazendo rios e cursos d'água virtualmente invisíveis para o detalhamento de aplicações típicas em grandes bacias usando o MGB.

A Figura 7 apresenta uma ilustração conceitual de sobreposição dos principais elementos topológicos do MGB com a rede de drenagem da BHO5k2017. A partir da avaliação das redes, é plausível assumir que não há uma coerência perfeita, mas que é possível identificar pontos de suporte para uma associação entre as duas redes de drenagem, e que podemos utilizar as duas componentes de escoamento do modelo (no rio principal e afluentes locais) em uma abordagem para transferência. Além disso, considera-se que a solução na escala de minibacia adotada na modelagem hidrológica possui incertezas espaciais que não justificariam o uso de métodos complicados de interpolação. Neste sentido, o ganho de desempenho nas estimativas após a transferência decorre em etapas posteriores, seja pela análise de erros e/ou assimilação estática ou dinâmica das vazões na regionalização.

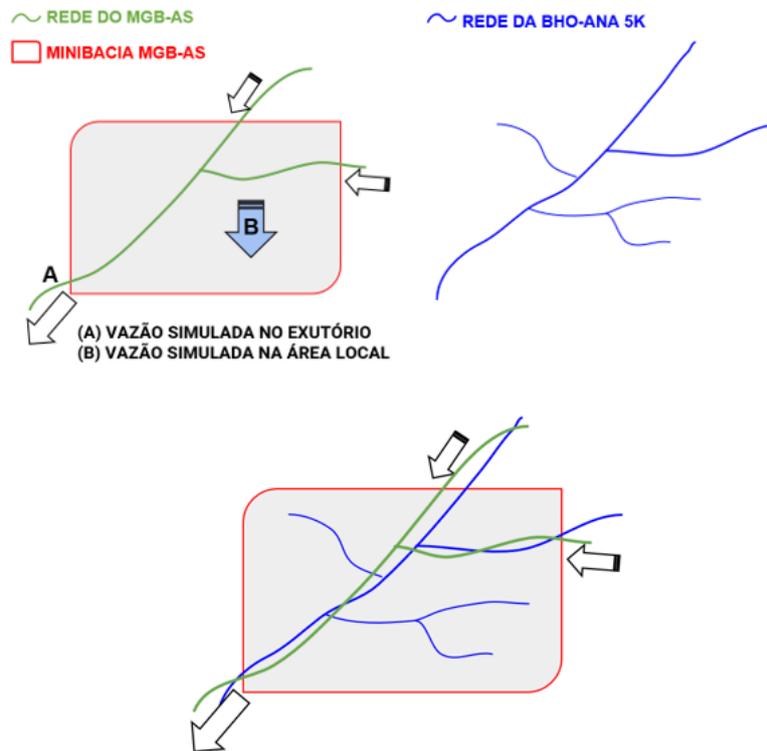


Figura 7. Visão conceitual da sobreposição do MGB com a rede de drenagem da BHO-ANA.

5.3 TIPOS DE TRANSFERÊNCIA DE VAZÃO

A visão conceitual proposta serve de guia para identificar casos e tipos de soluções adotadas para a transferência. A seguir, será demonstrado como a transferência de vazões de referência pode ser realizada, a partir da elaboração de tabelas de relacionamento topológico entre locais onde MGB simula vazões e trechos na BHO, quando respeitada a coerência e conectividade topológica. O desenvolvimento do modelo de transferência pode ser compreendido facilmente, por uma série de perguntas e respostas, buscando a simplicidade e parcimônia.

"Como podemos utilizar as vazões calculadas no exutório de minibacia do MGB em trechos da BHO?"

Talvez essa seja a pergunta mais simples que poderia ser realizada neste contexto. Uma resposta bastante simples sugere que podemos transferir essa vazão para a BHO diretamente num trecho que seja compatível com a localização do exutório. Dessa resposta, temos a proposta de solução para casos denominados Tipo 1. A Figura 8 apresenta uma ilustração conceitual, onde temos uma minibacia (em cinza) e sua rede de drenagem principal (em verde) e as vazões simuladas no exutório. Os pontos representam feições individuais nas duas bases. Se é possível adotar um trecho na BHO (em azul) topologicamente compatível ao exutório, então a solução tipo 1 é adotada. A lógica de compatibilidade é descrita em maiores detalhes adiante na seção 0, sendo baseada em critérios de conectividade da rede e localização. Conforme demonstrado na mesma figura, os exutórios de minibacias a montante podem ser relacionados da mesma maneira. Em geral, busca-se para cada minibacia, os trechos na BHO que melhor atendem a configuração abaixo.

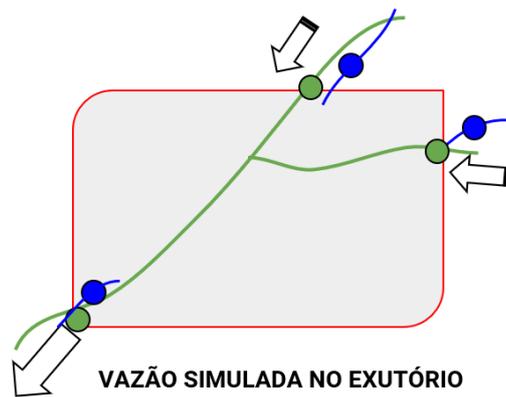


Figura 8. Caso 1 - Relacionamento em locais de exutório de minibacia.

"Como podemos estimar as vazões ao longo da rede principal?"

Dado que temos uma maneira de transferir as vazões nos trechos de exutórios do MGB para trechos da BHO, essa seria uma segunda pergunta a ser respondida que caracteriza a solução de casos Tipo 2. Entre dois trechos de exutórios da rede de drenagem do MGB, podem existir mais de um trecho de BHO, ou mesmo confluências internas à minibacia. Para o caso com um afluente, idealizado na Figura 9, existe um caminho interno a ser resolvido na BHO (em azul). Existem muitas maneiras de fazer essa estimativa, sendo possível adotar uma interpolação entre vazões de montante e jusante do trecho. Existem também casos com mais de um afluente e confluências internas à minibacia (Figura 10). Uma alternativa é considerar a vazão no trecho igual ao somatório das vazões afluentes, corrigido por um fator coerente com a vazão incremental (positivo ou negativo). Nesse caso, o balanço de vazões pode ser obtido dos resultados do MGB (a montante e jusante dos caminhos), e aplicados às áreas incrementais da BHO.

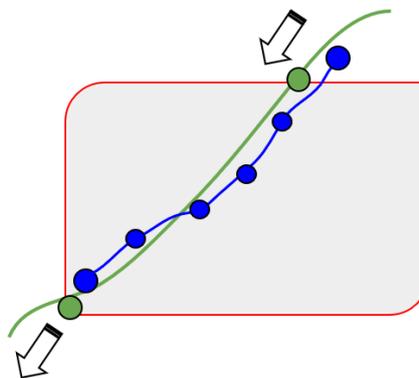


Figura 9. Caso 2 – Relacionamento ao longo da rede principal.

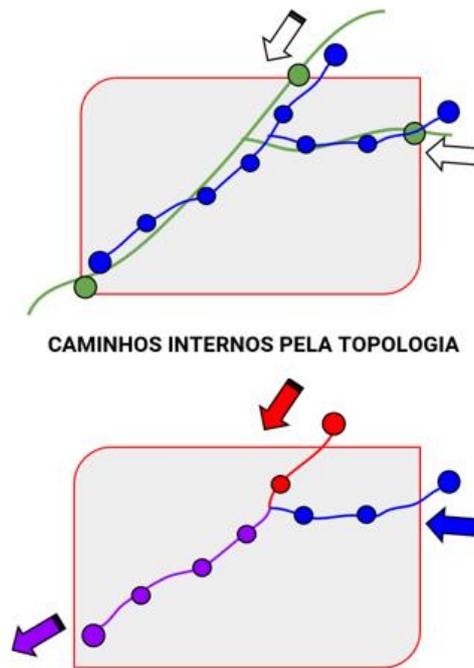


Figura 10. Caso 2 – Relacionamento ao longo da rede principal, em confluências. Caminhos internos (acima) e efeito de afluentes (abaixo).

"Como podemos estimar as vazões locais afluentes à rede principal?"

Esse problema consiste na resolução de Tipo 3. Para responder esta questão, existe a oportunidade de aproveitar a estrutura conceitual do MGB e utilizar resultados da geração de escoamento que são calculados internamente durante a simulação. A etapa de propagação nos reservatórios lineares do MGB resulta em estimativas de vazões que representam justamente a contribuição local dos afluentes ao trecho da minibacia, e que são independentes das vazões de montante desse mesmo trecho. Por esse motivo, a escolha mais lógica para representar esse processo na transferência é fazer o uso do escoamento gerado na minibacia que é associada ao trecho em questão. Este escoamento pode ser transformado em vazão específica com base na área da minibacia, e posteriormente transferido para os afluentes em função das suas áreas individuais de contribuição. A Figura 11 ilustra como seria a estimativa de locais referente aos afluentes, fora da rede principal. Para compatibilizar áreas de drenagem que representam minibacias de cabeceira do MGB, adota-se essa abordagem também para o rio principal, conforme ilustrado na Figura 12.

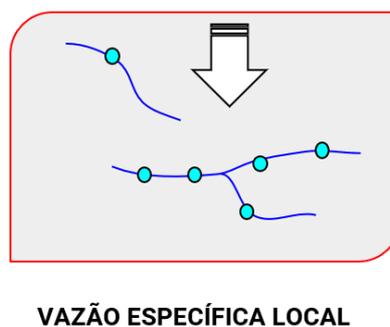
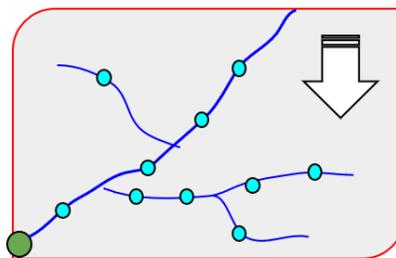


Figura 11. Caso 3 – Relacionamento em afluentes hídricos locais à rede principal.



VAZÃO ESPECÍFICA LOCAL (CABECEIRA)

Figura 12. Caso 3 – Relacionamento em afluentes hídricos locais (cabeceira).

5.4 ESTRUTURA LÓGICA PARA TRANSFERÊNCIA DE VAZÕES

Conforme descrito na seção anterior, o problema da transferência de vazão de referência do MGB para BHO está atrelado à topologia das duas redes de drenagem, sendo que o tipo de solução depende principalmente do grau de similaridade e/ou compatibilidade entre elas. Em ambas as bases, os trechos de drenagem se relacionam por meio de conexões da forma jusante-montante. Dessa maneira, o relacionamento de minibacias do MGB x trechos da BHO (*cotrecho*) pode ser tratado considerando os casos mencionados anteriormente.

Nas tabelas da BHO, os trechos de rio são identificados pelo atributo *cotrecho*, assim faremos uso dessa notação para fazer referência aos trechos na BHO. Cada *cotrecho* possui um trecho a jusante identificado pelo atributo *nutrjus*.

Nas tabelas do MGB, o termo *minibacia* é utilizado para se referir tanto à área de drenagem local quanto ao trecho de rio principal que se define nessa região. Assim, faremos uso de *minibacia* para nos referir a trechos da rede no MGB. De maneira similar a tabela da BHO, cada minibacia pode se conectar a um trecho de jusante identificado no atributo *minijus*, que é obtido a partir do arquivo descritor da geometria do modelo hidrológico (*mini.gtp*).

5.4.1 Elaboração da tabela para o caso/tipo 1

O caso 1 consiste na base fundamental para a transferência de vazões do MGB para a BHO. Um bom mapeamento dos trechos de tipo 1 favorece bastante a solução do tipo 2, que possui uma grande dependência do resultado da primeira. Em teoria, a solução para o caso 1 é a que representa a melhor transferência possível, uma vez que as vazões atribuídas aos trechos BHO correspondentes são calculados explicitamente pelo modelo hidrológico.

O objetivo desta etapa é elaborar uma tabela que relaciona exutórios de minibacias do MGB e cotrechos. Para tanto, é necessário que a relação considere aspectos lógicos de proximidade entre pontos, mas também de coerência topológica entre a a rede do MGB e a da BHO. Neste processo, é realizada uma etapa preliminar de geoprocessamento e na sequência utiliza-se o algoritmo apresentado (através de fluxogramas) no apêndice deste relatório. Os passos da solução do tipo 1 procuram sugerir pontos BHO (cotrechos) candidatos a exutório em cada minibacia e podem ser sintetizados da seguinte maneira:

GEOPROCESSAMENTO:

- a. Todas as *line features* que representam os trechos de drenagem BHO são inicialmente convertidas em *point features*, os quais são posicionados no centro geométrico dos trechos. Para isso pode ser utilizada a ferramenta **ponto sobre superfície** disponível no software **QGIS**, ou métodos de interpolação disponível em bibliotecas de operações geoespaciais. Assim, é criado um novo arquivo vetorial de pontos BHO, que possui os mesmos atributos das *line features* do arquivo original;
- b. Realiza-se uma intersecção destes pontos (*intersect* ou “*point in polygon*”) com os polígonos das minibacias do MGB (Figura 13). Assim, o identificador das minibacias da intersecção é incorporado à tabela de atributos dos pontos BHO. Os pontos que possuem o identificador da minibacia “Y” vão atuar, portanto, como os “candidatos mais prováveis” a receberem as vazões diretamente da minibacia “Y” (i.e., serem marcados como tipo 1);
- c. Para compatibilizar o sistema de coordenadas de geográficas entre BHO e MGB, é necessário adotar uma conversão entre sistema SIRGAS 2000 (associado aos trechos BHO) e WGS 84, que é aquele tipicamente utilizado nas aplicações do MGB;

ALGORITMO:

- d. Filtra-se os pontos BHO com área de drenagem acima do limiar para o qual a propagação nos canais é calculada explicitamente pelo MGB. Este processo é realizado para reduzir o número de processamentos necessários. No caso particular do MGB-AS o limiar mínimo de drenagem é de 1000 km², porém para esta filtragem foi utilizado um valor um pouco menor (800 km²) para possibilitar a existência de pelo menos um ponto BHO candidato nas cabeceiras de drenagem;
- e. Para cada minibacia, são selecionados os pontos BHO que possuem o mesmo identificador *mini* (i.e., os candidatos à solução de tipo 1). Para tanto:
 - É calculada a diferença absoluta entre a área de drenagem destes pontos e a área a montante da minibacia. Utiliza-se a mínima diferença como critério de escolha do ponto;
 - Para áreas de drenagem < 10.000 km², é permitido que os candidatos da minibacia de jusante daquela avaliada também possam ser verificados. Isso minimiza erros de seleção quando há entrada de tributários com área < 1000 km² (limiar MGB-AS) na proximidade do exutório da minibacia avaliada. Esta opção foi utilizada para o caso específico da América do Sul, porém para outras aplicações do MGB onde o limiar de início de drenagem é menor, esta etapa pode ser suprimida
 - Para o caso acima, são analisados apenas os candidatos da minibacia de jusante para os quais há conectividade topológica com os pontos BHO da minibacia avaliada;

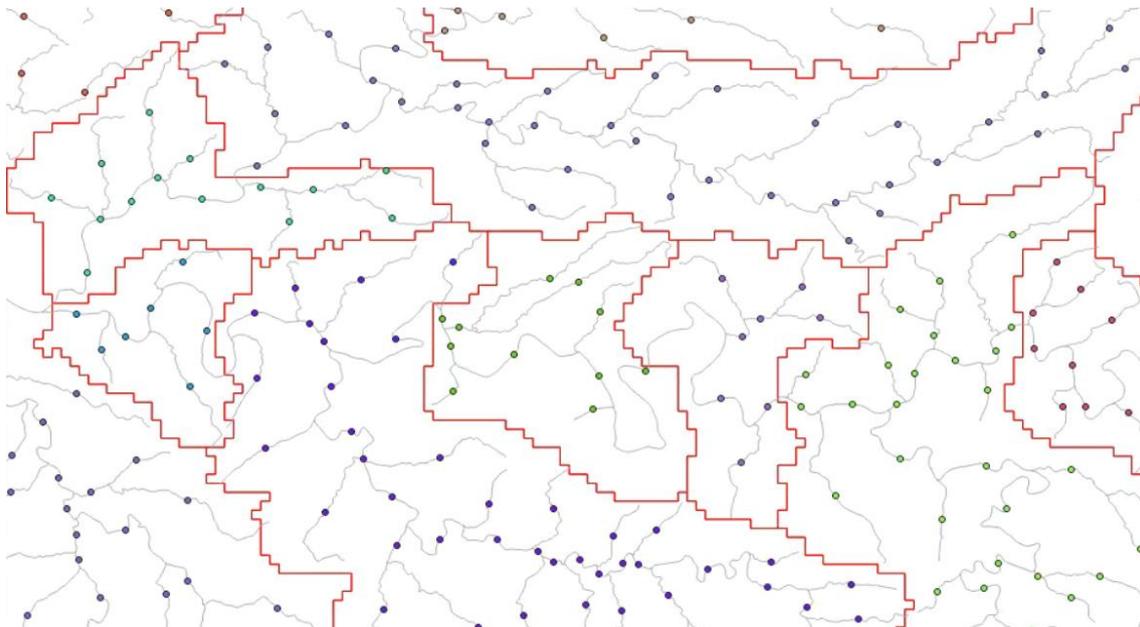


Figura 13. Conversão dos trechos BHO para point feature (posicionado no centro geométrico da line feature) e intersecção com as minibacias do MGB. As linhas em cinza, os polígonos em vermelho e os pontos coloridos representam, respectivamente, os trechos BHO, as minibacias e os centros geométricos de cada trecho.

Após o término destes passos, novas avaliações do algoritmo são realizadas para corrigir potenciais inconsistências remanescentes do processamento. Isto inclui:

- a. Garantia de conectividade topológica em minibacias que recebem mais de um afluente;
- b. Identificação e exclusão de pontos BHO com grandes diferenças de área de drenagem em relação às minibacias correspondentes.
- c. Correção de pontos BHO vinculados a mais de uma minibacia. Quando isso ocorre, mantém-se apenas o ponto BHO associado à minibacia mais de jusante;

Terminado esse processo, várias minibacias perdem seus pontos BHO candidatos por terem inconsistência topológica, mais de uma indicação ou grande diferença de área de drenagem. Logo, é realizada uma nova busca de pontos BHO candidatos:

- a. Verifica-se cotrechos que estão a jusante do ponto BHO candidato das minibacias de montante e que estão à montante dos pontos BHO candidatos da minibacia de jusante;
- b. Excluem-se as opções de pontos BHO que estão a uma distância maior que 50 km do centroide da minibacia em questão.
- c. Escolhe dentre as opções encontradas o ponto BHO que apresentar a menor diferença de área de drenagem com a minibacia.

A Figura 14 apresenta um exemplo visual dos trechos BHO selecionados para a transferência direta das minibacias do MGB.

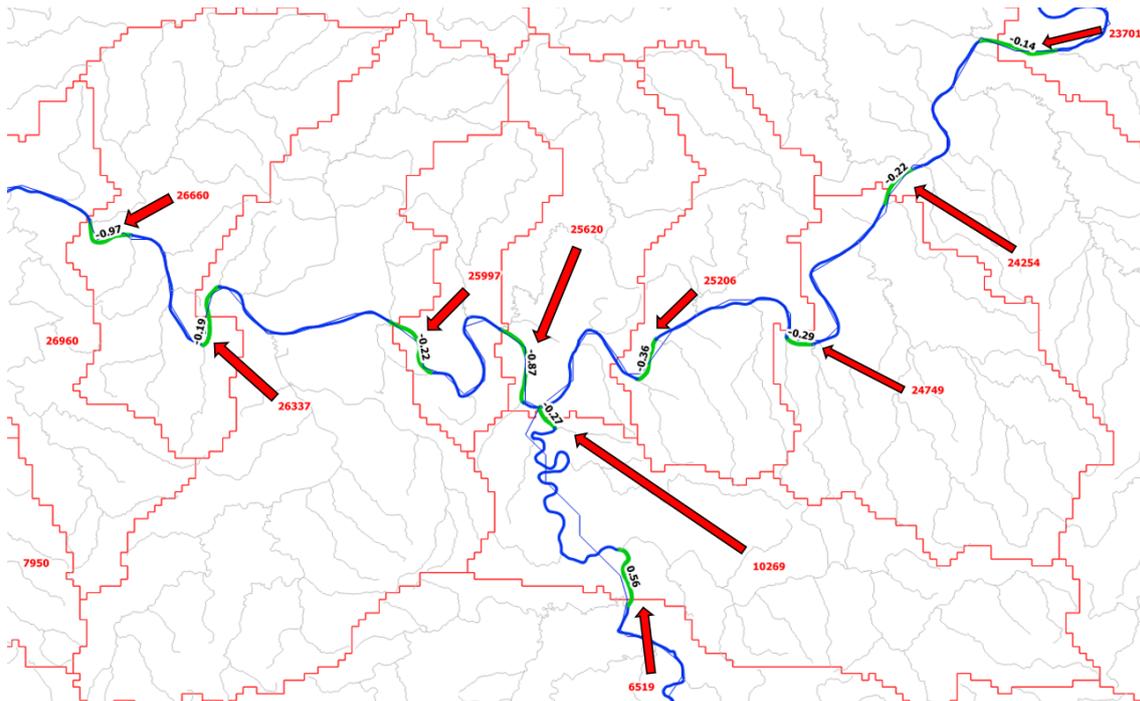


Figura 14. Exemplo visual com o resultado do algoritmo. As linhas em verde, as linhas em azul/cinza e os polígonos em vermelho representam, respectivamente, os trechos BHO selecionados para o tipo 1, os trechos não resolvidos (a serem processados na etapa subsequente) e as minibacias do MGB. Os valores indicados sobre os trechos representam a diferença de área (%) entre MGB e BHO, enquanto as setas vermelhas indicam a minibacia para qual o trecho BHO está diretamente associado.

Na Figura 15, é apresentada parcialmente um exemplo de tabela que é obtida com a aplicação dos passos mostrados acima. No lado esquerdo são indicadas as minibacias e os códigos BHO relacionados. Na parte central, é indicada a área de montante (em km²) dos trechos correspondentes, bem como a diferença relativa entre MGB e BHO. A direita indica-se as coordenadas lat/long dos pontos BHO e, adicionalmente, um atributo (i.e. *flag_mini_in*) para informar se trecho localiza-se dentro (ou fora) da minibacia.

Mini	cotrecho	codigo_otto	AreaM_BHO	AreaM_MGB	Diff(%)	Lat	Lon	Flag_mini_in
1	397043	49999911	1033.8	1030.6	0.31	-10.028	-76.674	1
2	28284	89999553	1865.2	1866.1	-0.05	-14.535	-56.787	0
3	81401	46999513	1210.4	1221.0	-0.87	-16.195	-60.582	0
4	279229	869997993	1576.4	1576.8	-0.03	-16.523	-47.445	1
5	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0
6	112257	699973	1046.2	1096.2	-4.56	-17.638	-53.243	1
7	97626	48999915	1119.6	1084.6	3.22	1.831	-64.257	0
8	93993	7699915	1680.6	1683.3	-0.16	-20.279	-46.165	0
9	54941	4299913	1133.0	1159.8	-2.32	-14.624	-53.862	1
10	302026	4499971	948.1	1075.9	-11.87	-13.994	-59.371	1
11	372546	49299513	1206.5	1241.2	-2.80	-10.878	-72.041	1
12	191445	49899957	1312.2	1309.9	0.18	-15.165	-71.611	0
13	422770	749973	1550.9	1548.3	0.16	-9.734	-45.563	1
14	276573	649979	1570.2	1550.6	1.26	-15.837	-49.230	0
15	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0
16	363513	46499953	1501.3	1474.0	1.86	-11.636	-72.141	0
17	438012	49499951	1044.1	1029.8	1.38	1.589	-76.528	1
18	2093	8299311	1030.9	1024.3	0.65	-27.798	-49.770	1

Figura 15. Exemplo de tabela resultante da aplicação do algoritmo para o caso/tipo 1.

5.4.2 Elaboração de tabelas para o caso/tipo 2

O caso 2 consiste no relacionamento (e transferência de vazão) dos demais cotrechos que se localizam ao longo da rede principal, mas que não são exutórios de minibacias do MGB. O procedimento consiste na varredura da rede BHO, considerando os trechos já relacionados na tabela da Figura 15. Em primeiro momento, verifica-se a conectividade topológica e, caso haja compatibilidade, armazena-se - para o cotrecho em análise - os parâmetros referentes a minibacia de referência e minibacias afluentes que compõe a estimativa de vazão no trecho. Assim, o processo considera a identificação de caminhos (i.e. percursos) ao longo da rede de drenagem da BHO, relacionados a topologia de minibacias conforme ilustrado na Figura 16.

Basicamente, o algoritmo mescla uma consulta à tabela da Figura 15 e um processo de descida da árvore topológica. Assim, a partir de cada item cotrecho-minibacia da tabela:

- a. define-se o cotrecho-minibacia como referência (exutório local)
- b. verifica-se a compatibilidade:
 - busca as minibacias a montante da referência na tabela topológica do MGB (mini.gtp) e verifica se todas as minibacias afluentes possuem cotrecho mapeado na tabela 1;
 - para cada cotrecho de minibacia afluente define-se o início de um “caminho” (ou caminho tipo 2) para jusante;
 - para cada caminho realiza-se o procedimento de descida topológica para jusante na rede BHO até encontrar o cotrecho de referência; o único cotrecho mapeado na tabela 1 ao longo e no final do caminho, deve ser o de referência.
- c. se houver incompatibilidade, o caminho não é salvo e os trechos podem ser tratados posteriormente, como tipo 4.
- d. se os caminhos de todos os afluentes são percorridos com sucesso até o cotrecho de referência, armazena-se os caminhos e os trechos são identificados como tipo 2.

Uma vez mapeados todos os caminhos, uma nova varredura é realizada para armazenamento dos parâmetros necessários para transferência, em cada cotrecho.

- a. identificador de minibacia de jusante, necessário para extrair a vazão defluente
- b. identificadores de minibacias de montante, necessário para extrair vazões afluentes
- c. fração da área de drenagem do trecho em relação ao total das áreas de contribuição da na região incremental

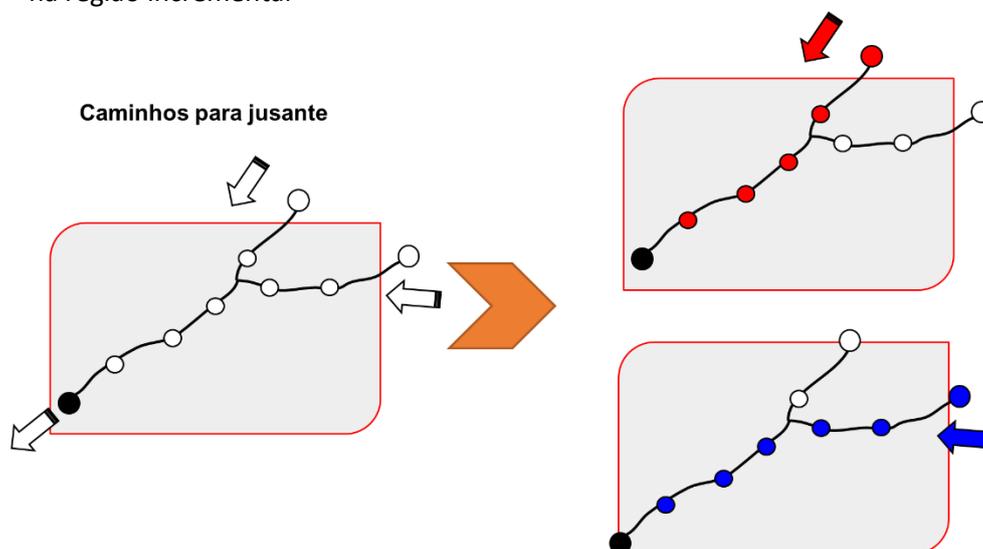


Figura 16. Exemplo de identificação de caminhos (a partir de afluentes) para jusante

5.4.3 Elaboração de tabelas para o caso/tipo 3

O caso 3 consiste no relacionamento de cotrechos que representam vazões de afluentes à rede principal de uma região definida por minibacia. O relacionamento é realizado de maneira simples, utilizando o método de “ponto em polígono”, considerando o ponto médio ao longo de cada trecho da BHO, em relação aos polígonos de minibacias do MGB.

Num primeiro momento, realiza-se este relacionamento para todos os cotrechos da BHO. Esse procedimento permite identificar o domínio da BHO que se encontra dentro do domínio do MGB. Assim, essa tabela cotrecho x minibacia de tipo 3 fornece uma camada de informação de fundo para a transferência. Os parâmetros necessários para a transferência são, em cada cotrecho:

- identificador e área de drenagem local da minibacia em que se localiza o cotrecho
- área de drenagem do cotrecho

5.4.4 Fechamento e outros casos

Por fim, uma varredura da rede de trechos da BHO permite verificar se existem cotrechos na rede principal e dentro do domínio que não foram definidos como tipo 1 ou 2. A rede principal é definida a partir de um limiar de área de drenagem, compatível com o utilizado na elaboração da tabela tipo 1 (e.g. >1000 km² para MGB-AS). Devido a isso, em minibacias de cabeceira com áreas maiores que 1000 km², o cotrecho logo a montante do exutório são denominados tipo 4.

Em geral, em situações mais problemáticas onde o relacionamento local entre as topologias do MGB e da BHO não foi possível, tais como em trechos de drenagens mais complexos, como nas proximidades planícies de inundação e/ou desvios na drenagem, denomina-se também um caso do tipo 4. Nesses trechos, a solução de transferência se baseia diretamente pela vazão específica do cotrecho mapeado em tipo 1 mais próximo no sentido de jusante.

5.5 FÓRMULAS PARA TRANSFERÊNCIA DE VAZÕES

5.5.1 Caso 1

Para o caso tipo 1, o equacionamento deste processo se dá pela transferência direta de valores simulados do MGB, pela equação:

$$Q_{BHO(c)} = Q_{MGB(m)} \quad (1)$$

onde: $Q_{BHO, c}$ é a estimativa da vazão na BHO (m³/s); e $Q_{MGB, m}$ é a vazão simulada no modelo (m³/s); *cotrecho “c”* e *minibacia “m”* são os pares associados.

5.5.2 Caso 2

Para o caso tipo 2, o equacionamento deste processo da seguinte maneira:

Num primeiro momento, para o cotrecho “c” de interesse identifica-se qual a minibacia “m” (e cotrecho associado “j”) que limita o caminho onde “c” está localizado, a jusante. Identifica-se também as demais N minibacias que contribuem para a região incremental formada pelos múltiplos caminhos que desaguam em “j”, e dessas, as M minibacias cujo caminho a jusante passa pelo cotrecho “c”. Tanto a minibacia a jusante quanto as minibacias a montante definem uma região incremental, e possuem cotrechos associados previamente definidos como tipo 1. As minibacias que delimitam essa região incremental são utilizadas para o balanço das vazões de referência.

A vazão é calculada da seguinte maneira:

$$Q_{BHO(c)} = \sum_{i=1}^M Q_{MGB(i)} + A_{INC(c)} \cdot \Delta Q_{MGB(m)} \quad (2)$$

Onde: $Q_{BHO(c)}$ é a vazão estimada na BHO (m^3/s); Q_{MGB} é a vazão da minibacia do MGB (sendo o somatório correspondente as minibacias afluentes ao caminho do cotrecho); e o fator de correção da vazão incremental é descrito a seguir.

O balanço na região incremental (entre minibacias do MGB) é realizada a partir das vazões afluentes e a vazão defluente da minibacia, de forma que a vazão incremental ao longo do rio principal (ΔQ) é dado por:

$$\Delta Q_{MGB(m)} = Q_{MGB(m)} - \sum_{i=1}^N Q_{MGB(m,i)} \quad (2a)$$

A fração de área acumulada na região incremental no cotrecho (A_{INC}) da rede BHO é dado por:

$$A_{INC(c)} = \frac{A_{(c)} - (\sum_{i=1}^M A_{c(i)})}{A_{(j)} - (\sum_{i=1}^N A_{c(i)})} \quad (2b)$$

A Figura 8 ilustra o conceito das minibacias a montante, enquanto a Figura 10 demonstra a transferência considerando os caminhos afluentes, também identificados na Figura 16. Nessas figuras os pontos ao longo do caminho podem ser entendidos como trechos da BHO onde a solução tipo 2 é aplicada.

5.5.3 Caso 3

Para o caso tipo 3, o equacionamento deste processo consiste no uso da vazão específica do escoamento local (i.e. “runoff”) simulado em cada *minibacia*, aplicado proporcionalmente a área de drenagem do *cotrecho*.

$$Q_{BHO(c)} = R_{MGB(m)} \cdot A_{(c)} \quad (3)$$

$$R_{MGB(m)} = \frac{Q_{MGB(m)}}{a_{MGB(m)}} \quad (3a)$$

onde: $Q_{BHO(c)}$ é a estimativa da vazão na BHO (m^3/s); e $R_{MGB(m)}$ é a vazão específica de “runoff” simulada na minibacia ($m^3/s.km^2$); $A_{(c)}$ é a área de drenagem do trecho BHO.

5.5.4 Caso 4

Para o caso tipo 4, o equacionamento deste processo consiste no uso da vazão específica de um cotrecho de referência de tipo 1 mais próximo a jusante, tal que:

$$Q_{BHO(c)} = Q_{BHO(k)} \cdot \frac{A_{(c)}}{A_{(k)}} \quad (4)$$

onde: Q_{BHO} é a estimativa da vazão na BHO (m^3/s); $A_{(c)}$ é a área de drenagem do trecho BHO; $A_{(k)}$ é a área de drenagem de um trecho tipo 1 ou 2, a jusante. Note que a estimativa para o caso 4, depende de uma solução auxiliar de tipo 1 ou 2 já existente.

5.6 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO DOWNSCALING DO MGB-AS PARA BHO 2017 5K

O relacionamento entre a topologia do MGB-SA e os trechos da BHO – categorizados em casos tipo 1, 2, 3 ou 4 – foi realizado utilizando a metodologia apresentada. O domínio da BHO5k2017 possui 464067 feições de trechos de drenagem. Desses, foi possível relacionar dentro do domínio do MGB-AS um total de 451703 feições, o que representa cerca de 97,3% da rede da BHO. Em geral, os trechos fora do domínio, onde o relacionamento para transferência não foi possível ocorrem em trechos de drenagem na região da costa do Oceano Atlântico.

A Tabela 1 apresenta um resumo quantitativo da categorização realizada, conforme os tipos de caso 1, 2, 3 e 4. Nota-se que os trechos compatíveis com a rede principal do MGB-AS (tipos 1 e 2) representam cerca de 12% do total, enquanto a maior parte da BHO é composta por trechos de rio de afluentes locais (86% em tipo 3) que não são simulados explicitamente (e.g. sem definição de calha hidráulica e propagação em canais) no MGB-AS. Dessa forma, pelo método de Downscaling, a maior parte da rede BHO terá a estimativa de vazão relacionada aos processos simulados em nível de minibacia, decorrentes do balanço vertical de água no solo e propagação em reservatórios lineares do MGB-AS. A figura (12) apresenta um quantitativo do tipo de solução adotada na transferência por downscaling para a rede BHO.

Considerando que para os trechos da BHO categorizados em tipo 2, podem ter um ou mais afluentes, uma quantificação neste sentido também foi realizada (**Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Dos 36265 trechos classificados como tipo 2, lembrando que se trata dos trechos localizados ao longo da rede principal, entre exutórios de minibacias do MGB-AS, cerca de 92% possuem somente um afluente, 7% possuem dois afluentes e 1% tem mais de três ou quatro afluentes. Assim, o processo baseado em vazão incremental não deve resultar em situações de alta complexidade e é bastante plausível.

A partir de uma triagem preliminar de 2512 postos fluviométricos com dados disponíveis e referenciados na rede de drenagem da BHO obtidos da base descrita no “Relatório Síntese 01 do Subprojeto de Regionalização” (Collischonn et al. 2020), foi estimado que a maior parte dos postos fluviométricos se encontrariam nos principais casos idealizados (1, 2 e 3).

Tabela 1. Resumo quantitativo do relacionamento entre MGB e BHO, nas categorias de tipo de transferência por Downscaling.

Tipo	Quantidade de trechos	Percentual da BHO (%)
1	19711	4,25
2	36265	7,81
3	388717	83,76
4	6977	1,50
Domínio do MGB	451703	97,33
Feições na BHO	464067	100%

A sequência de figuras a seguir (Figura 17 a Figura 20) apresenta mapas dos trechos da BHO categorizados. O mapa de trechos do tipo 1 se remete aos locais de exutórios de minibacia do MGB-AS e, em termos de densidade, também contém cerca de 30 mil feições. A seguir, a inclusão de trechos do tipo 2 complementa a rede principal, aumentando a semelhança com a rede do MGB-AS, mas com cerca de 56 mil feições (tipo 1 + tipo 2) devido ao menor comprimento de trechos. Por fim, a rede de drenagem nos tipos 1, 2 e 3 compõe se torna muito mais densa, já na mesma ordem de grandeza da BHO5K. A Figura 21 apresenta trechos mapeados em tipo 4, enquanto a Figura 22 demonstra os trechos sem transferência de dados na região costeira. Por fim, um exemplo de detalhamento das categorias pode ser melhor observado numa região, por exemplo, nas vizinhanças da bacia do rio Doce (Figura 22 e Figura 23). Dessa forma, fica mais evidente as diferenças e conectividade de trechos tipo 1 e 2, bem como a representatividade dos trechos tipo 3, e a região costeira fora do domínio do MGB.



Figura 17. Cobertura da rede BHO categorizada em tipo 1(verde).

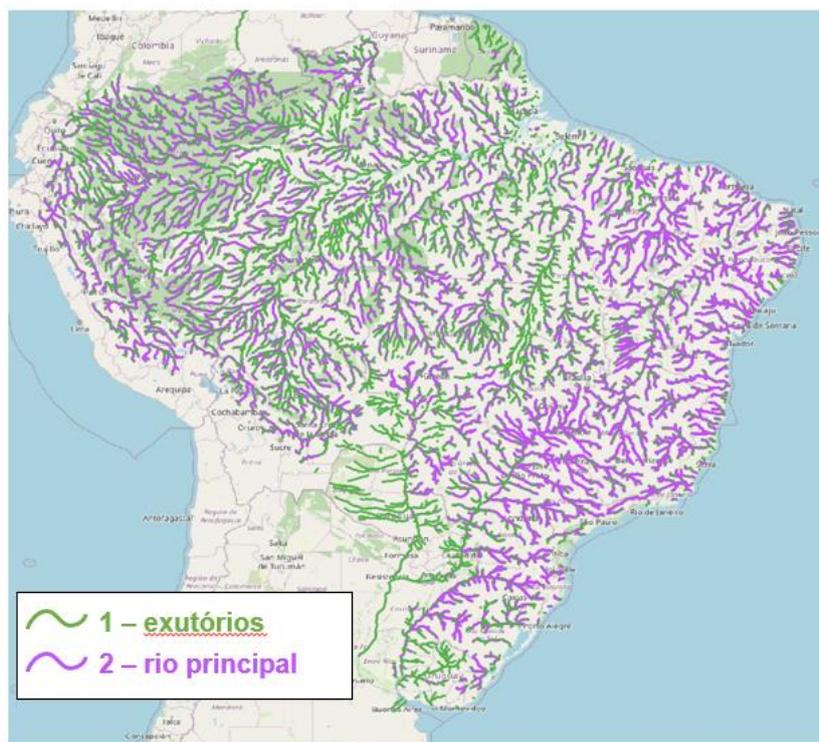


Figura 18. Cobertura da rede BHO categorizada em tipo 1(verde) e 2 (roxo).

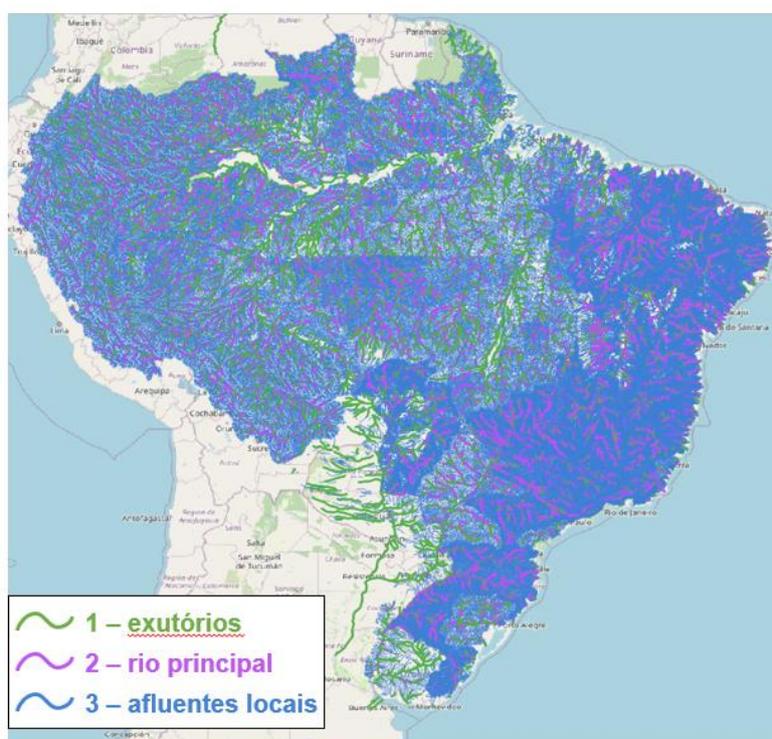


Figura 19. Cobertura da rede BHO categorizada em tipo 1(verde), 2 (roxo) e 3 (azul).

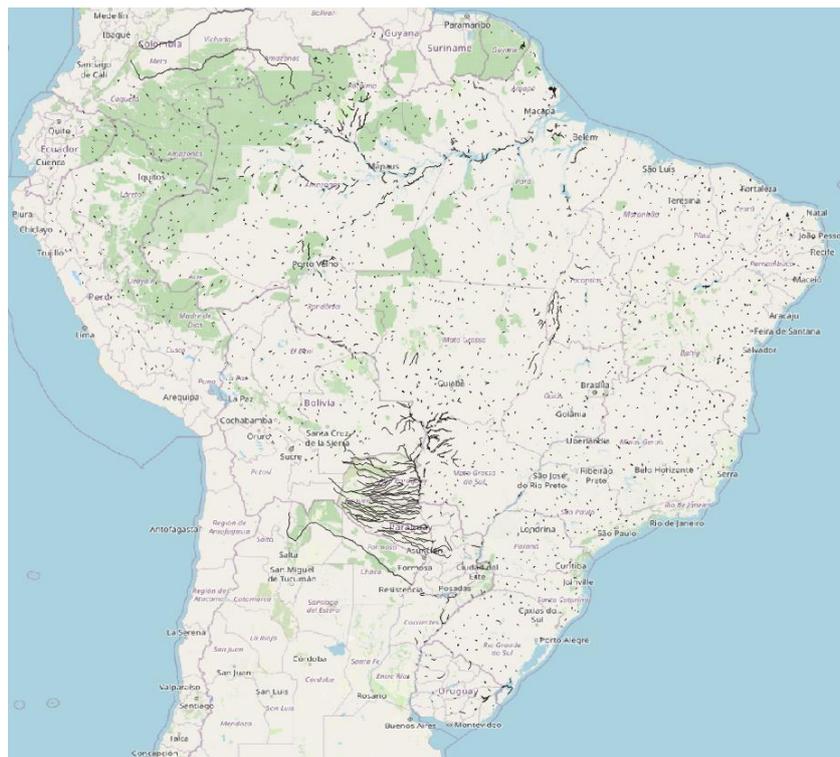


Figura 20. Cobertura da rede BHO categorizada em tipo 4 (preto).



Figura 21. Trechos da BHO não contemplados (em preto) e destaque na região costeira.

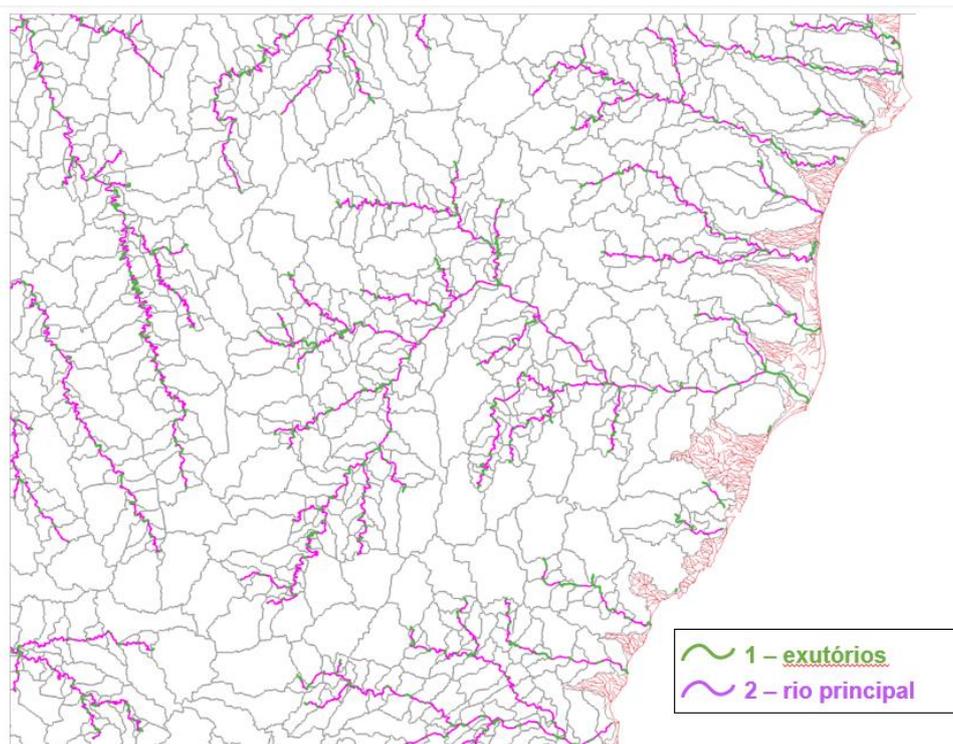


Figura 22. Exemplo de mapeamento de trecho BHO para casos tipo 1 (verde) e tipo 2 (roxo), bem como de trechos na região costeira fora do domínio (vermelho) do MGB-AS (minibacias em cinza).

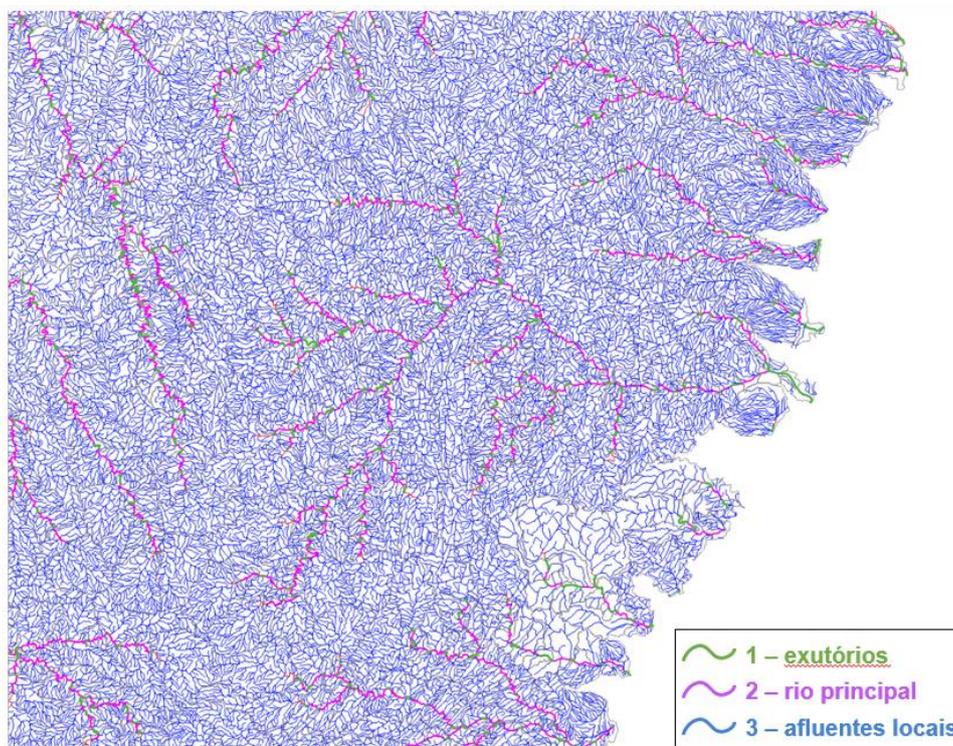


Figura 23. Exemplo de mapeamento de trecho BHO para casos tipo 1 (verde), tipo 2 (roxo) e tipo 3 (azul).

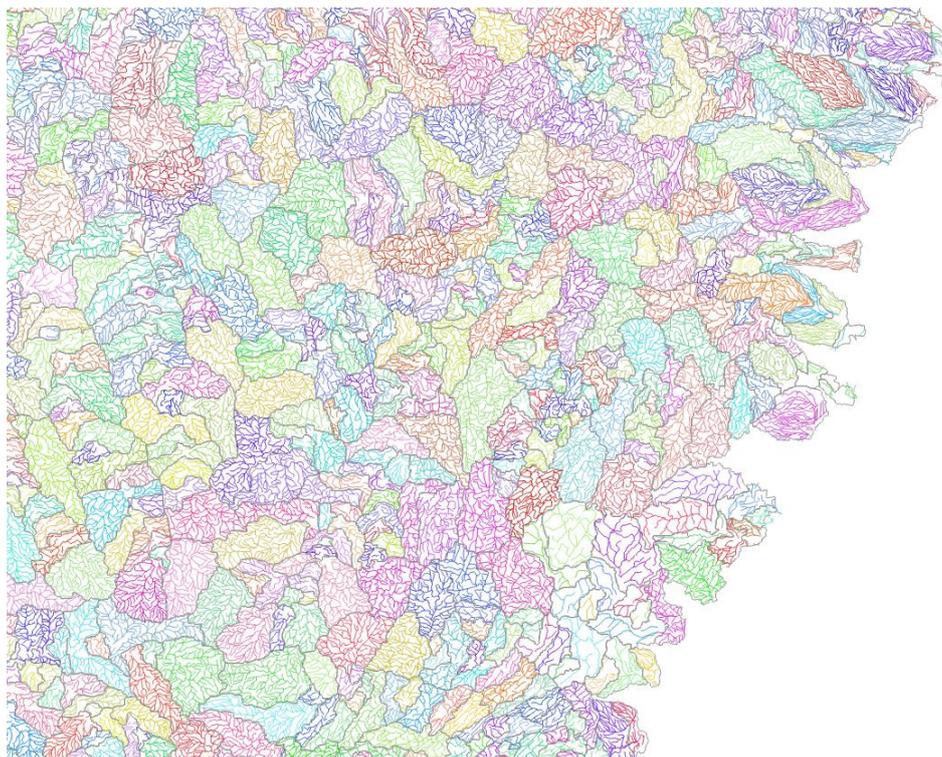


Figura 24. Exemplo de mapeamento entre minibacia e BHO em tipo 3. Cada polígono representa uma minibacia, para o qual os trechos de contribuição hídrica local da BHO são associados.

6 REPOSITÓRIO COM SCRIPTS PARA DOWNSCALING DE VAZÕES DE REFERÊNCIA DO MGB-AS

Os procedimentos para Downscaling e base de dados preliminar inicialmente desenvolvidos estão documentados no Apêndice A deste documento.

A versão mais atual (e futuras atualizações) dos scripts para realização do processo de transferência de vazões do MGB para BHO, a posteriori, ou seja, pelo método de Downscaling estão disponíveis em repositório público no GitHub e com link via site do Grupo de Pesquisa em Hidrologia de Grande Escala, conforme descrito a seguir.

Nesse repositório existem os scripts com os procedimentos e funções comentadas, bem como as orientações para execução deles, escritos em linguagem python.

<https://github.com/minovsor/mgb-bho-ds>

<https://www.ufrgs.br/hge>

7 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos conclui-se que o método de Downscaling pode ser aplicado para extrair vazões de referência a partir do MGB-AS de forma relativamente eficiente. Entretanto, cabe ressaltar que o método aqui apresentado possui algumas limitações importantes. Considerando as características da rede BHO e das minibacias / trechos do MGB-AS (na sua versão atual), entende-se que o downscaling é uma solução aproximada para geração de vazões de referência em toda a base BHO. A maior parte da rede (86,1 %) foi resolvida com a solução do tipo 3 baseada em vazão específica para a transferência, a qual considera que a geração de escoamento na escala da minibacia ocorre de forma homogênea. É importante reforçar também que o Downscaling do MGB-AS não engloba totalmente o domínio da BHO apesar do percentual relativamente alto de resolução da rede (97,3 % dos trechos), sendo que os trechos não solucionados ocorrem tipicamente em regiões costeiras com menos de 1000 km².

Outra limitação do método é a não garantia completa da continuidade de vazões após a transferência. Na interface entre as soluções do tipo 1 e 2 é esperado que a transferência de vazões tenha uma transição com maior coerência física. Em locais, com solução tipo 4, em locais com menor concordância entre as redes de drenagem do MGB-SA e BHO, pode ser possível que ocorram de trechos de jusante com vazão de referência menor que o de montante, ou alguma variação brusca na vazão com pouco acréscimo de área de contribuição. Assim, é recomendado ter em conhecimento o tipo de solução ao utilizar as vazões de referência transferidas do MGB-AS para a BHO através do método de downscaling aqui apresentado.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS E BASE DE DADOS PRELIMINAR

Esse apêndice resgata as seções descritas nos estudos e relatórios iniciais do subprojeto “Regionalizações de vazões via modelagem hidrológica”, no contexto do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, no que diz respeito ao detalhamento dos procedimentos de Downscaling. Os procedimentos iniciais em QGIS e MATLAB foram atualizados para operação via linguagem python.

7.1 PROCEDIMENTOS PARA DOWNSCALING

O procedimento para transferência de resultados do MGB-SA para a BHO inicialmente desenvolvido foi realizado três etapas principais:

- Preparação da base de dados do MGB-SA e da BHO
- Elaboração da tipologia de casos na BHO e preparação de parâmetros de solução
- Transferência de vazões

Obviamente, para realizar a análise de compatibilidade e extrair as relações entre as bases hidrográficas do MGB-SA e da BHO é necessário base topológica e as vazões simuladas do MGB-SA. Tipicamente, os projetos de simulação do MGB-SA possuem essa informação em um arquivo com dados ASCII em linhas e colunas, denominado mini.gtp. Para facilitar a leitura dos dados em matrizes e/ou dataframes, os mesmos dados foram armazenados em formato compatível com MS Excel, tendo assim o arquivo mini.xlsx. A Figura 25 apresenta alguns dos atributos que estão nesse arquivo, destacando os identificadores de minibacia (mini) e a conexão da rede para jusante (minijus), estimativas da área local e de montante e a numeração de ordem da drenagem. Os arquivos de saída do MGB-SA necessários para transferência possuem as vazões simuladas nos exutórios de cada minibacia e também as vazões de contribuição local (i.e. runoff) de cada minibacia (Tabela 2).

Mais detalhes sobre os arquivos do MGB-SA foram relatados nos manuais de capacitação do projeto, seja na “Apostila 1 – Manual de Aplicação do MGB (Interface)”, “Apostila 4 – Guia prático do Código-Fonte MGB” e “Apostila 5 - Manual Básico do MGB-AS”. No que diz respeito as bases da BHO, o processo utiliza as tabelas de dados e geometrias associadas aos trechos de drenagem e de área de contribuição hídrica.

Mini	Area_(km2)	AreaM_(km2)	MiniJus	Ordem
1	1030.58007	1030.58007	4776	1
2	1866.0883	1866.0883	4777	1
3	1221.0347	1221.0347	4778	1
4	1576.83579	1576.83579	4779	1
5	1311.34061	1311.34061	4780	1
6	1096.23763	1096.23763	4781	1
7	1084.6087	1084.6087	4782	1
8	1683.29397	1683.29397	4783	1
9	1159.83633	1159.83633	4784	1
10	1075.85365	1075.85365	4785	1
11	1241.23986	1241.23986	4786	1
12	1309.93269	1309.93269	4787	1

Figura 25. Exemplo de informações topológicas do MGB no arquivo mini.xlsx

Tabela 2. Base de dados do MGB e BHO utilizados no processo de transferência.

Descritivo	Arquivo	Formato
Topologia da rede MGB-AS	mini.xlsx	Excel
Vazões simuladas nos exutórios	QTUDO.BIN	Binário
Vazões simuladas de runoff local	QITUDO.BIN	Binário
Minibacias do MGB	MGB_SA_UnitCatchments.shp	Shapefile
Rede de drenagem BHO5K2017	geoft_bho_2017_5k_trecho_drenagem.gpkg	GeoPackage
Áreas de contribuição hídrica BHO5K2017	geoft_bho_2017_5k_area_drenagem.gpkg	Geopackage

Script de transferência MGB-SA para BHO:

Inicialmente o script para transferência de vazões entre as duas bases foi elaborado em diferentes linguagens. Todos os códigos necessários para geração da tabela do tipo 1 foram desenvolvidos em Matlab, que podem ser processados alternativamente via Octave (através do link: <https://www.gnu.org/software/octave/index>) que é um software de uso livre. Basicamente, o Octave é uma linguagem de alto nível que acompanha uma interface com linha de comando para resolução de problemas lineares e não-lineares, e para realizar outros experimentos de cálculo usando uma linguagem que é amplamente compatível com Matlab. Apesar das vantagens de software livre, o processamento do script através do Octave tende a ser consideravelmente menos eficiente que no Matlab.

O código para geração da tabela nível 1 foi escrito de forma sequencial e possui 3 funções adicionais, relacionadas à 1) busca de conectividade montante-jusante via análise de código otto; 2) teste de código otto propriamente dito e; 3) teste de diferença de área aceitável entre MGB e BHO. Este código precisa ser rodado apenas quando ocorrem modificações na rede BHO

ou na estrutura de minibacias do MGB-SA (e.g., em caso de atualizações). Portanto, a tabela 1 já processada no contexto deste trabalho pode ser lida diretamente pelos scripts das etapas subsequentes. As etapas de processamento posteriores a elaboração da tabela de relacionamento tipo 1 foram desenvolvidos em scripts na linguagem python (3.7.x), em ambiente virtual compatível com gerenciador de pacotes conda (encontrado no link: <https://docs.conda.io/en/latest/>), sendo as bibliotecas instaladas a partir de repositórios amplamente reconhecidos (e.g. anaconda, conda-forge).

A biblioteca padrão do python fornece estruturas de dados do tipo dicionário (“memória associativa”) que permite o armazenamento de conjuntos não-ordenados de pares (*chave:valor*). A utilização de dicionários facilita a inserção e consulta dos valores de dados, bem como o tratamento de informações encadeadas. Dessa forma, é possível utilizar dicionários com chaves baseadas em *cotrechos* e/ou *minibacias*, o que é bastante conveniente. Além disso, o valor armazenado pode ser qualquer tipo de objeto. Por fim, o armazenamento em disco rígido foi realizado em formato pickle (link: <https://docs.python.org/3/library/pickle.html>) devido ao baixo consumo de memória (e.g. binário), facilidade de leitura e troca de informação entre scripts. Em geral, as estruturas adotadas para os dicionários possuem dados simples, que podem ser adaptados e serializados também em formato JSON. A Tabela 3 descreve um conjunto de dicionários que são gerados e utilizados na transferência de vazões. Em geral, a maior parte deles pode ser convertido em tabela.

Tabela 3. Descrição de dicionários gerados e armazenados

Descritivo	Dicionário	Chave	Valor
Relação Tipo 1 ^a	dict_bho_mini_n1	cotrecho	minibacia
Relação Tipo 2	dict_bho_mini_n2	cotrecho	minibacia
Relação Tipo 3 ^a	dict_bho_mini_n3	cotrecho	minibacia
Relação Tipo 4	dict_bho_mini_n4	cotrecho	minibacia
Tipo de solução ^b	dict_bho_solucoes	cotrecho	1, 2, 3, 4, null
Parâmetros Tipo 1 ^c	-	-	-
Parâmetros Tipo 2 ^b	dict_bho_parametros_n2	cotrecho	dicionário
Parâmetros Tipo 3 ^c	-	-	-
Parâmetros Tipo 4 ^b	dict_bho_parametros_n4	cotrecho	dicionário
Afluentes Tipo 2	dict_mini_afl_n2	mini	lista de cotrechos
Caminhos Tipo 2	dict_caminhos_n2	cotrecho	lista de cotrechos
^a Dicionários de índices utilizados no processo de transferência			
^b Dicionários de parâmetros utilizados no processo de transferência			
^c Dicionários ainda não elaborados, pois os parâmetros são contemplados em ^a			

Além disso, foram utilizados alguns recursos de bibliotecas populares e consolidadas para o processamento de dados em tabelas e análises espaciais, tais como o pandas (<https://pandas.pydata.org/>) e geopandas (<https://geopandas.org/index.html>), facilitando a interação com bases utilizadas em Sistemas de Informação Geográfica. Assim, um geodataframe com dado da BHO pode ser interpretado em termos de atributos em tabela, mas também pelos objetos geométricos (pontos, arcos, polígonos). Da mesma maneira, o procedimento em python permite automatizar processos tipo de agregação e tabelas (e.g. similar a cláusula JOIN em SQL) e de gravação de resultados em geodataframe, em disco. A Tabela 4 descreve um resumo das linguagens e estruturas de dados principais utilizados nos procedimentos, até o momento.

Tabela 4. Visão geral de linguagens e estruturas de dados nos procedimentos

Procedimento	Linguagem	Processamento	Saídas	Opcionais
Pré-processamento	QGIS/Python	GeoDataframe	Tabela*	
Relacionamento Tipo 1	MATLAB/Python 3	Matricial	Tabela	
Relacionamento Tipo 1, 2, 3	Python 3**	Dicionários Dataframes GeoDataframes	Dicionários***	Geopackage
Relacionamento Tipo 4	Python 3**	Dicionários Dataframes GeoDataframes	Dicionários	Geopackage
Transferência MGB-BHO	Python 3**	Binários MGB Dicionários Dataframes GeoDataframes	Tabela	Geopackage
<p>* Tabelas compatíveis com MS Office (xlsx). Os procedimentos iniciais em QGIS e MATLAB foram atualizados para python 3</p> <p>** Bibliotecas padrão + pandas + geopandas (e dependências)</p> <p>*** Formato pickle</p>				

Consulta de dados em dicionários

Conforme descrito, o armazenamento das relações entre BHO e MGB foi realizado com estrutura de dados não-ordenado (i.e. dicionários), embora sejam simples o suficiente para converter em tabela.

Dessa maneira, para identificar o tipo de solução que precisamos utilizar em um determinado *cotrecho*, uma consulta a chave *cotrecho* pode ser realizada em python, por exemplo, das seguinte maneiras, por exemplo:

```
tipo = dict_bho_solucoes.get(cotrecho)
```

ou,

```
tipo = dict_bho_solucoes[cotrecho]
```

De maneira similar, a consulta da *minibacia* associada a um *cotrecho* pode ser obtido por:

```
minibacia = dict_bho_mini.get(cotrecho)
```

Para esses dois exemplos, o procedimento também poderia ser realizado em estrutura de tabular sem dificuldades. Por outro lado, os dicionários flexibilizam o armazenamento de estruturas mais complexas, tais como listas de tamanho variável, como é o caso do número de minibacias a montante e parâmetros de cada tipo de solução. Assim, o processo de registro e consulta a parâmetros diferentes, para soluções diferentes é realizado, sem necessidade de definir uma tabela fixa ou criar uma classe nova.

A Figura 26 demonstra, por exemplo, como o armazenamento de parâmetros para soluções do tipo 2 fica amigável, pois uma lista de afluentes a montante (*mini_mon*) pode conter quantos itens forem necessários. A redundância de *cotrecho* facilita o processo de extração e serialização em formato JSON ou busca em javascript, se necessário. Para esse tipo de caso, a consulta de parâmetros para tipo 2, pode ser realizada de maneira similar ao seguinte:

```

info = dict_bho_parametros_n2.get(cotrecho)
    mini_ref = info.get('mini_ref')
    mini_mon = info.get('mini_mon')
    fracao_area = info.get('fracao_area')

```

```

351155: {'cotrecho': [351155],
'mini_ref': [4851],
'nuareamont': [1918.7836781404442],
'fracao_area': [0.2856964291154218],
'mini_mon': [79]},
29073: {'cotrecho': [29073],
'mini_ref': [4852],
'nuareamont': [1280.7079801976488],
'fracao_area': [0.12624146852390952],
'mini_mon': [80]},
...})
80746: {'cotrecho': [80746],
'mini_ref': [14293],
'nuareamont': [3232.047457533381],
'fracao_area': [0.07605303240605242],
'mini_mon': [4579, 11998]},
60111: {'cotrecho': [60111],
'mini_ref': [14293],
'nuareamont': [3623.176171610987],
'fracao_area': [0.8993939590733413],
'mini_mon': [4579, 11998]},
...}

```

Figura 26. Exemplo de dicionário de parâmetros tipo 2 onde 'mini_mon' contém uma lista de minibacias a montante do trecho, para casos com afluente único (esquerda) e mais de um afluente (direita).

7.2 BASES DE DADOS PRELIMINAR

A base de dados preliminar de vazões transferidas do MGB-SA para BHO foi desenvolvida e será descrita no relatório referente às atividades da “Etapa 4 – Transferência do MGB para BHO”. Para tanto, um processo de Downscaling foi aplicado nas vazões simuladas referente à rodada de retrospectiva hidrológica do MGB-AS, período entre 1/1/1980 e 31/12/2014, sem assimilação de dados. Trata-se de um arquivo geopackage (.gpkg) na mesma base dos trechos de drenagem da BHO5k2017, com atributos (ou campos) de vazões de referência (m^3/s), sendo a vazão média e a Q95 e, respectivas vazões específicas ($m^3/s.km^2$).

A Figura 27 ilustra parte da tabela de atributos, sendo cada linha associada a um *cotrecho* da BHO. Por fim, a Figura 28. Mapa preliminar da Q95 específica ($m^3/s.km^2$) na base BHO obtido por downscaling apresenta um mapa dos resultados da transferência para a Q95 específica ($m^3/s.km^2$), enquanto a Figura 29. Mapa preliminar da vazão média específica ($m^3/s.km$) na base BHO obtido por Downscaling demonstra o mapa da vazão média específica (m^3/s), obtidos pelo método de transferência de Downscaling.

mini_t1	mini_t2	mini_t3	mini_t4	tipo	q95	qmedia
NULL	NULL	2	NULL	3	0.458098117450...	1.257844867737...
NULL	NULL	2	NULL	3	0.184081415746...	0.505450372358...
NULL	21919	NULL	NULL	2	28.44306696862...	116.2709552115...
NULL	8873	NULL	NULL	2	11.68758348012...	50.00637574818...
NULL	NULL	358	NULL	3	1.378804463537...	6.222602571454...
20029	NULL	NULL	NULL	1	27.11716327667...	111.7880477905...
NULL	23982	NULL	NULL	2	33.26856677042...	132.3377388265...
NULL	18875	NULL	NULL	2	22.49705918247...	93.6927533718212
NULL	27146	NULL	NULL	2	45.88768727108...	180.3078968835...
NULL	NULL	16620	NULL	3	0.224561490474...	1.761234824898...
NULL	5129	NULL	NULL	2	11.17447627560...	47.4231704676416
11787	NULL	NULL	NULL	1	13.78314256668...	59.32376098632...
NULL	21027	NULL	NULL	2	27.19873896801...	112.0634183466...
NULL	8873	NULL	NULL	2	11.69542710201...	50.044858213486
NULL	22683	NULL	NULL	2	30.98953170822...	124.9036493929...
NULL	5129	NULL	NULL	2	11.17866724508...	47.44468810148...
NULL	20383	NULL	NULL	2	39.99322985903...	215.7450604564...

Figura 27. Reprodução parcial da tabela de atributos da base de dados preliminar

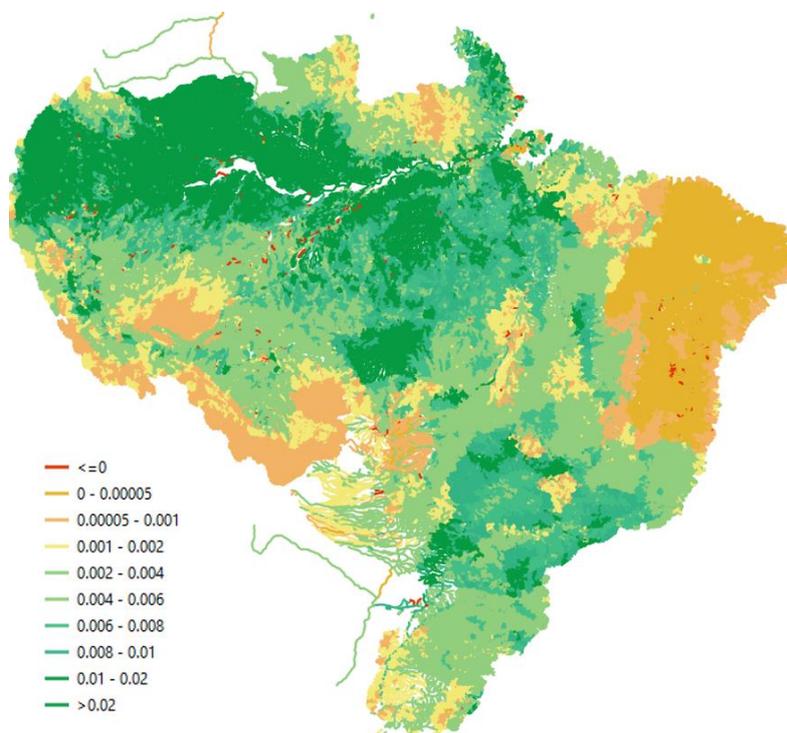


Figura 28. Mapa preliminar da Q95 específica ($m^3/s.km^2$) na base BHO obtido por downscaling

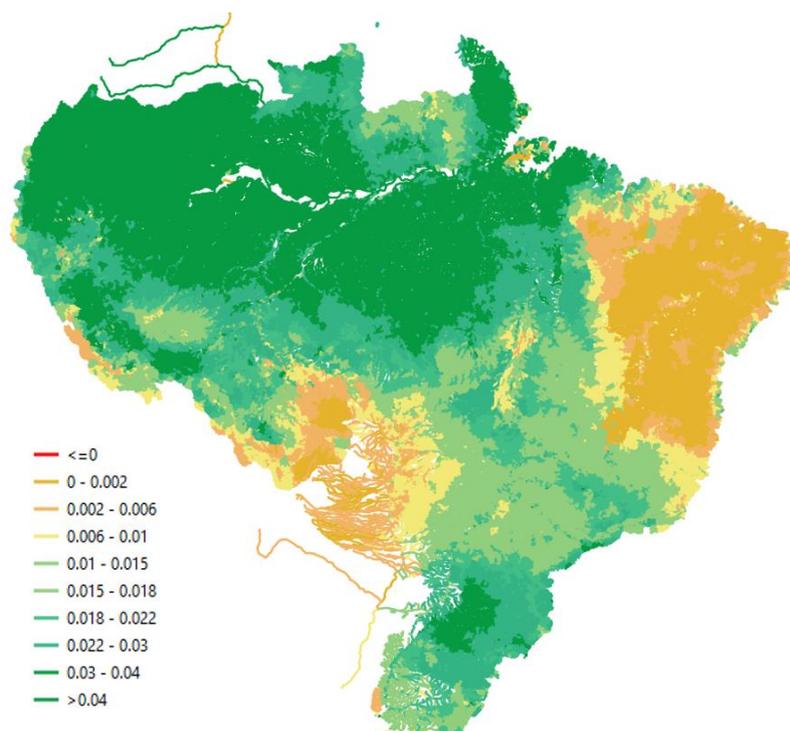


Figura 29. Mapa preliminar da vazão média específica ($m^3/s.km$) na base BHO obtido por Downscaling

7.3 ALGORITMO DE TRANSFERÊNCIA TIPO 1

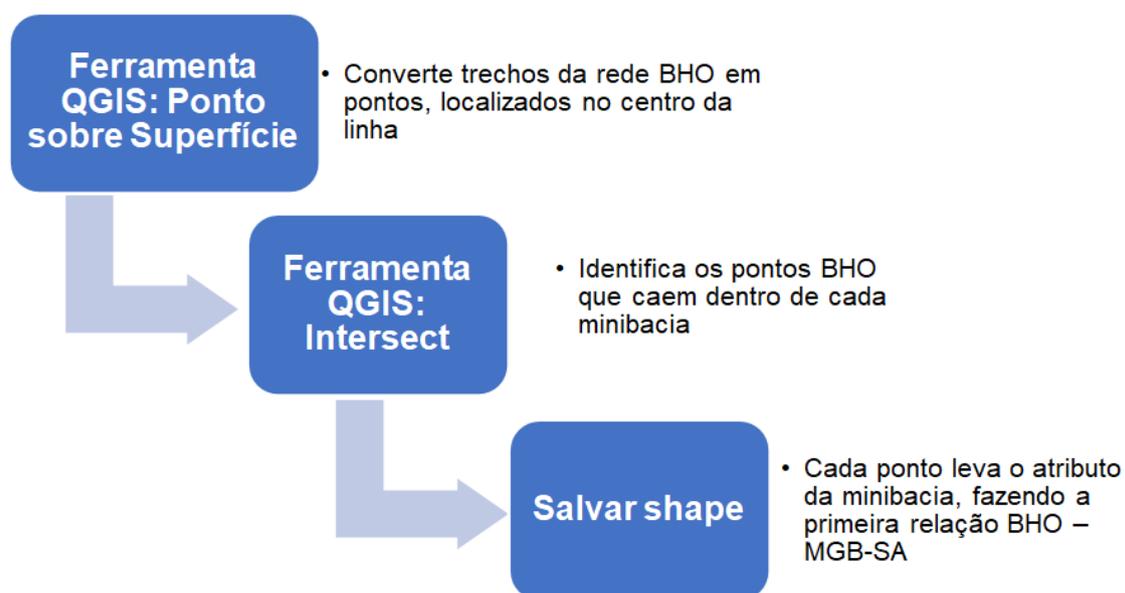
Nessa seção apresentamos o algoritmo da transferência Tipo 1 entre as bases BHO e MGB-AS. O método de transferência Tipo 1 consiste em selecionar um ponto BHO (cotrecho) para cada minibacia do modelo de maneira que possa haver atribuição direta da vazão do exutório da minibacia para os cotrechos selecionados. Dessa forma, o algoritmo busca os pontos BHO que mais se adequam, denominados candidatos.

Esse algoritmo teve várias condicionantes o que o tornou um pouco mais extenso que os demais. É importante ter conhecimento detalhado do procedimento para total compreensão das soluções e propostas adotadas e a abrangência da sua capacidade de resolução.

O algoritmo pode ser dividido em 4 etapas bem distintas: a) etapa prévia de geoprocessamento; b) proposta inicial de pontos BHO candidatos; c) revisão dos pontos indicados; d) atribuição final de candidatos. Esse algoritmo é apresentado a seguir através de fluxogramas explicativos.

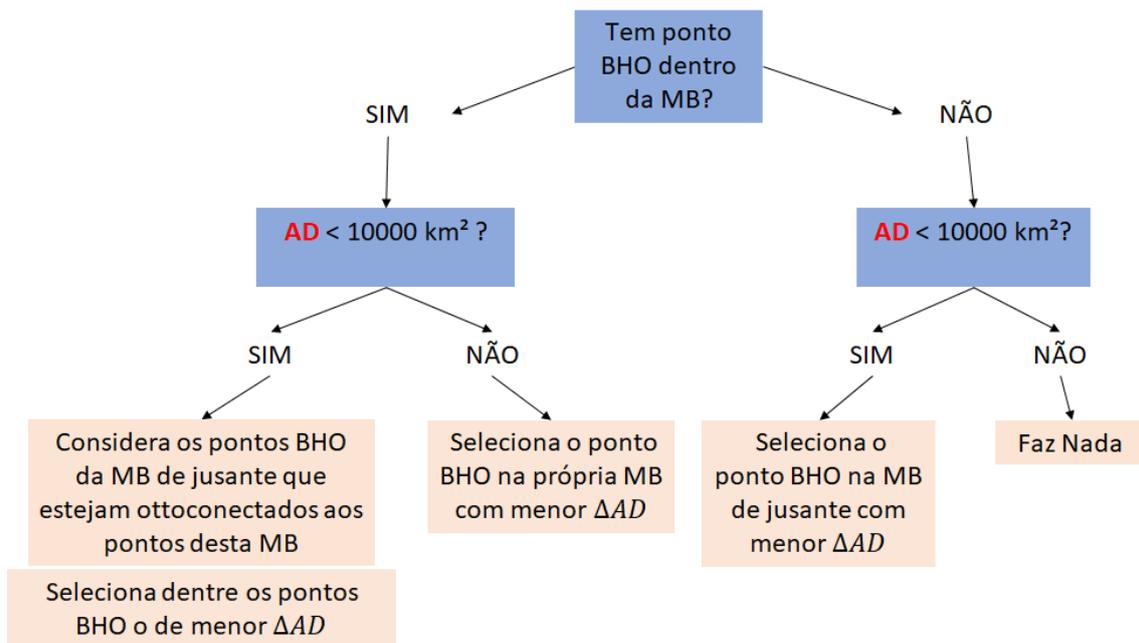
A) Etapa de Geoprocessamento:

Nessa etapa utilizamos o arquivo da rede de drenagem da BHO5k2017 para conseguir fazer uma primeira relação entre com o MGB-AS.



B) Proposta Inicial de Pontos BHO candidatos

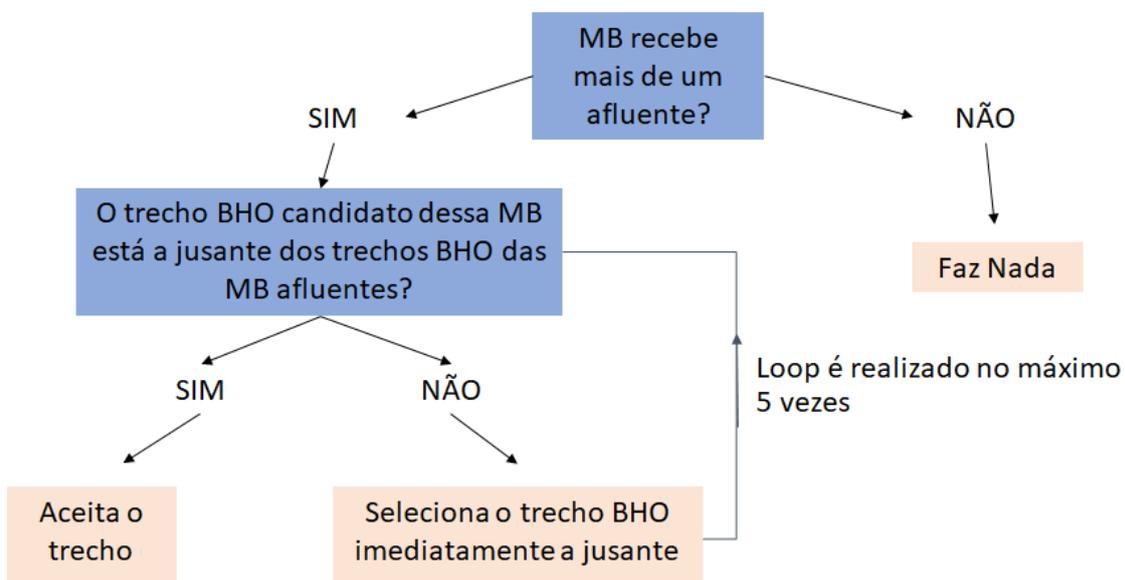
Essa etapa permite indicar os primeiros candidatos. Basicamente serão considerados possíveis candidatos para uma determinada minibacia todos os pontos BHO dentro dela e os pontos BHO também na minibacia de jusante (caso ela tenha menos que 10.000 km² de área de drenagem acumulada). No entanto são avaliados apenas os pontos BHO que tem área de drenagem maior que 800 km² pois esses têm dimensões compatíveis com o MGB-AS. Dentre os possíveis candidatos, escolhemos o que apresenta a menor diferença de área de drenagem acumulada em relação a minibacia.



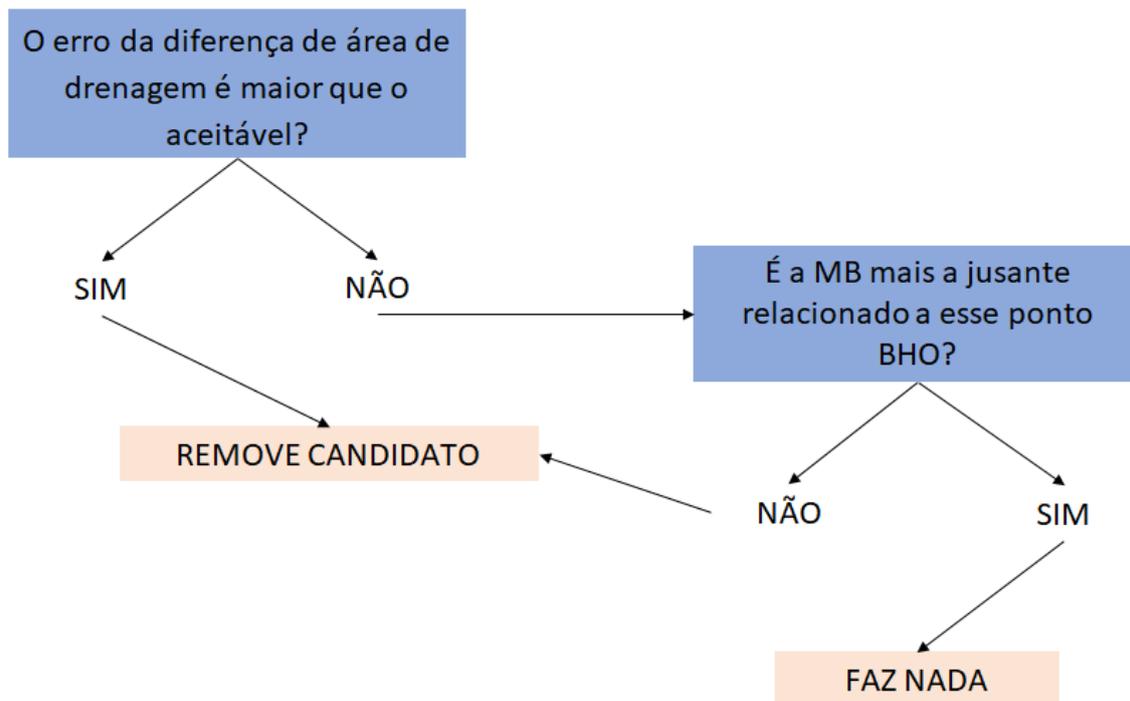
MB – minibacia; AD - área de drenagem; ΔAD - diferença de área de drenagem.

C) Revisão dos primeiros candidatos

Nessa etapa, avaliamos se os pontos BHO indicados na etapa anterior são coerentes. Primeiro avaliamos se eles têm sentido topológico através de atributos da rede BHO como *nutrjus*. Tendo esse atributo podemos avaliar se o candidato escolhido está à jusante dos trechos BHO das minibacias de montante.



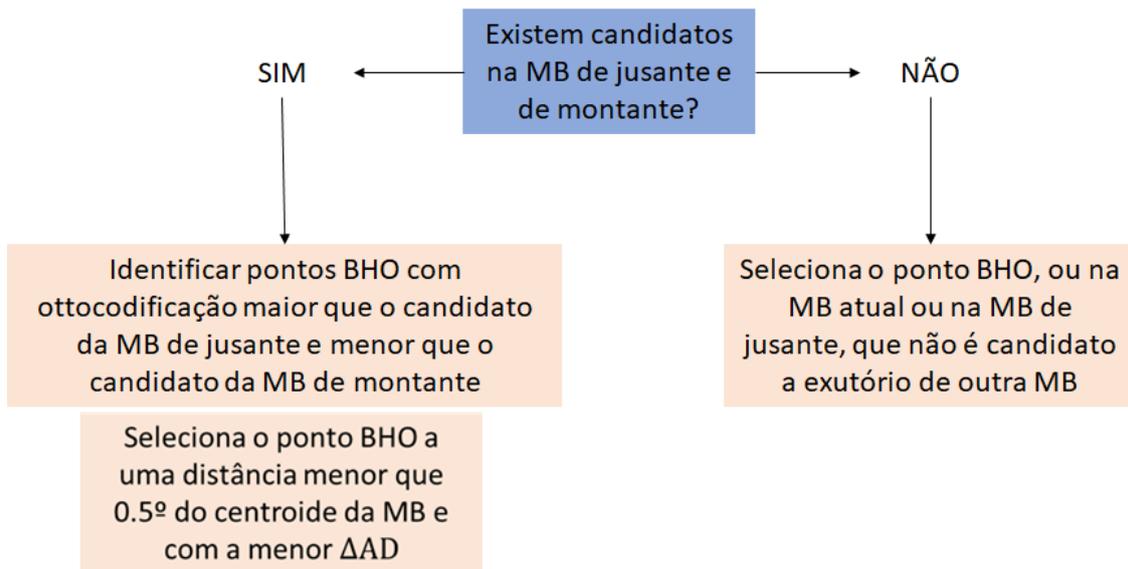
Em seguida fazemos avaliações para detectar se o ponto BHO escolhido ainda tem uma diferença de área de drenagem muito grande em relação à minibacia atribuída. Além disso, como é permitido escolher pontos BHO nas minibacias de jusante, algumas vezes um mesmo ponto BHO é o candidato de duas minibacias diferentes. Isso é algo inaceitável para os próximos passos da transferência (tipos 2 e 3). Logo também readequamos candidatos de multi minibacias dando preferência a minibacia mais de jusante.



Faixa de AD (km ²)	Erro AD aceitável
1000 - 1500	30,0%
1500 - 3000	25,0%
3000 - 5000	20,0%
5000 - 10000	15,0%
10000 - 20000	10,0%
20000 - 50000	7,0%
50000 - 200000	5,0%
200000 - 500000	3,0%
500000 - 1000000	2,0%
> 1000000	1,5%

D) Atribuição Final de Candidatos

Nesse momento, a grande parte das minibacias no Brasil hidrológico já tem candidatos coerentes. Porém, na etapa C) algumas minibacias perderam seus pontos BHO atribuídos, devido a diferenças muito grandes de área de drenagem, inconsistências topológicas ou candidatos repetidos. Dessa forma foi feito uma nova busca por cotrechos apenas nas minibacias que não possuem candidatos. Essa busca consiste em uma avaliação topológica dos cotrechos de jusante e montante, atendendo uma distância espacial máxima (0,5° ~ 50 km):



Cumprida a etapa D), entendemos que foram efetuadas opções suficientes para compatibilização de grande parte da rede BHO e MGB-AS que é efetuada nas etapas posteriores (Tipo 2 e 3). Embora ainda existam inconsistências, elas não são todas solucionáveis devido a algumas incompatibilidades entre as redes conforme as comparações entre a rede do MGB-AS e da BHO já descritas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Siqueira V.A. (2020): Curso de capacitação tecnológica com o modelo MGB para aplicações e desenvolvimento. Apostila 5 - Manual básico de MGB-AS. 51p.

Siqueira, V. A., Fleischmann, A., Jardim, P. F., Fan, F. M., & Collischonn, W. (2016): IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. RBRH, 21(1), 274-287.