

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

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

**MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO DO MODELO
MGB E SUA RELAÇÃO COM A BHO**

IPH-ANA-HGE-SR-T1

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Métodos de discretização do modelo MGB e sua relação com a BHO



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: Walter Collischonn, Mino Viana Sorribas, Cléber Henrique de Araújo Gama, Rafael Barbedo, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

COMO CITAR: Collischonn, W., Sorribas, M. V., Gama, C. H. de A., Barbedo, R., Paiva, R. C. D., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Métodos de discretização do modelo MGB e sua relação com a BHO: IPH-ANA-HGE-SR-T1. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Sumário

1	Apresentação	4
2	Introdução	4
3	Métodos de discretização do MGB	7
3.1	Discretização em células quadradas	8
3.2	Discretização ArchHydro	9
3.3	Discretização com trechos de comprimento constante	11
3.4	Comparação entre os métodos de discretização do MGB	14
3.5	A Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA	17
4	Referências Bibliográficas	18
	Apêndice	22
	Algoritmo de transferência tipo 1	22

1 APRESENTAÇÃO

O presente documento é um relatório parcial de andamento sobre a transferência de dados entre o modelo MGB e a Base Hidrográfica Otocodificada (BHO), no contexto das atividades do Termo de Execução Descentralizada (TED) de cooperação técnica entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas (ANA) para o desenvolvimento e aplicação de ferramentas e técnicas para estudo de hidrologia em escala nacional no Brasil.

O projeto TED mencionado 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.

A Meta 2 do projeto TED (Etapa 4 do subprojeto Regionalização) prevê o desenvolvimento de um “Método transferência MGB para BHO ANA”. Esta etapa do projeto é de certa forma independente, podendo também ser utilizada nos outros subprojetos. A transferência de resultados do MGB se faz necessária porque, em geral, a discretização da bacia hidrográfica adotada até o momento no modelo MGB - incluindo o modelo MGB desenvolvido para a América do Sul que serve de base para o projeto TED - é diferente da divisão da rede de drenagem em trechos adotada na elaboração da Base Hidrográfica Otocodificada (BHO), que é a referência para estudos na ANA. Neste documento são apresentados os métodos historicamente adotados para discretização de bacias em aplicações do modelo MGB, e são discutidas as semelhanças e diferenças com a BHO que são pertinentes para conceber um processo de transferência de informação entre a duas bases.

Em relatórios seguintes, são descritas duas metodologias para transferência de dados entre o modelo MGB e a base de dados BHO. Uma metodologia baseada na transferência dos resultados depois da aplicação do modelo MGB, descrita no relatório IPH-ANA-HGE-SR-T2, e outra metodologia baseada na adoção da BHO no pré-processamento do modelo MGB, descrita no relatório IPH-ANA-HGE-SR-T3.

2 INTRODUÇÃO

Na gestão de água e nos estudos de hidrologia frequentemente é necessário adotar uma forma de subdividir, de forma organizada, a área ou a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica, ou de uma grande região hidrográfica, em elementos menores capazes de representar a heterogeneidade dos dados ou dos processos relevantes. Diversas abordagens têm sido utilizadas para isto, sendo que os critérios de ordenamento e hierarquização de trechos da rede de drenagem desenvolvidos por Horton e Strahler, foram propostos na primeira metade do século XX e se tornaram bastante conhecidos. Conforme descrito por Teixeira (2012), trabalhos de Jackson e Gravelius, em 1894 e 1914, respectivamente, remetem esforços dentro desse

contexto. No cenário nacional, temos a metodologia desenvolvida por Otto Pfafstetter (1989) e os aprimoramentos apresentados por Teixeira (2012).

Na modelagem hidrológica há inúmeras formas propostas de subdivisão da bacia hidrográfica. Paz et al. (2011), por exemplo, identificaram três métodos principais de subdivisão de bacias: 1) em células regulares; 2) em quadtree (células internas em quadrantes); 3) em mini-bacias definidas pelas confluências da rede de drenagem. Estas formas de subdivisão da bacia hidrográfica são ilustradas na Figura 1. Além dos métodos identificados por Paz et al. (2011), outros autores, como Rennó e Soares (2001) descrevem ainda distintos métodos para subdivisão da bacia hidrográfica em modelos hidrológicos, incluindo TIN (Triangular Irregular Network) e polígonos definidos a partir das curvas de nível. Cada um dos métodos apresenta vantagens e desvantagens na aplicação de modelos hidrológicos.

Na gestão de águas o problema da subdivisão de uma rede hidrográfica ou de uma bacia hidrográfica também aparece frequentemente, e uma das metodologias mais adotadas tem sido a divisão baseada em confluências (ou junções de rio) identificadas na rede de drenagem. Esta metodologia é adotada, por exemplo, na metodologia ArcHydro (Maidment, 2002) e na metodologia de Otto Pfaffstetter (Pfaffstetter, 1989; Verdin e Verdin, 1999; Teixeira, 2012).

Na metodologia do ArcHydro a rede de drenagem é definida a partir do processamento de um MDE, considerando que pertencem à rede de drenagem todas as células do MDE em que a área de drenagem supera um determinado limiar previamente definido, de forma relativamente arbitrária (Sorribas et al., 2011; Fan et al. 2013). Uma vez definida a rede de drenagem, no método de subdivisão do ArcHydro são definidos os trechos de rio, que são segmentos da rede de drenagem localizados entre duas confluências topologicamente sucessivas, ou segmentos de cabeceira, que iniciam no ponto em que a área de drenagem supera o limiar e estendem-se até a primeira confluência. Finalmente, a bacia é dividida identificando a área que drena para cada um dos segmentos ou trechos de rio, conforme ilustrado na Figura 1.

Na metodologia de Otto Pfaffstetter a subdivisão também é realizada com base na rede de drenagem e na localização das confluências, entretanto é adotado um método de codificação que considera a topologia e o tamanho da área de drenagem do rio e de seus tributários. A codificação resultante permite inferir, a partir do código de um trecho de rio, a sua posição relativa em relação a outro trecho qualquer, dispensando consultas a mapas ou a funções de um SIG (Verdin e Verdin, 1999; Fürst e Hörhan, 2009; Stein, 2018).

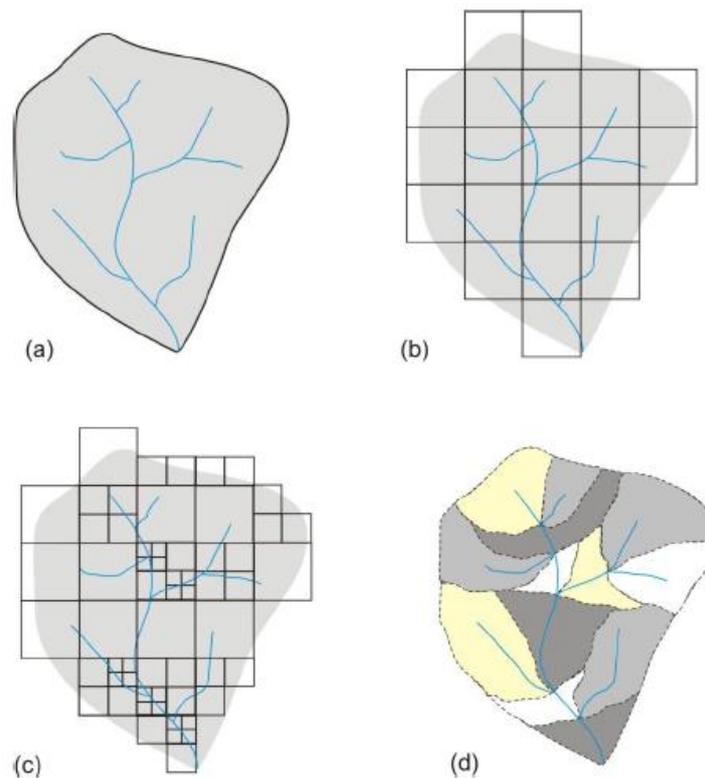


Figura 1. A bacia hidrográfica (a) e os métodos para subdivisão identificados por Paz et al. (2011): (b) células regulares; (c) quad-tree; (d) mini-bacias definidas pelas confluências da rede de drenagem.

Ao longo das últimas duas décadas o método de Otto Pfaffstetter passou a ser largamente utilizado em todo o mundo (Stein, 2018). No Brasil, a metodologia de Otto Pfaffstetter é adotada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos como instrumento de referência na Política Nacional de Recursos Hídricos (Teixeira et al., 2007). Nesse sentido, Teixeira (2012) aprimorou a ottocodificação integrando uma inteligência hidrográfica em base hidrológicamente consistente, numa plataforma de bancos de dados geográficos. É possível destacar a importância desse trabalho para a padronização e disseminação de informações dentro do SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A inclusão de uma linha costeira de referência, bem como a inclusão de relações topológicas (montante-jusante) e critérios para tratamento confluências múltiplas e enlaces (e.g. ilhas) trouxe vantagens para o processo de cartografia nacional.

A subdivisão de uma bacia hidrográfica em bacias menores, definidas por confluências, seja utilizando o método de Otto Pfaffstetter ou o método do ArcHydro, pode ser adotada como forma de discretização de modelos hidrológicos distribuídos. No caso específico do modelo hidrológico MGB, a discretização da bacia em minibacias, definidas com base na área de contribuição direta aos trechos de rio entre confluências da rede de drenagem, passou a ser utilizada a partir de 2006 (Collischonn et al., 2011; Paiva et al., 2011), em substituição à metodologia anterior, em que a bacia era subdividida em células quadradas (Collischonn e Tucci, 2001; Paz et al, 2011), e se tornou um padrão, por algum tempo.

Entretanto, algumas desvantagens do método de subdivisão do ArcHydro para a modelagem hidrológica começaram a ficar evidentes. Uma das desvantagens identificadas foi a heterogeneidade de tamanho das minibacias geradas. Esta heterogeneidade foi relatada por Paz

et al. (2011) e estaria presente também caso fosse adotado o método de Otto Pfafstetter, conforme estudos citados por Stein (2018).

Do ponto de vista da modelagem hidrológica, esta heterogeneidade do tamanho das minibacias é indesejável. Isto é especialmente verdade no caso do modelo MGB quando é adotado o método inercial de propagação de cheias, uma vez que o tamanho da minibacia tem alguma relação com o tamanho do trecho de rio associado. Em geral, modelos computacionais utilizados na solução de problemas de transporte relacionados a meios fluidos possuem requisitos para obter estabilidade e acurácia apropriados, relacionados a discretização espacial e temporal do sistema em estudo.

No modelo MGB há duas opções disponíveis para a realização dos cálculos da propagação de cheias ao longo dos rios: o método Muskingum-Cunge e o método Inercial. O método Muskingum-Cunge é indiferente à presença de alguns trechos curtos na bacia, mas é pouco adequado em bacias com rios de baixa declividade e grandes áreas inundáveis (Paiva et al., 2013; Pontes et al., 2017). Já o método Inercial, cujo desempenho é igual em bacias montanhosas e muito melhor em bacias planas, tem problemas de baixa eficiência quando existem na bacia trechos de rio muito curtos. Isto ocorre porque o método numérico utilizado no modelo exige que seja cumprida a condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Levy, e isto limita o passo de tempo de cálculo para a integração das equações diferenciais a valores que são proporcionais ao comprimento do menor trecho de rio em toda a bacia. Assim, basta haver um único trecho de rio muito curto em toda a bacia para que o passo de tempo seja realmente pequeno (da ordem de 1 segundo), o que exige muitos passos de integração para finalizar a simulação. Na hidrologia, tipicamente há interesse em simular vários anos ou mesmo décadas, assim o passo de tempo pequeno se torna um limitador relevante na aplicação do modelo.

Alguns experimentos foram realizados para tentar contornar o impacto dos trechos de rio curtos sobre o tempo de propagação e forte demanda computacional, pela adoção de passos de tempo independentes em cada trecho da rede de drenagem (Breda et al., 2017b). No entanto, essa abordagem foi descartada, pois o método se mostrou ineficiente diante de outras opções menos complexas como a paralelização do código do MGB. Neste sentido, buscou-se adotar uma outra alternativa, focando em modificar o processo de discretização espacial. A solução encontrada para permitir a aplicação do modelo MGB com o método Inercial de propagação de cheias, sem aumentar demasiadamente o tempo de processamento, foi a modificação do procedimento de segmentação de minibacias, introduzindo o processo de subdivisão da rede de drenagem em trechos de comprimento constante.

Entretanto, a discretização da bacia hidrográfica com trechos de rio de comprimento constante, descrita mais detalhadamente no item 3.3, resulta numa divisão da rede de drenagem e da bacia hidrográfica que é diferente da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO), adotada pela ANA, apresentada no item 3.5. Neste sentido, se faz necessário o desenvolvimento de métodos para adequar a hidrografia ou transferir resultados de modelos hidrológicos como o MGB para redes hidrográficas de referências para gestão de recursos hídricos como a BHO-ANA.

3 MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO DO MGB

O modelo MGB foi criado, inicialmente, considerando que a bacia seria subdividida em células quadradas regulares (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007). Posteriormente foram

adotados dois métodos diferentes de discretização em mini-bacias: o método de confluências do ArcHydro (Maidment, 2002) e o método de trechos de comprimento constante (Siqueira et al., 2018). Estes métodos são descritos brevemente nos próximos sub-itens, juntamente com alguns comentários sobre suas vantagens e desvantagens.

3.1 DISCRETIZAÇÃO EM CÉLULAS QUADRADAS

Possivelmente a maior parte dos modelos hidrológicos de base física adotam a metodologia de discretização da bacia em uma grade regular, que consiste em dividir a bacia em elementos de iguais dimensões, dispostos na forma de uma grade. A grande vantagem desse método de discretização é, justamente, o formato de matriz ou raster, que facilita o cruzamento com outros planos de informação, já que mapas de tipos de solo ou cobertura vegetal, por exemplo, são tipicamente na forma de imagens raster. Esse formato também facilita a integração em um ambiente de SIG, assim como o acoplamento com modelos atmosféricos, cuja discretização também é em grade. A crescente demanda pelo intercâmbio de informações entre modelos hidrológicos e atmosféricos foi justamente o motivo principal que impulsionou o uso da discretização em grade dos modelos hidrológicos desde a década de 70.

Em modelos hidrológicos de grande escala, a grade de discretização tem resolução espacial inferior àquela do MDE, exigindo uma metodologia de transferência da informação de alta resolução do MDE para a resolução relativamente baixa do modelo (Reed, 2003; Paz et al., 2006; Davies e Bell, 2009; Yamazaki et al., 2009).

A principal desvantagem do método é que a rede de drenagem representada pelo modelo hidrológico é uma simplificação da rede de drenagem real, conforme discutido por Paz et al. (2011), e ilustrado na Figura 2. Esta falta de coesão entre a rede de drenagem real e a modelada inibe a integração do modelo com outras ferramentas de gestão de água, e dificulta a definição de variáveis relevantes para a representação física, com o comprimento e a declividade dos trechos de rio (Paz e Collischonn, 2007). Além disso, existem maiores dificuldades em lidar com a estimativa dos parâmetros e heterogeneidade das características físicas das bacias, uma vez que a superfície continental, diferente de atmosfera, não pode ser facilmente organizada em células regulares (Dehotin e Braud, 2008).

Em função das desvantagens e das dificuldades impostas pela adoção da discretização em células quadradas, esta metodologia deixou de ser usada regularmente no modelo MGB a partir das aplicações do modelo no rio Quaraí (Collischonn et al., 2011) e na Amazônia (Paiva et al., 2011), com exceção de algumas aplicações (Felix e Paz, 2016; Ferreira et al., 2020).

Em um estudo recente na bacia do rio Negro, onde existem grandes extensões de áreas planas inundáveis, a discretização em células quadradas voltou a ser utilizada por Fleischmann et al. (2020) buscando representar especialmente a dinâmica de inundação na região da planície, através da simulação de fluxos de água em múltiplas direções além do sentido montante-justante. Entretanto, a discretização em células quadradas não está entre as opções disponíveis para pre-processamento no conjunto de ferramentas IPH Hydro Tools (Siqueira et al., 2016) e não está incluída na atual versão dos manuais de aplicação do modelo MGB (Alves et al., 2020).

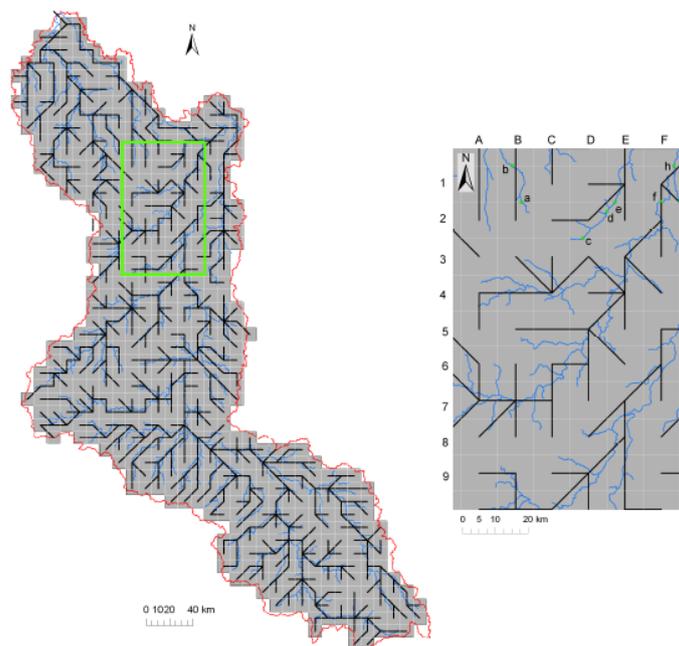


Figura 2. A bacia hidrográfica do rio Ji-Paraná discretizada em células regulares de 0,1 x 0,1 graus e a rede de drenagem resultante (linha preta) comparada com área de drenagem obtida a partir de um MDE de 90 m (linha azul).

3.2 DISCRETIZAÇÃO ARCHYDRO

Na metodologia do ArcHydro (Maidment, 2002) a rede de drenagem é definida a partir do processamento de um MDE, considerando que pertencem à rede de drenagem todas as células do MDE em que a área de drenagem supera um determinado limiar previamente definido, de forma relativamente arbitrária (Sorribas et al., 2011; Fan et al. 2013). Uma vez definida a rede de drenagem, no método de subdivisão do ArcHydro são definidos os trechos de rio, que são segmentos da rede de drenagem localizados entre duas confluências topologicamente sucessivas, ou segmentos de cabeceira, que iniciam no ponto em que a área de drenagem supera o limiar e estendem-se até a primeira confluência. Finalmente, a bacia é dividida identificando a área que drena para cada um dos segmentos ou trechos de rio, conforme ilustrado na Figura 3.

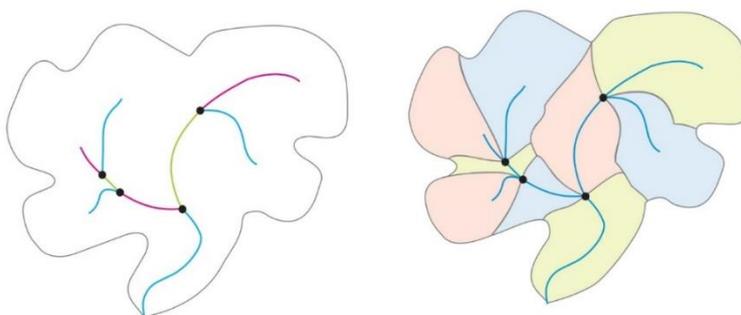


Figura 3. Esquema do método de discretização do ArcHydro: a) identificação de confluências (pontos) e definição de trechos (segmentos da rede de drenagem entre os pontos); b) definição das áreas de contribuição a cada um dos trechos individualizados.

A vantagem de adotar o método do ArcHydro para discretizar bacias em modelos hidrológicos é que a rede de drenagem final é coerente com a rede de drenagem real, desde que o MDE hidrológicamente consistido tenha boa qualidade. Além disso, é resolvida a questão de como estabelecer a conexão hidrológica entre elementos da discretização, já que existe um único trecho de rio em cada minibacia. Isso facilita a troca das informações entre o modelo hidrológico e outras ferramentas de gestão de água (Kayser e Collischonn, 2013; Pereira et al., 2012; Silva et al., 2017). A rede gerada pelo método ArcHydro é, também, muito semelhante à rede da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) utilizada pela ANA.

Em função destas vantagens, e com a consolidação do conjunto de ferramentas IPH Hydro Tools (Siqueira et al., 2016), a subdivisão e minibacias pelo método ArcHydro, passou a ser a metodologia padrão para a discretização da bacia no modelo MGB, por algum tempo, até a introdução do método inercial de propagação de cheias (Fan et al., 2014; Pontes et al., 2015; Pontes et al., 2017).

Por outro lado, o método de discretização do ArcHydro tem a desvantagem de definir minibacias de tamanho muito heterogêneo. Por exemplo, em uma discretização da bacia do rio Taquari-Antas, no RS, o método do ArcHydro resultou em uma divisão em 179 minibacias com áreas de drenagem variando entre 0,23 e 796 km² (Breda et al., 2017a). A heterogeneidade espacial é causada porque trechos de rio curtos, situados entre duas confluências muito próximas uma da outra, acabam gerando bacias de contribuição local muito pequenas. Por outro lado, trechos de rio longos, definidos por confluências muito distantes uma da outra, podem estar associados a grandes áreas de drenagem.

Do ponto de vista da modelagem hidrológica, esta heterogeneidade do tamanho dos elementos que representam as áreas de bacias é indesejável, pois no caso em que são muito pequenos, em geral, são artefatos do processo de discretização, sendo menores do que a escala espacial dos dados de entrada (MDE, chuva, mapas de solos e de vegetação), e elementos excessivamente grandes não permitem representar adequadamente a variabilidade das características físicas.

Contudo, do ponto de vista do modelo MGB, a maior desvantagem do método de discretização do ArcHydro é que sua aplicação resulta também em uma grande heterogeneidade do comprimento dos trechos de rio. Novamente, isso acontece porque em alguns casos há duas confluências muito próximas uma da outra sobre o mesmo rio. Na mesma discretização da bacia do rio Taquari-Antas, descrita antes, o método do ArcHydro resultou em uma divisão em 179 minibacias com trechos de rio de comprimentos mínimo de 590 m e máximo de 88 km (Breda et al., 2017a).

No modelo MGB esta heterogeneidade de comprimentos não representa um problema se o método de cálculo selecionado para a propagação de cheias nos rios é o método Muskingum-Cunge. No entanto, diversos trabalhos mostraram que em bacias com rios de menor declividade e onde existem áreas de inundação adjacentes aos rios, o método de cálculo de propagação de cheias Muskingum-Cunge é inadequado.

O método alternativo existente no MGB é o método inercial, que possui maior representação física do processo de propagação de vazões e gera resultados melhores em bacias de baixa declividade, mas é pouco eficiente quando existem na bacia trechos de rio muito curtos. Isto ocorre porque o método numérico utilizado no modelo exige que o passo de tempo de cálculo para a integração das equações diferenciais seja limitado a valores que são proporcionais ao comprimento do menor trecho de rio em toda a bacia. Quanto menor o tamanho do menor

trecho de rio, menor é o passo de tempo que é adotado em toda a bacia. Em consequência do passo de tempo muito pequeno, o tempo de processamento total de uma simulação hidrológica que representa o comportamento da bacia durante vários anos pode ser longo a ponto de inviabilizar a aplicação do modelo.

3.3 DISCRETIZAÇÃO COM TRECHOS DE COMPRIMENTO CONSTANTE

A discretização de uma bacia em minibacias de comprimento de rio constante foi desenvolvida para uniformizar as características geométricas do conjunto de minibacias que compõe a base topológica do modelo MGB em uma determinada aplicação. Em especial, o foco é estabelecido na área de drenagem e do comprimento do rio principal que passa através da minibacia.

Esta metodologia foi inicialmente descrita no material suplementar anexo ao artigo que descreve o modelo hidrológico da América do Sul (Siqueira et al., 2018), e foi utilizada com sucesso em aplicações do modelo MGB na bacia do rio Níger (Fleischmann et al., 2018), na bacia hidrográfica da Lagoa dos Patos (Lopes et al., 2018) e na maioria das aplicações do modelo MGB desde então.

Este método inicia a partir da análise de um MDE hidrológicamente consistido, e das correspondentes grades raster de direções de fluxo, área de drenagem acumulada e definição de rede de drenagem. A partir destas informações básicas, na melhor resolução possível considerando as limitações de capacidade de processamento, o procedimento segue basicamente três passos: 1) a marcação de exutórios de trechos; 2) a divisão dos trechos de rio; 3) definição das mini-bacias.

Passo 1 – Marcação de exutórios

Partindo de uma rede de rios previamente delineada com área mínima de drenagem, o passo inicial é marcar todos os exutórios intermediários que correspondem ao ponto mais a jusante de um determinado trecho de rio (caixas laranja na Figura 4a). Para isso, o algoritmo primeiramente identifica as junções checando se dois ou mais pixels vizinhos da grade de direção do fluxo estão sobre a rede do rio e, também, drenam para o pixel analisado. Quando uma junção é identificada, as posições da grade (linha, coluna) dos pixels de drenagem imediatamente a montante (isto é, os exutórios intermediários) e suas respectivas áreas acumuladas são armazenadas em um vetor. Este procedimento é repetido para cada junção até que toda a grade seja avaliada e todas os exutórios intermediários sejam encontrados. Além disso, os atributos do pixel com a maior área a montante (exutório da bacia) também são incluídos no vetor dos exutórios intermediários, uma vez que ele não está conectado a nenhuma junção. O exutório da bacia é ilustrado pelo quadrado verde nas figuras.

Passo 2 – Delineamento de trechos e minibacias usando um limiar de comprimento fixo

O próximo passo é segmentar a rede de drenagem utilizando um limiar de comprimento de trecho pré-definido (Δx). O vetor de exutórios intermediários é classificado em ordem decrescente em termos de área de drenagem, de tal forma que o algoritmo inicia no exutório da bacia para realizar a segmentação na direção de jusante para montante (Figura 4b). Utiliza-se uma variável que armazena o comprimento acumulado (L_{cum}), inicializado com valor = 0 no exutório da bacia. O algoritmo utiliza a grade de direção de fluxo na direção para montante, de forma que o comprimento acumulado vai sendo atualizado a cada pixel usando o método Distance Transforms (Butt e Maragos, 1998) para aprimorar o cálculo das distâncias (Paz et al.,

2007). Sempre que o limiar de comprimento é excedido por L_{cum} , conforme indicado pelas linhas de quebra na Figura 1b, o comprimento acumulado é zerado e um identificador único (ID) é atribuído a todos os pixels pertencentes ao mesmo trecho do rio, delimitando a rede associada a uma nova região de comprimento compatível com o limiar fixo. Neste processo de subida da rede de drenagem, alguns critérios de decisão são necessários. No momento em que uma junção é encontrada na rede de drenagem, o algoritmo seleciona o pixel a montante com a maior área acumulada (quadrados azuis na Figura 4b) para continuar o caminhamento sobre a rede. Além disso, se L_{cum} não for atingido no pixel localizado no extremo de montante (isto é, em minibacia de cabeceira), a rede de drenagem neste ponto é estendida para montante, seguindo o pixel com a maior área de drenagem (linha tracejada na Figura 4b), até que seja atingido o valor L_{cum} , ou que seja encontrado o divisor de águas. É importante notar que o comprimento de um dado trecho pode acabar sendo menor do que o Δx pré-definido, uma vez que este comprimento é limitado pelo divisor de águas da bacia hidrográfica, a depender do limiar adotado.

Cada pixel de exutório intermediário localizado sobre o rio já segmentado deve ser marcado como "verificado" (quadrados brancos na Figura 1c). Após finalizar a subida da rede até a cabeceira, o algoritmo então busca no vetor de exutórios intermediários aquele com a maior área de drenagem (quadrado verde na Figura 4c) e que ainda não foi marcado como "verificado", para iniciar novamente a segmentação. Os pixels já verificados devem ser ignorados para evitar a redefinição de trechos que já foram segmentados. Seguindo esta lógica, o procedimento acima é repetido até que toda a rede de drenagem esteja completamente discretizada. A Figura 5a ilustra o conceito do processo de segmentação, onde trechos são distinguidos pelas cores laranja e verde para fins de visualização.

Passo 3 – Definição das minibacias

Finalmente, as minibacias são definidas de maneira similar ao método ArchHydro, ou seja, atribuindo uma mesma identificação a todos os pixels que drenam para o mesmo trecho do rio. Assim, os elementos computacionais são limitados tanto pela topografia quanto pelo comprimento do rio. A Figura 5b mostra a discretização espacial da bacia como resultado do método acima descrito. A Figura 6 apresenta um detalhe da discretização do modelo MGB da América do Sul, que foi realizada utilizando o método do comprimento constante, com $\Delta x = 15$ km. As linhas na cor cinza correspondem ao contorno das mini-bacias. A rede de drenagem é

apresentada com cores associadas a cada um dos trechos individualizados pelo processo de segmentação em comprimento constante.

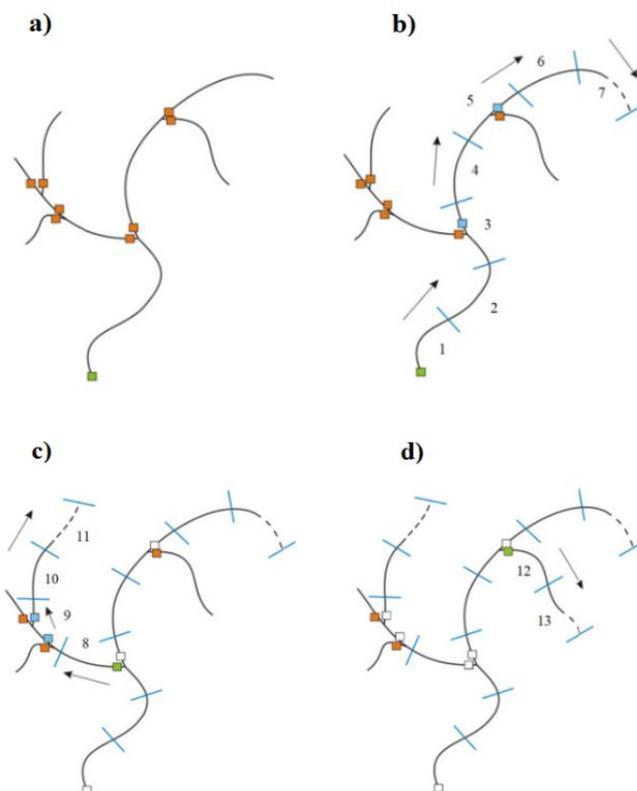


Figura 4. Definição de trechos de rio por comprimento fixo: a) Marcação de exutórios intermediários (quadrados em laranja) e da bacia (quadrado verde); b) Segmentação a partir do exutório da bacia (quadrado verde) e passagem de junção seguindo exutórios intermediários com maior área acumulada (quadrados azuis); c) Segmentação a partir do próximo exutório intermediário (quadrado verde), classificado em ordem decrescente de área acumulada; d) Similar a ao item anterior, porém traçando na direção de montante começando no próximo exutório intermediário. Os pixels de exutório ao longo de rios previamente traçados (quadrados brancos) são ignorados quando selecionados para um novo início de segmentação. Adaptado de Siqueira et al. (2018, material suplementar).

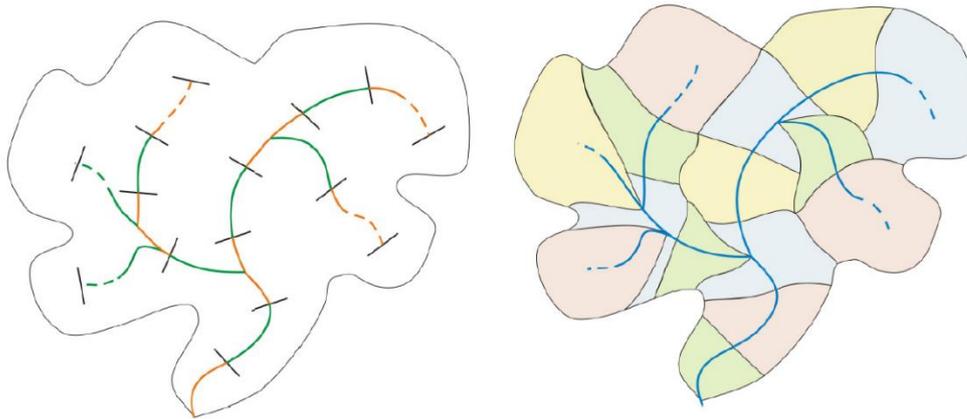


Figura 5. Discretização da bacia por comprimentos fixos: a) Trechos de rio são separados por linhas de quebra e diferenciados pelas cores laranja e verde; b) Delineamento de minibacias, com a atribuição de um mesmo identificador (ID) a todos os pixels que drenando para um mesmo trecho segmentado.

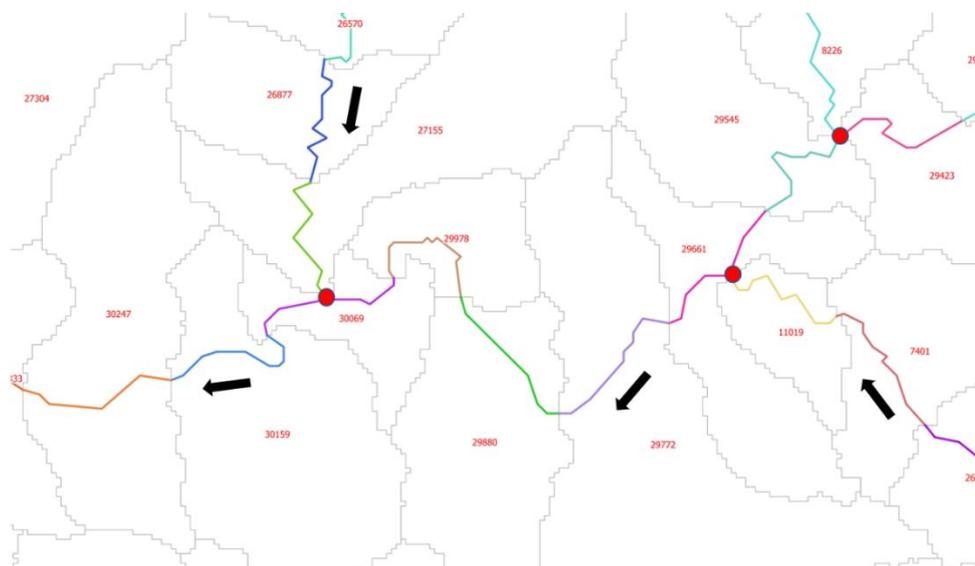


Figura 6. Esquema de discretização de minibacias/trechos por comprimento fixo utilizado no MGB-SA. As minibacias estão delineadas na cor cinza, e os trechos correspondentes estão separados por diferentes cores. Os círculos vermelhos representam confluências, e as setas na cor preta indicam o sentido de fluxo na rede de drenagem.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO DO MGB

Neste item é apresentada uma comparação entre os métodos de discretização mais frequentemente utilizados nas aplicações recentes do MGB, que são o método do ArcHydro e o método dos trechos de comprimento constante. Não é abordada a discretização em células quadradas pelas desvantagens que este método tem na representação da rede de drenagem, conforme discutido no item 3.1, e porque não tem sido utilizado no MGB nas aplicações mais recentes. A Figura 7 apresenta um exemplo hipotético de uma bacia discretizada utilizando os dois métodos de segmentação da rede de drenagem (ArcHydro e Comprimento Constante). Observa-se que o tamanho das minibacias é mais variável quando é utilizado o método de

segmentação do ArcHydro, e mais constante quando é utilizado o método de segmentação de comprimento constante.

Uma análise na bacia do rio Taquari-Antas, conduzida por Breda et al. (2017), comparou a discretização da bacia utilizando o método Arc-Hydro, com a discretização baseada no método de comprimento constante. No método Arc-Hydro foi utilizado o limiar de 75 km², para definir a rede de drenagem. No método de comprimento constante foi utilizado o mesmo valor deste limiar, e foram estabelecidos testes com valores de Δx variando entre 1 e 30 km para os trechos de rio. Tomando-se como exemplo o resultado de $\Delta x = 30$ km, as duas discretizações dividiram a bacia em minibacias de área média praticamente igual: 150 km² (ArcHydro) e 164 km² (comprimento constante). No entanto, a variabilidade do tamanho das minibacias foi muito maior na discretização baseada no método do ArcHydro (desvio padrão de 122 km²) do que no método de comprimento constante (desvio padrão de 65 km²). Além disso, a discretização baseada no ArcHydro gerou ao menos um trecho de rio com comprimento de apenas 590 metros, enquanto na discretização com o método de comprimento constante o menor trecho ficou com 16,7 km.

Por conta da presença de trechos muito curtos, quando é adotada a discretização ArcHydro, a opção pelo método inercial de propagação de cheias pode tornar o MGB dezenas ou centenas de vezes mais lento do que quando é feita a opção pelo método Muskingum-Cunge. Uma simulação que leva apenas alguns minutos pode levar dezenas de horas.

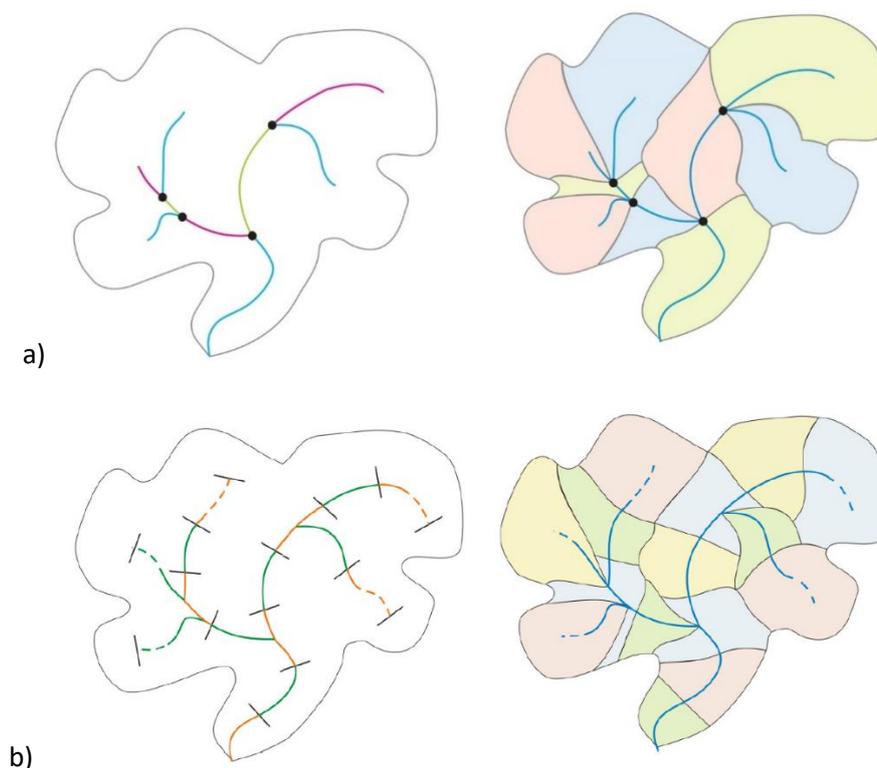


Figura 7. Exemplo hipotético de bacia discretizada utilizando: (a) o método ArcHydro; (b) o método de comprimento constante. Os círculos na cor preta indicam as confluências em que o método do ArcHydro é baseado, enquanto as linhas ao longo da rede de drenagem indicam o ponto onde é feita a divisão dos trechos no método de comprimento constante.

Por fim, a Figura 8 demonstra discretização de uma bacia utilizando os dois métodos, considerando parâmetros que evidenciam o potencial do método do comprimento constante. Em boa parte das situações, ambos os métodos são capazes de fornecer bacias similares ao da BHO, porém o método de comprimentos constantes pode resultar em bacias mais diferentes devido a parametrização adicional do trecho, conforme ilustrado. Em geral, o método do ArcHydro tende a criar bacias maiores a medida que limiares (“area threshold”) maiores de área de drenagem são utilizados para definir as bacias, um processo realizado de montante para jusante. Por outro lado, o método do comprimento constante que é realizado de jusante para montante, permite estabelecer uma discretização que permite gerar minibacias maiores (ou menores), ao longo dos rios principais, de forma, a atender os critérios adequados para obter uma melhor configuração do modelo hidrodinâmico inercial.

Conforme já destacado, no modelo MGB, a bacia hidrográfica é representada com uma discretização espacial da área de drenagem em unidades irregulares, definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE), as quais são denominadas minibacias (Pontes et al., 2015). Cada minibacia possui um único trecho de rio principal associado. Usualmente, nos referimos ao trecho de rio na minibacia quando tratamos de processos ao longo do eixo longitudinal do rio principal, como a propagação de vazões. Ao tratar do balanço vertical e propagação de escoamento local, faz mais sentido utilizar a perspectiva de área, ou seja, de minibacia. No MGB, a base topológica é estabelecida de tal forma que o n-ésimo trecho de rio estará na n-ésima minibacia, sendo assim, para fins práticos de referência a topologia do MGB, a terminologia de trecho e minibacia é intercambiável. Nas aplicações convencionais, cada minibacia (e trecho associado) se relaciona com minibacias vizinhas à montante e/ou a jusante. Em geral, um trecho pode ter mais de um afluente a montante, enquanto deságua somente em um trecho a jusante.

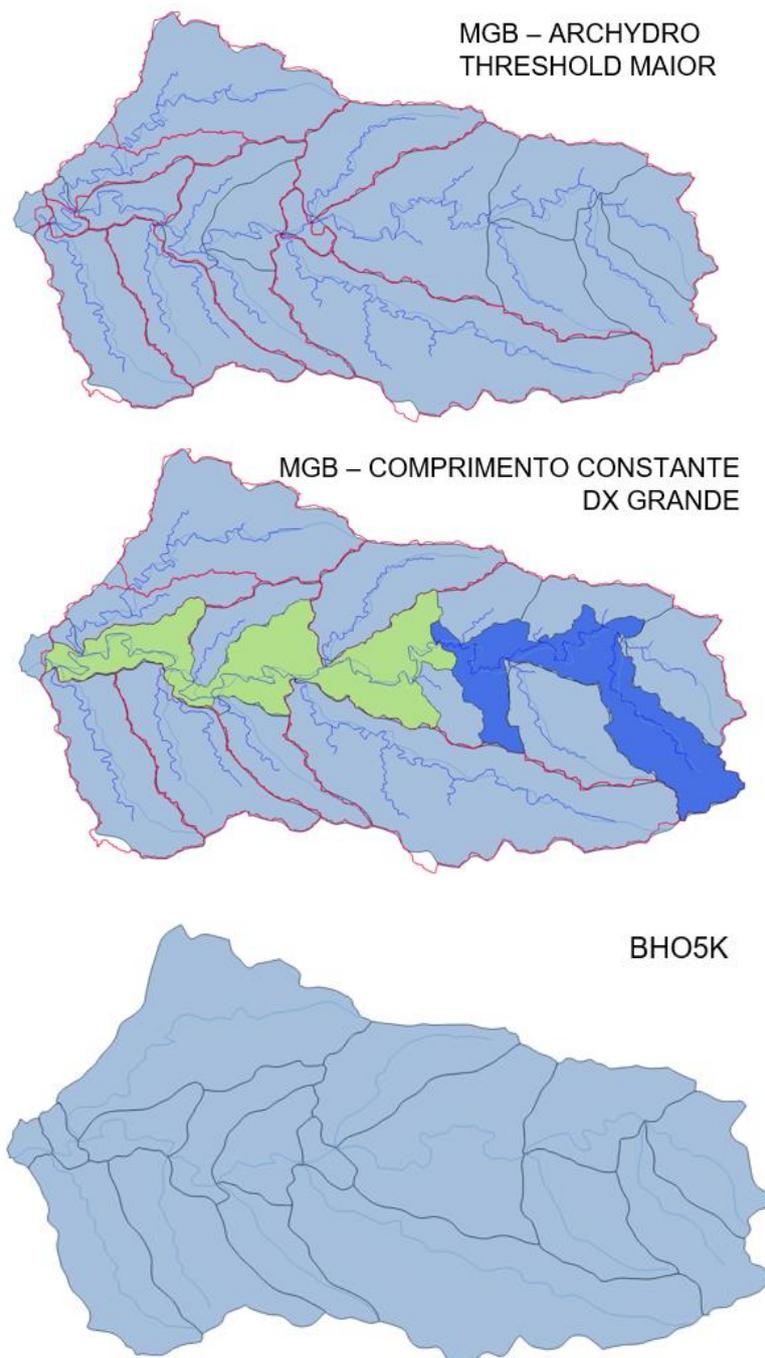


Figura 8. Exemplo comparativo de discretização pelo método do ArchHydro (acima) e método do comprimento fixo com destaque no trecho mais longo (meio) sobrepostos a base hidrográfica da BHO da ANA (abaixo).

3.5 A BASE HIDROGRÁFICA OTTOCODIFICADA DA ANA

A Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) utilizada pela ANA na gestão de recursos hídricos é obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro. A BHO é gerada a partir da cartografia digital da hidrografia do país e organizada de modo a gerar informações hidrologicamente consistentes. Para tanto, a BHO representa a rede hidrográfica em trechos entre os pontos de confluência dos cursos d'água de forma unifilar.

Cada trecho é associado a uma superfície de drenagem denominada *ottobacia*, à qual é atribuída a codificação de bacias de Otto Pfafstetter. Uma característica essencial dessa representação é ser topologicamente consistente, isto é, representar adequadamente o fluxo hidrológico dos rios, por meio de trechos conectados por confluências e com sentido de fluxo. A identificação do curso d'água principal de cada subsistema hidrográfico foi obtido pela maior área de contribuição a montante de cada confluência, tendo como unidades elementares de drenagem as *ottobacias*, geradas a partir de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (SRTM).

As representações de cursos d'água por linhas duplas ou por polígonos são adequadas para a visualização e a produção cartográfica. Entretanto, para a análise de redes e para a construção da BHO, os cursos d'água devem ser representados por segmentos de linha ou arcos (que representam os trechos de curso d'água), conectados por nós (que representam a nascente, as confluências e a foz).

Obtida a partir da BHO multiescalas 2017, a base BHO5k2017 contém os cursos d'água com área drenada maior ou igual a 5 km² e todos os trechos de drenagem de domínio federal. Nesta composição, a rede de drenagem possui 464067 trechos e suas respectivas áreas de contribuição hídrica, para os quais existem diferentes atributos relacionados a identificação, tipologia e geometria. Cada trecho de drenagem é identificado pelo atributo *cotrecho*, para o qual existe também um identificador ottocodificado e armazenado no atributo *cobacia*.

No contexto de compatibilização entre BHO e modelos chuva-vazão, podemos destacar também os atributos referentes a topologia em formato de árvore (grafo) – sendo o trecho a jusante identificado por *nutrjus* –, e também a área de drenagem local (*nuareacont*) e total (*nuareamont*), por exemplo. Outras informações como número de strahler (*nustrahler*), e domínio (*dedominial*) podem ser utilizados para identificar trechos de início (cabeceiras) e fim da rede (linha de costa) que são muito úteis para algoritmos de varredura. Além disso, o atributo *dsversao* permite a identificação de ilhas. Essas e demais informações dessa base tornam possível e facilitam o desenvolvimento das análises espaciais. A bases BHO utiliza o sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000 (SRID 4674). Os cálculos de áreas utilizam a Projeção Equivalente de Albers e os cálculos de extensões utilizam a Projeção Policônica.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, M.E., Meyer, A.O, Fan, F.M., Paiva, R.C.D. (2020): Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS.

Brêda, J. P. L. F., Paiva, R. C. D. D., & Collischonn, W. (2017b): Potencial de aplicação de passo de tempo local em um modelo hidráulico unidimensional. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre, ABRH.

- Brêda, J. P. L. F., Siqueira, V. A., Fleischmann, A., Fan, F. M., Ruhoff, A. L. (2017a): Extração de parâmetros físicos de bacias hidrográficas através da segmentação por trechos de mesmo comprimento com o IPH-Hydro Tools. Em: Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Campinas.
- Collischonn, B., Paiva, R. C. D. D., Collischonn, W., Meirelles, F. S. C., Schettini, E. B. C., Fan, F. M. (2011): Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(4), 119-134.
- Davies, H. N., & Bell, V. A. (2009). Assessment of methods for extracting low-resolution river networks from high-resolution digital data. *Hydrological sciences journal*, 54(1), 17-28.
- Fan, F. M., Collischonn, W., Sorribas, M. V., & Pontes, P. R. M. (2013): Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 241-257.
- Fan, F. M., Pontes, P. R. M., Paiva, R. C. D., & Collischonn, W. (2014) : Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(4), 137-147.
- Felix, V.S. , PAZ, A. R. (2016) : Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *RBRH*, v. 21, p. 556-569.
- Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Siqueira, V. A., Paris, A., Moreira, D. M., ... & Garambois, P. A. (2020): Trade-Offs Between 1-D and 2-D Regional River Hydrodynamic Models. *Water Resources Research*, 56(8), e2019WR026812.
- Fleischmann, A., Siqueira, V., Paris, A., Collischonn, W., Paiva, R., Pontes, P., ... & Calmant, S. (2018): Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. *Journal of Hydrology*, 561, 943-959.
- Fürst, J., & Hörhan, T. (2009): Coding of watershed and river hierarchy to support GIS-based hydrological analyses at different scales. *Computers & Geosciences*, 35(3), 688-696.
- Kayser, R. H. B., Collischonn, W. (2013): Integrando Sistema de Suporte à Decisão para Gerenciamento de Recursos Hídricos a um SIG de Código Aberto. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX SBRH. Porto Alegre: ABRH.
- Maidment, D. (2002): *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Redlands, CA, USA: ESRI.
- Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Collischonn, W., Bonnet, M. P., Frappart, F., Calmant, S., and Bulhões Mendes, C. A. (2013): Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, *Water Resources Research*, 49, 1226-1243, 10.1002/wrcr.20067.
- Paiva, R. C. D., Collischonn, W., and Tucci, C. E. M. (2011): Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach, *Journal of Hydrology*, 406, 170-181, 10.1016/j.jhydrol.2011.06.007.
- Paz, A. R., Buarque, D. C., Collischonn, W., Victoria, D. D. C., & Andrade, R. G. (2011): Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias. *Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, 19., 2011, Maceió, AL. Anais Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, Maceió: ABRH.

- Paz, A.R., Collischonn, W. (2007): "River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model". *Journal of Hydrology* 343, pp. 127-139.
- Paz, A. R., Collischonn, W., & Lopes da Silveira, A. L. (2006). Improvements in large-scale drainage networks derived from digital elevation models. *Water Resources Research*, 42(8).
- Pereira, M., Kayser, R. H. B., Collischonn, W. (2012): Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 9, no. 2, p. 21-33.
- Pfafstetter, O. (1989) *Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOCS), 1989, p. 19. Manuscrito não publicado.
- Pontes, P. R., Collischonn, W., Fan, F. M., Paiva, R. C., & Buarque, D. C. (2015) : Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4), 888-904.
- Pontes, P. R. M., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., de Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Siqueira, V. A., ... & Collischonn, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open-source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 94, 1-20.
- Reed, S.M. (2003): "Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling". *Water Resources Research* 39(9), 1238.
- Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2001). Discretização espacial de bacias hidrográficas. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 10, 485-492.
- Silva, M. M. , Faria, S. D. , Moura, P. M. (2017): Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba (MG). *Eng. Sanit. Ambient.* vol.22, n.1, pp.133-143, 2017.
- 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.
- Siqueira, V. A., Paiva, R. C., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R., ... & Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815-4842.
- Sorribas, M. V., Pontes, P. R. M., Collischonn W. (2011): Buscando áreas de drenagem mínima para definição da rede de drenagem a partir da litologia. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 19., 2011, Maceió. *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos de Maceió: [s.l.]*, 2011.
- Stein, J. L. (2018): An enhanced Pfafstetter catchment reference system. *Water Resources Research*, 54(12), 9951-9963.
- Teixeira, A. (2012): *Ottocodificação estendida e inteligência hidrográfica em banco de dados geográficos*. 2012. xi, 425 f., il (Tese Doutorado em Geociências Aplicadas). Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

- Verdin, K. L., Verdin, J. P. A. (1999): Topological System for Delineation and Codification of the Earth's River Basins. *Journal of Hydrology*, vol. 218, nº 1-2.
- Yamazaki, D., Oki, T., & Kanae, S. (2009): Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11), 2241.

APÊNDICE

ALGORITMO DE TRANSFERÊNCIA TIPO 1

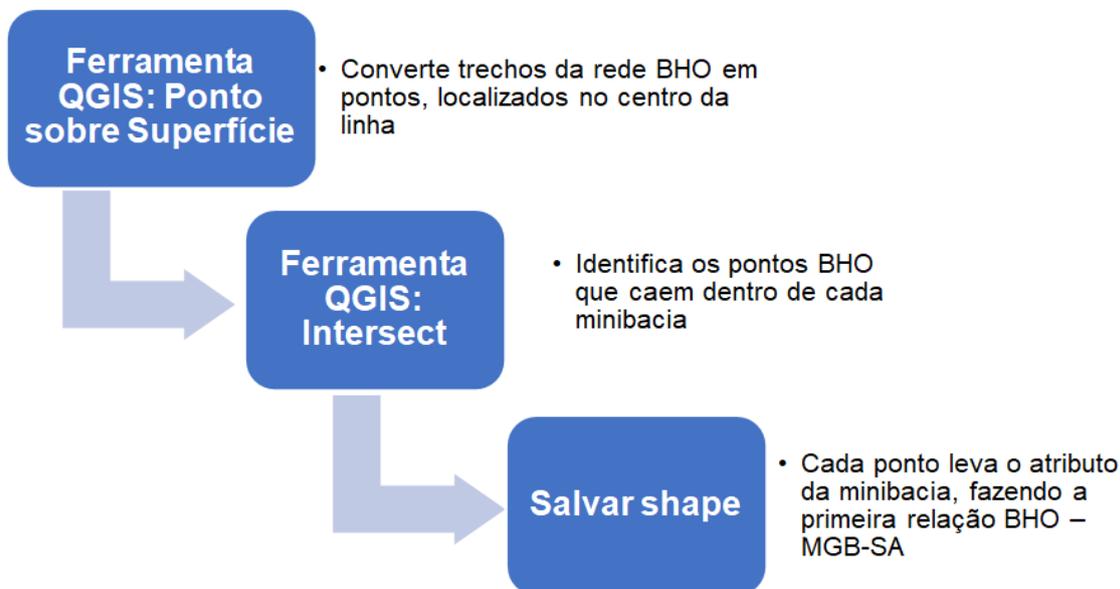
Nessa seção apresentamos o algoritmo da transferência Tipo 1 entre as bases BHO e MGB-AS. O método de transferência Tipo 1 consiste em selecionar um ponto BHO (cotrecho) para cada minibacia do modelo de maneira que possa haver atribuição direta da vazão do exutório da minibacia para os cotrechos selecionados.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

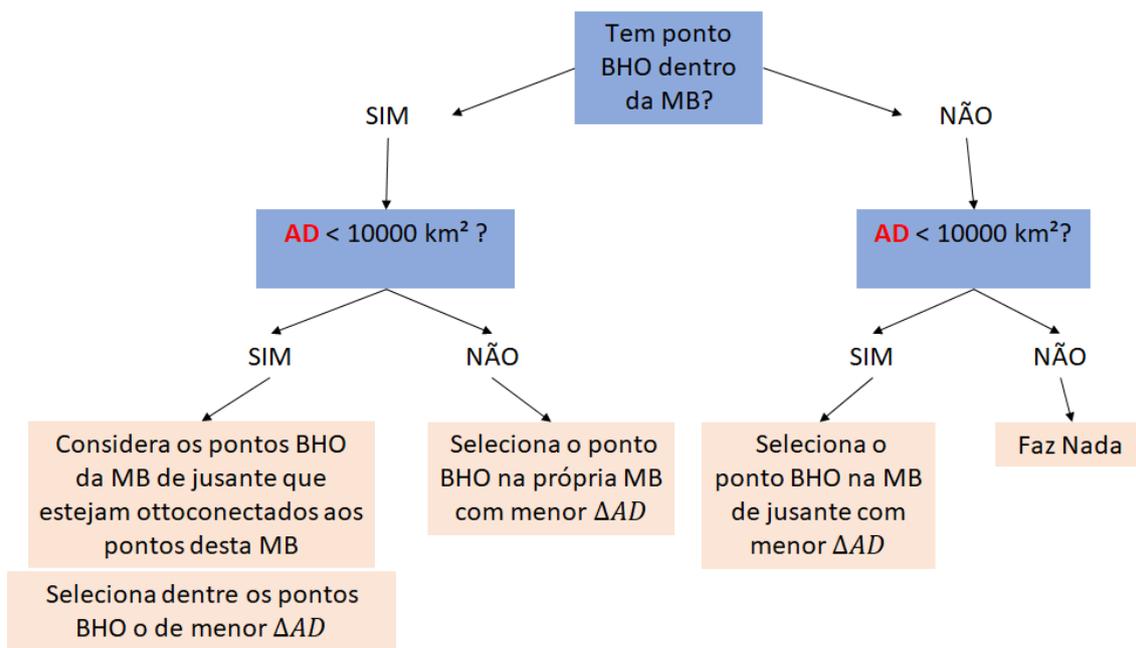
A) Etapa de Geoprocessamento:

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

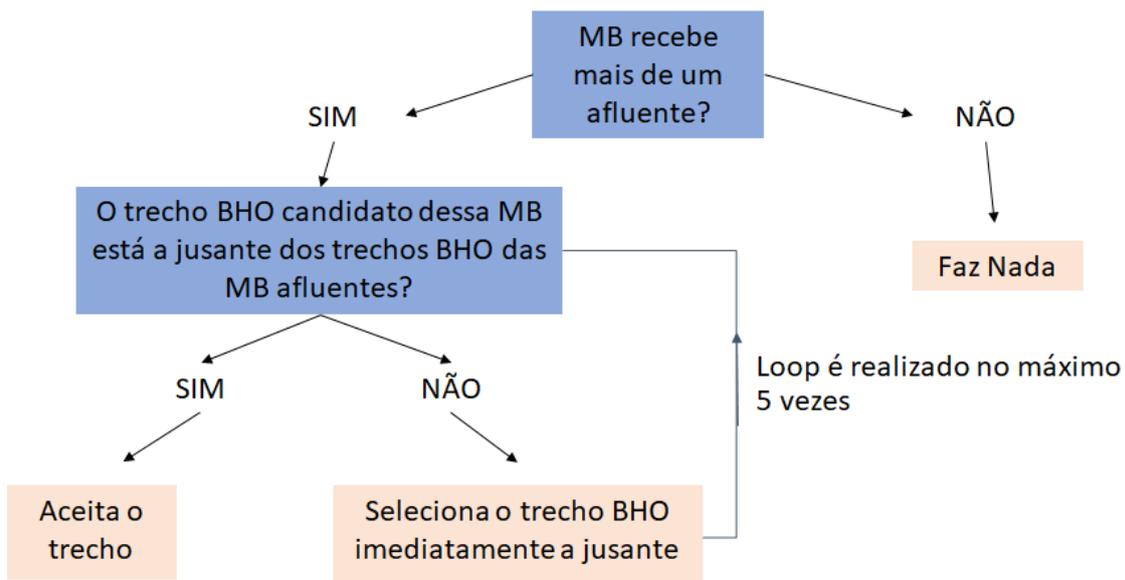
Essa etapa permite indicar os primeiros candidatos. Basicamente serão considerados possíveis candidatos para uma determinada minibacia todos os pontos BHO dentro dela e os pontos BHO também na minibacia de jusante (caso ela tenha menos que 10.000 km² de área de drenagem acumulada). No entanto são avaliados 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.



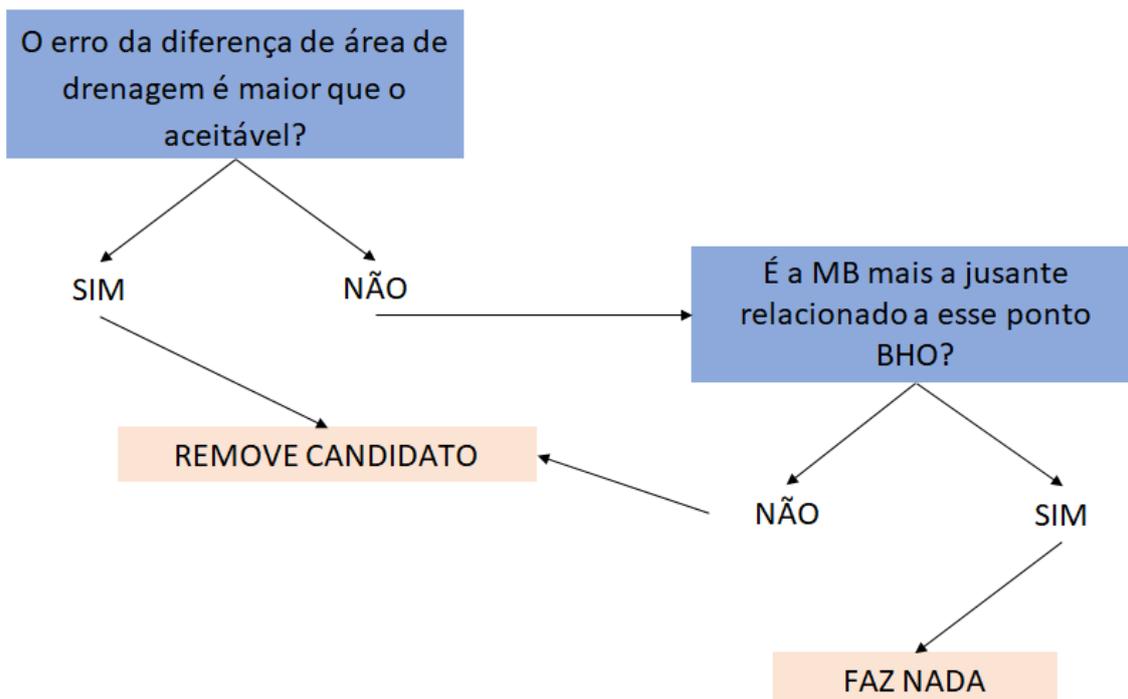
MB – minibacia; AD - área de drenagem; ΔAD - diferença de área de drenagem.

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.



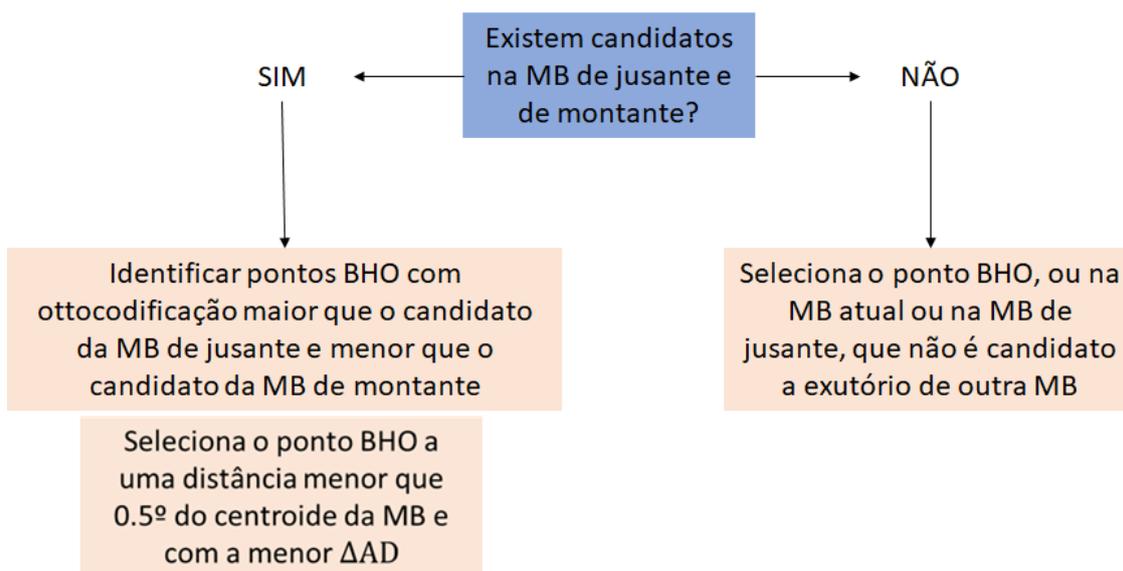
Em seguida fazemos avaliações para detectar se o ponto BHO escolhido ainda tem uma diferença de área de drenagem muito grande em relação à minibacia atribuída. Além disso, como é permitido escolher pontos BHO nas minibacias de jusante, algumas vezes um mesmo ponto BHO é o candidato de duas minibacias 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 descrito no item 5.2.