

COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA NACIONAL

SUBPROJETO – BASES DE DADOS HIDROLÓGICAS E BHO

RELATÓRIO 4 (FINAL) - SUBPROJETO BASES DE DADOS HIDROLÓGICAS E BHO

AUTORES: Fernando Mainardi Fan, Mino Viana Sorribas, Maria Eduarda Alves, Stefany Gonçalves Lima, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

COMO CITAR: Fan, F. M.; Sorribas, M. V.; Alves, E. M.; Lima, S. G.; Paiva, R. C. D. 2024. Relatório 4 (Final) - Subprojeto Base de dados Hidrológicas e BHO.

Abril 2024

Sumário

SUMÁRIO	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVOS DO SUBPROJETO	5
3. ORGANIZAÇÃO DO SUBPROJETO	6
4. PRODUTOS DESENVOLVIDOS	7
5. MÉTODOS	8
5.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	8
5.2. DESENVOLVIMENTO FINAL E APLICAÇÃO DO PGHHGM	10
6. APLICAÇÃO DO PGHHGM NAS BACIAS DA BHAÉ	12
6.1. INTRODUÇÃO AO ESTUDO	12
6.2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA A BACIA DO TAQUARI-ANTAS.....	14
6.3. RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA A BACIA DO RIO PARANÁ	17
6.4. DISCUSSÕES.....	20
6.5. BASE DE ATRIBUTOS HIDROGEOMORFOMÉTRICOS NACIONAL	20
7. LISTA DE ATUALIZAÇÕES DO PGHHGM	22
7.1. VERSÃO 2.0.2.....	22
7.2. VERSÃO 2.0.3.....	23
7.3. VERSÃO 2.1.....	23
7.4. VERSÃO 2.2 (JUL/2023)	24
7.5. VERSÃO 2.2.1 (AGO/2023)	25
7.6. VERSÃO 2.2.2 (SET/2023)	26
7.7. VERSÃO 2.2.3 (OUT/2023)	27
7.8. VERSÃO 2.2.4 (JAN-FEV/2024)	27
7.9. VERSÃO 2.3 (MAR-ABR/2024)	27
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
9. REFERÊNCIAS	29

1. Introdução

O presente documento apresenta uma síntese das atividades finais do subprojeto “Novas bases de dados hidrológicas para a BHO” resultante 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.

Este subprojeto foi concebido após reuniões entre os técnicos da ANA e pesquisadores do HGE-IPH-UFRGS, em 2021, onde identificou-se temas específicos onde a cooperação auxiliaria diretamente, a curto e médio prazo, as atividades da ANA na área de mudanças climáticas e recursos hídricos e novas bases de dados hidrológicas. Foram avaliadas demandas da ANA e possibilidades de execução pelo HGE-IPH-UFRGS, se identificando a possibilidade de colaboração nos seguintes temas: (i) Estudos para apoio ao PNRH e 1º Relatório de Conjuntura de Mudanças Climáticas em Recursos Hídricos da ANA, (ii) Sensibilidade de vazões de cheias e estiagens a mudanças e variabilidade climática, (iii) Impactos de mudanças climáticas em extremos de vazão (cheias e estiagens), (iv) Mudanças Climáticas e Segurança hídrica relacionado a disponibilidade de água e estiagens, (v) Modelo Digital do Terreno para América do Sul e (vi) Novas bases de dados hidrológicas para a BHO.

Especificamente sobre o item “(vi) Novas bases de dados hidrológicas para a BHO”, que trata o presente documento, a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) é utilizada pela ANA como referência para estudos hidrológicos e gestão de recursos hídricos. A BHO conta com atributos/informações úteis para estudos hidrológicos e tomada de decisão em gestão de recursos hídricos (e.g. comprimentos dos rios, área de drenagem). Entretanto, existem diversas informações a implementar como atributos na BHO, como largura e profundidade dos rios, tempo de trânsito médio de ondas de cheia ou constituintes etc.

Neste contexto, o presente subprojeto visou ao desenvolvimento de novas bases de dados hidrológicos para serem atribuídos para a BHO da ANA, levantando um referencial bibliográfico robusto sobre o tema, propondo novas variáveis para serem atribuídas para a BHO, bem como a respectiva metodologia para atribuição desta. No decorrer do projeto estas técnicas foram sendo implementadas para a produção de novos parâmetros para a BHO através de uma ferramenta denominada “pghHGM” (acrônimo para PGHydro HidroGeoMorfométrico).

Após finalizada a ferramenta, ela foi aplicada para a Base Hidrográfica Atlas-Estudos (BHAE) a partir de combinação com a equipe da ANA. A Base Hidrográfica Atlas-Estudos (BHAE) é derivada da Base Hidrográfica Ottocodificada 6 (BHO 6) e é constituída pelos trechos de drenagem e áreas de drenagem dos cursos de água com área maior ou igual a 10km² OU cursos d’água de domínio da União. Essa base hidrográfica utilizada pela ANA na gestão de recursos hídricos é obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro. O pghHGM foi aplicado para sub bacias da BHAE pela equipe do IPH/UFRGS e

na BHAE completa em colaboração com a equipe da ANA usando os servidores da agência.

A aplicação do pghHGM resultará em uma versão da BHAE com atributos geomorfológicos aplicados para toda a rede hidrográfica nacional. Esta versão da BHAE será futuramente a base para o produto da ANA previamente denominado de “Atlas Nacional Hidrogeomorfométrico”.

Este é o quarto e relatório final do subprojeto.

2. Objetivos do subprojeto

Desenvolvimento de novas bases de dados como novos parâmetros hidrológicos para a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) da ANA.

3. Organização do subprojeto

Este subprojeto é desenvolvido através das seguintes etapas.

Etapa 1: Revisão de literatura

- Revisão bibliográfica sobre a BHO-ANA e seus atributos;
- Revisão bibliográfica sobre bases de dados hidrológicas existentes (SWORD, GRWL etc.);
- Revisão bibliográfica sobre métodos de estimativa de parâmetros geométricos, topográficos, geometria de rios e tempos de trânsito de ondas de cheia e constituintes.

Etapa 2: Métodos

- Treinamento em PostgreSQL/PostGIS (PGHydro) aplicado à BHO/ANA;
- Definição justificada de métodos de estimativa de parâmetros geométricos, topográficos, geometria de rios e tempos de trânsito de ondas de cheia e constituintes.

Etapa 3: Estimativa de parâmetros hidrológicos

- Implementação de estimativas de parâmetros geométricos, topográficos, geometria de rios e tempos de trânsito de ondas de cheia e constituintes.

Etapa 4: Outros parâmetros hidrológicos

- Investigação e pesquisa sobre outros parâmetros hidrológicos úteis para tomada de decisão e gestão de recursos hídricos (e.g. concentração de sedimentos, cor da água, temperatura da água, informações úteis para PAEs etc.).

Etapa 5: Análise dos resultados

- Análise crítica da representatividade dos parâmetros hidrológicos;
- Validação dos resultados.

Etapa 6: Síntese dos resultados e transferência de conhecimento

- Geração de mapas e base de dados espaciais com parâmetros hidrológicos na Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) da ANA;
- Publicação de base de dados nos sites da ANA e IPH-UFRGS;
- Elaboração de manuais técnicos para uso da base de dados;
- Minicurso sobre o uso da base de dados para técnicos da ANA e público geral.

O presente relatório constitui-se do relatório final, trazendo a síntese do que foi desenvolvido e resultados dos testes do ferramental.

4. Produtos Desenvolvidos

Neste subprojeto foram desenvolvidos os seguintes produtos:

- Módulo (software) denominado “pghHGM”;
- Bases de dados da BHO atualizada com novos atributos hidrológicos;
- Manuscrito de artigo(s) científico(s);
- Relatórios parciais;
- Manual técnico descrevendo a metodologia empregada e a base de dados desenvolvida;
- Minicurso sobre uso da base de dados desenvolvida;
- Relatório final.

O presente produto constitui-se do relatório final.

5. Métodos

5.1. Contextualização

A Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) é utilizada pela ANA como referência para estudos hidrológicos e gestão de recursos hídricos. A BHO conta com atributos/informações úteis para estudos hidrológicos e tomada de decisão em gestão de recursos hídricos (e.g. comprimentos dos rios, área de drenagem). Entretanto, existem diversas informações a implementar como atributos na BHO, como largura e profundidade dos rios, tempo de trânsito médio de ondas de cheia ou constituintes etc.

Assim foi proposto o projeto para desenvolvimento de novas bases de dados como novos parâmetros hidrológicos para a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) da ANA.

No decorrer do primeiro ano do projeto foi realizado um treinamento em PostgreSQL/PostGIS, pgHydro e TerraHidro aplicado à BHO/ANA proferido pela equipe da ANA para a equipe do IPH/UFRGS.

A partir das competências desenvolvidas no treinamento a equipe do IPH/UFRGS iniciou a programação em linguagem SQL (Structured Query Language) e PL/pgSQL (Procedural language PostgreSQL) de rotinas de cálculos de variáveis e parâmetros hidrológicos e geomorfológicos para bases hidrográficas.

Para auxiliar nesse processo, foi necessária a criação de uma extensão para PostgreSQL, no mesmo contexto do pgHydro, para cálculo de funções de hidrogeomorfometria que cria um esquema intitulado “pghHGM” que cria objetos em sistema de banco de dados espaciais para a geração de informações hidrogeomorfométricas para ajudar na tomada de decisão em recursos hídricos.

Assim, um dos principais resultados do projeto é a extensão “pghHGM”.

Este módulo permite, dada uma chave primária de bacia hidrográfica na base hidrográfica carregada no pgHydro, os cálculos de funções hidrogeomorfométricas considerando os atributos do trecho ou da bacia que o define, a depender da variável calculada.

O usuário esperado para a ferramenta é o construtor da BHO. Outro usuário do pghHGM seria um usuário desenvolvedor que poderá utilizar as suas funcionalidades para criar outras mais específicas. As informações disponibilizadas pelo pghHGM serão incorporadas na BHO e aí o usuário dessas informações seria o mesmo usuário da BHO.

Após finalizada a ferramenta, ela foi aplicada para a Base Hidrográfica Atlas-Estudos (BHAE) a partir de combinação com a equipe da ANA. A Base Hidrográfica Atlas-Estudos (BHAE) é derivada da Base Hidrográfica Ottocodificada 6 (BHO 6) e é constituída

pelos trechos de drenagem e áreas de drenagem dos cursos de água com área maior ou igual a 10km² OU cursos d'água de domínio da União. Essa base hidrográfica utilizada pela ANA na gestão de recursos hídricos é obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro. A BHAÉ é gerada a partir da cartografia digital da hidrografia do país e organizada de modo a gerar informações hidrológicamente 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 minibacia ou ottobacia, à qual é atribuída a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter. Uma característica essencial dessa representação é ser topologicamente consistente, isto é, representar corretamente o fluxo hidrológico dos rios, por meio de trechos conectados e com sentido de fluxo.

O pghHGM foi aplicado para sub bacias da BHAÉ pela equipe do IPH/UFRGS visando testar o software desenvolvido e o potencial de seus resultados. Os desenvolvimentos iniciais foram realizados na base hidrográfica e MDE da bacia do rio Itaúnas, fornecidos pela ANA, incluindo testes com NASADEM, SRTM e CopDEM. Nas etapas finais de verificação foram realizados testes de aplicação em regiões maiores utilizando a base hidrográfica da BHAÉ e o ANADEM para as seguintes bacias: Bacia do rio Taquari-Antas, Bacia do rio Paraná (até confluência após o rio Iguaçu), Região Hidrográfica do Uruguai, Atlântico Sul, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba e Atlântico Nordeste Ocidental. Dessa maneira, foi possível obter uma ampla cobertura espacial de testes realizados com sucesso.

Após os testes nas sub bacias, o pghHGM foi aplicado na BHAÉ completa em colaboração com a equipe da ANA usando os servidores da Agência.

A aplicação do pghHGM resultará em uma versão da BHAÉ com atributos geomorfológicos aplicados para toda a rede hidrográfica nacional. Esta versão da BHAÉ será futuramente a base para o produto da ANA previamente denominado de "Atlas Nacional Hidrogeomorfológico".

5.2. Desenvolvimento final e aplicação do pghHGM

As variáveis programadas na extensão pghHGM foram definidas a partir das pesquisas de referências bibliográficas do projeto (apresentadas no Relatório de Acompanhamento 1) e em reuniões de discussão com a equipe da ANA.

A Tabela 1 apresenta uma listagem final das variáveis definidas a serem programadas na primeira versão da extensão pgh_hgm. O esquema de cores de fundo adotado na tabela serve para identificar mais facilmente o tipo de variável. As funções de cálculo dos parâmetros serão realizadas prioritariamente para as áreas de contribuição local e trechos de drenagem do pghydro e, quando possível adaptar também para a bacia e/ou rio principal a montante.

Tabela 1. Listagem final das variáveis definidas a serem programadas na primeira versão da extensão pgh_hgm. O esquema de cores de fundo adotado na tabela serve para identificar mais facilmente o tipo de variável.

Atributo
Hidromorfométricos
Compacidade de bacias hidrográficas
Fator de forma de bacias hidrográficas
Circularidade de bacias hidrográficas
Relação de relevo de bacias hidrográficas
Sinuosidade dos trechos de drenagem
Gradiente dos trechos de drenagem
Densidade de drenagem
Hidrodensidade (número de trechos)
Distância média do escoamento superficial
Desníveis e declividades
Desnível de máx-min do trecho, entre elevações máxima e mínimo
Desnível de extremos do trecho, entre elevações no ponto inicial e final
Desnível s15-85 do trecho, entre elevações nos percentis 15 e 85% do comprimento
Desnível p15-p85 do trecho, entre percentis 15 e 85% das elevações
Declividade de máx-min do trecho
Declividade de extremos do trecho
Declividade s15-85 do trecho
Declividade p15-p85 do trecho
Declividade ponderada
Declividade por regressão linear
Declividade harmônica ou equivalente
Relações Geomorfológicas
w = Largura (m) com base em relações Geomorfológicas para o Brasil
h = Profundidade (m) com base em relações Geomorfológicas para o Brasil
Velocidades e Propagação de onda de cheia
Velocidade pela eq. de Manning (seção transversal) (m/s)
Celeridade pela eq. de Manning (seção transversal) (m/s)

Tempo de propagação de onda de cheia (h) (m/s)
Velocidade de onda dinâmica (m/s)
Tempo de propagação de onda dinâmica (segundos)

Tempos de concentração

Tempo de concentração pela equação de Kirpich
Tempo de concentração pela equação de U.S. Army Corps
Tempo de concentração pela equação de Watt & Chow
Tempo de concentração pela equação de Carter
Tempo de concentração pela equação de Dooge

Modelo de Jobson (dispersão de poluentes)

Velocidade de pico (Eq. 12) - modelo completo: $F(A', Q', S, Q, A)$
Velocidade Máxima provável (Eq. 13) - modelo completo: $F(A', Q', S, Q, A)$
Tempo de pico (horas)
Tempo de chegada – “Leading edge” (horas)

Os detalhes e formulação de cada uma das variáveis foram apresentados no Capítulo 6 do Relatório de Andamento 2 do projeto (Fan et al., 2023). No Capítulo 7 do Relatório de Andamento 2 foi apresentado o estudo completo do desenvolvimento das equações de relações geomorfológicas adotadas. E no Capítulo 8 do Relatório de Andamento 2 foram apresentados testes de validação dos resultados calculados pelo módulo pghHGM em comparação com medições feitas manualmente.

No Manual Técnico do pghHGM, entregue como parte do pacote dos produtos finais do projeto, as equações e como elas foram implementadas são detalhadamente apresentadas.

No presente relatório é apresentado a seguir no Capítulo 6 os resultados de aplicações para a BHAÉ nas sub bacias do Rios Paraná e Taquari-Antas.

No Capítulo 7 é apresentado o histórico de desenvolvimento e registro de atualizações da extensão pghHGM, decorrente de reuniões, orientações e decisões realizadas entre o IPH e ANA, até a versão atual finalizada em março de 2024.

As considerações finais relacionados ao subprojeto são apresentadas no Capítulo 8.

6. Aplicação do pghHGM nas bacias da BHAE

6.1. Introdução ao estudo

O pghHGM foi aplicado para várias bacias que compõem a BHAE no território da América do Sul. A lista completa das bacias onde foi realizada execuções de teste pela equipe do IPH é apresentada na Figura 1 e Tabela 2. O pghHGM foi desenvolvido e implementando em bancos de dados separados, para diferentes grupos de bacias. Para tanto, utilizou-se recortes da BHAE que foram importados no pgHydro, bem como os recortes do modelo digital de elevação ANADEM com 30 metros de resolução. As bacias onde a preparação e execução do pghHGM correspondem a 36% da cobertura total da BHAE. Em todas as aplicações foi obtido êxito, sendo a que demanda computacional, em termos de tempo de execução, aumenta para regiões com maior número de feições e maiores áreas de drenagem.

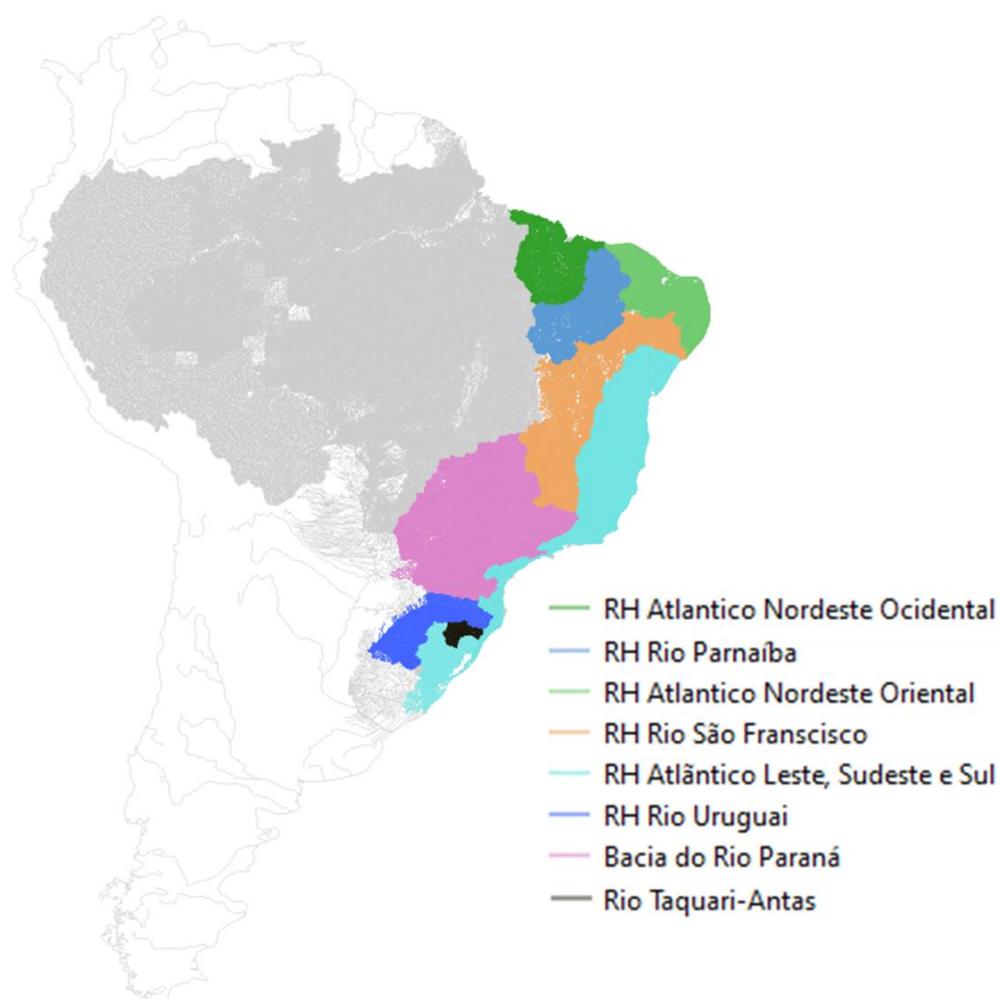


Figura 1. Áreas de teste de execução do pghHGM pela equipe do IPH

Tabela 2 Lista de bacias onde o pghHGM foi aplicado

Banco de dados pgHydro	Bacia ou Região Hidrográfica	Quantidade de feições e área total	Maior área de drenagem
Taquari-Antas	Taquari-Antas	1.503 feições 26.412 km ²	26.412 km ²
Paraná	Paraná	47165 feições 900.072 km ²	900.072 km ²
Costa Sul até Rio Itajaí (SC)	Atlântico Sul	9761 feições 208.519 km ²	82.492 km ²
Ao norte do Rio Itajaí até antes do Rio Paraíba do Sul	Atlântico Sul Atlântico Sudeste	3577 feições 61.177 km ²	24.232 km ²
Bacia do Rio Paraíba do Sul até Rio São Francisco	Atlântico Sudeste Atlântico Leste	60305 feições 1.185.520 km ²	635.180 km ²
Atlântico Nordeste	Atlântico Nordeste Oriental Paranaíba Atlântico Nordeste Ocidental	43846 feições 890.202 km ²	328.990 km ²
Uruguai	Uruguai	9.479 feições 204.485 km ²	204.485 km ²

Para testar estas aplicações do pghHGM para a BHAÉ foram selecionadas duas bacias (Figura 2). Uma bacia relativamente pequena que é a bacia do rio Taquari-Antas (26.412km²) localizada no Rio Grande do Sul com 1503 trechos de drenagem de BHAÉ. A segunda bacia escolhida foi uma bacia relativamente grande, a bacia do Rio Paraná dentro do território brasileiro (900.072km²), com 47165 trechos de drenagem da BHAÉ.

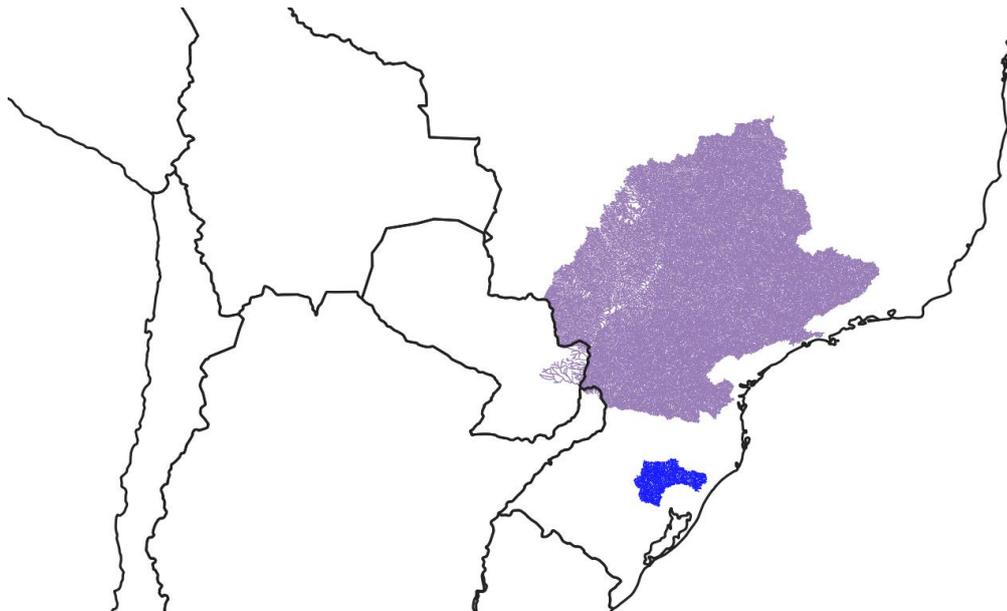


Figura 2. Áreas de teste de aplicação do pghHGM na BHA.

6.2. Resultados da aplicação para a bacia do Taquari-Antas

A aplicação para a bacia do rio Taquari-Antas (Figura 3) foi conduzida com sucesso, gerando os parâmetros hidro-geo-morfológicos para toda a bacia. Na Figura 4 são apresentados os resultados de fator de forma calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho. A Figura 5 mostra o mesmo resultado, porém usando a função de Schumm para estimativa de dados da bacia.

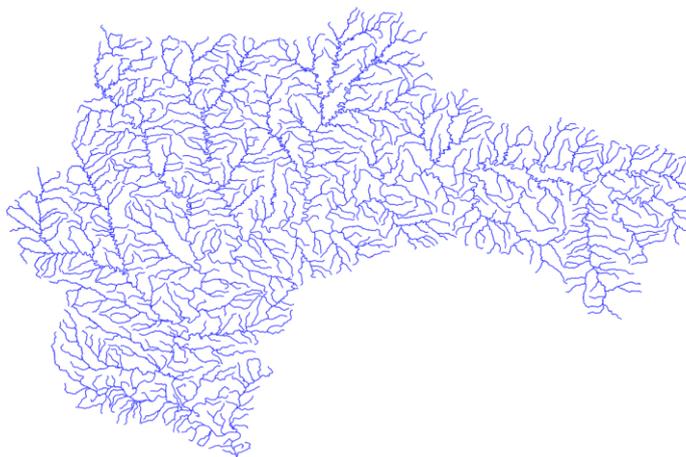


Figura 3. Hidrografia da BHA para a bacia do rio Taquari-Antas.

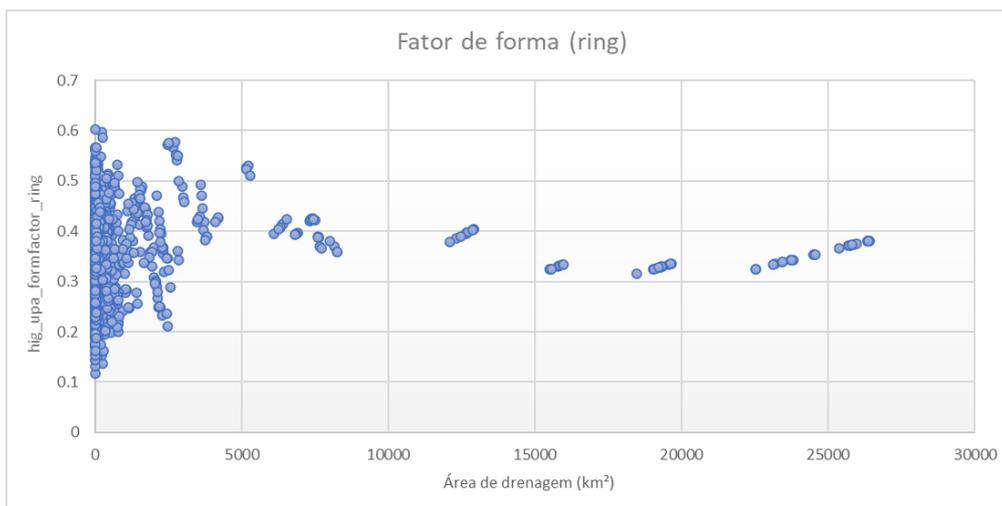


Figura 4. Aplicação para a bacia do Rio Taquari-Antas: fator de forma calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho.

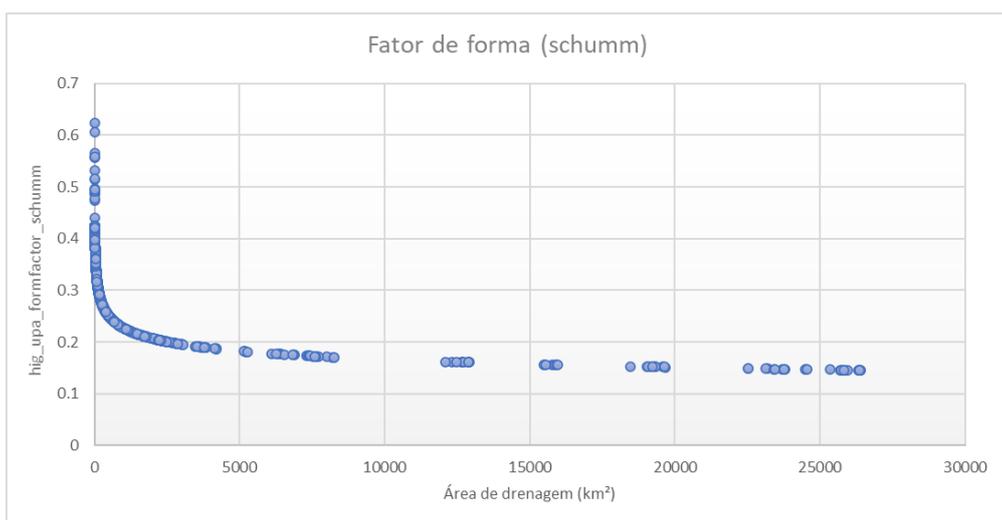


Figura 5. Aplicação para a bacia do Rio Taquari-Antas: fator de forma calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho, porém usando a função de Schumm para estimativa de dados da bacia.

Os resultados obtidos para as aplicações de fator de forma sugerem duas interpretações importantes de serem destacadas.

A primeira é que existe uma diferença entre os valores obtidos com os cálculos usando as funções geométricas no pghHGM (primeira figura), que se aproximaram de 0,4, em comparação com o uso da função de Schumm (segunda figura), que se aproximaram de 0,1. Como a função de Schumm é parametrizada e não foi desenvolvida para bacias brasileiras, esta comparação sugere que provavelmente ela é inadequada

para esta aplicação. Com a rodada do pghHGM para toda a BHAE poderia-se pensar no desenvolvimento de funções similares a de Schumm para um contexto brasileiro.

A segunda interpretação diz respeito aos valores obtidos. Na literatura hidro-geomorfológica é sugerido que o fator de forma $<0,78$ é típico de bacias alongadas e o fator de forma $>0,78$ é típico de bacias circulares. As bacias alongadas seriam bacias hidrográficas com maior duração do tempo de propagação de cheias, enquanto as bacias circulares seriam bacias com propagação mais rápida e subidas mais rápidas dos picos de cheia. Os valores calculados para a bacia do Rio Taquari-Antas foram na ordem de 0,3 a 0,4 para as maiores áreas de drenagem dentro da bacia do Taquari-Antas usando as funções programadas que operam sobre as geometrias das bacias da BHAE. Estas seriam características típicas de bacias alongadas e de subida mais lenta dos picos de cheia. Todavia, sabe-se que a bacia hidrográfica do Taquari-Antas provavelmente é uma das bacias brasileiras com maior e mais rápida subida dos níveis de água dos rios nos seus trechos de jusante do Brasil, com velocidades de subida da ordem de 0,25m/h a 1,00m/h conforme registros recentes (Collischonn et al., 2020; Giordani, 2021; Laipelt et al., 2023). Assim, este indicador de fator de forma não representa adequadamente a situação da bacia no que tange a velocidade de subida de ondas de cheia.

A Figura 6, por sua vez, apresenta os resultados de tempo de concentração calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho.

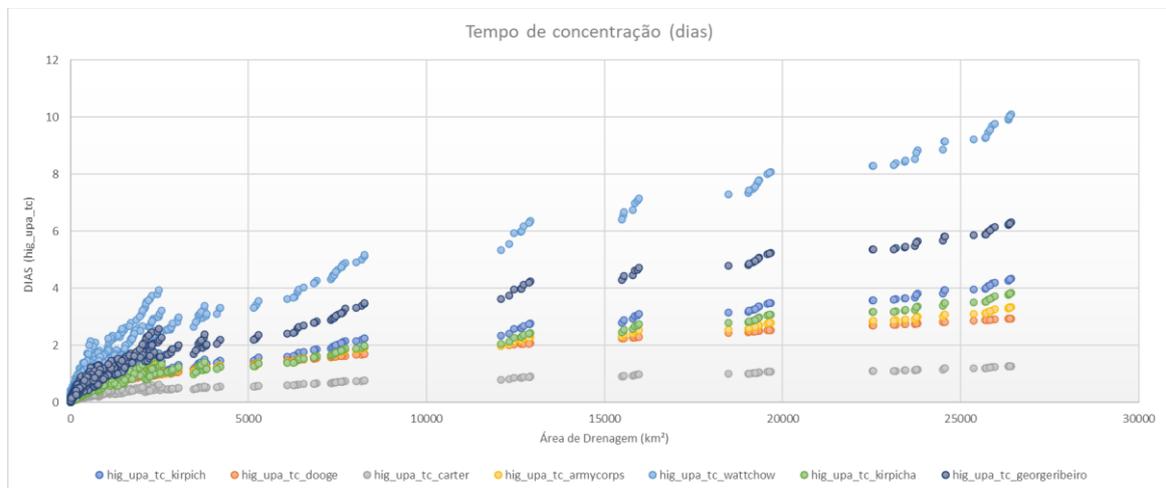


Figura 6. Aplicação para bacia do Taquari-Antas: tempos de concentração calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho.

Os resultados de tempo de concentração apresentados foram calculados utilizando todas as equações programadas no pghHGM. Para as áreas de drenagem maiores os valores ficaram na faixa de 1 a até 10 dias de tempo de concentração. Nenhuma das equações é sugerida para áreas de drenagem muito grandes, por

extrapolar seus limites de desenvolvimento. Todavia, os resultados são gerados pelo pghHGM e sua inspeção pode sugerir utilidade dos valores obtidos.

No caso da aplicação, trabalhos anteriores (Collischonn et al., 2020) mostraram que a bacia do rio Taquari-Antas possui tempos de propagação de ondas de cheia na ordem de 1 a 2 dias para as suas áreas mais de jusante. Estes valores coadunam com os resultados obtidos para as equações, principalmente, de Carter e de Dooge para a bacia.

6.3. Resultados da aplicação para a bacia do Rio Paraná

A aplicação para a bacia do Rio Paraná (Figura 7) foi conduzida com sucesso, gerando os parâmetros hidro-geo-morfológicos para toda a bacia. Assim como foi feito para a bacia anterior, na Figura 8 são apresentados os resultados de fator de forma calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho. A Figura 9 mostra o mesmo resultado, porém usando a função de Schumm para estimativa de dados da bacia.

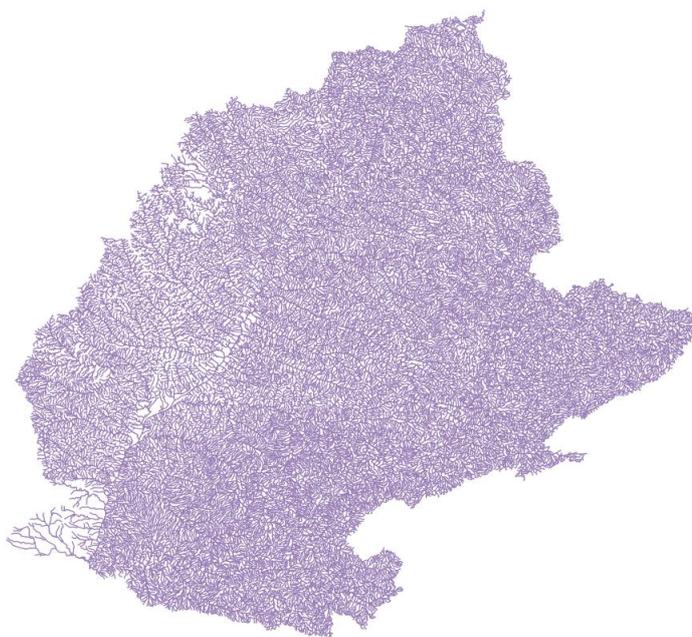


Figura 7. Hidrografia da BHAÉ para a bacia do rio Paraná.

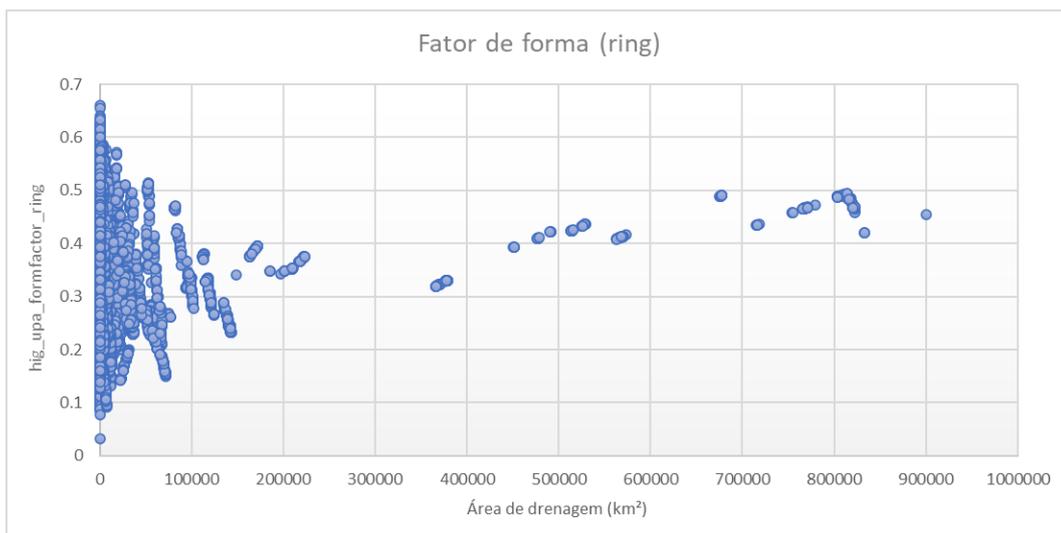


Figura 8. Aplicação para a bacia do Rio Paraná: fator de forma calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho.

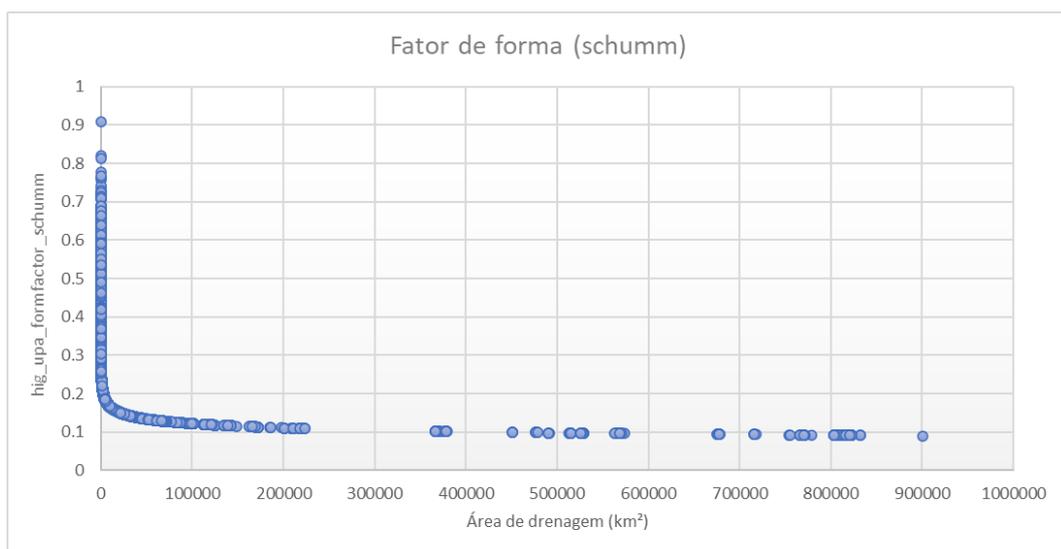


Figura 9. Aplicação para a bacia do Rio Paraná: fator de forma calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho, porém usando a função de Schumm para estimativa de dados da bacia.

Analogamente ao que foi observado na aplicação para a bacia anterior, notou-se na aplicação para a bacia do Rio Paraná uma diferença entre os valores obtidos com o uso de cálculos geométricos no pghHGM, em comparação com a função de Schumm. Com a rodada do pghHGM para toda a BHAE poderia-se pensar no desenvolvimento de funções similares a de Schumm para um contexto brasileiro.

Já em relação a interpretação dos valores para a bacia, nota-se que nos resultados usando as funções geométricas do pghHGM os valores se aproximaram para uma faixa entre 0,3 e 0,4 nas áreas até 400.000km² e depois subiram para uma faixa na ordem de 0,4 a 0,5 para áreas de drenagem maiores. Este resultado sugere que, conforme percorre-se para jusante a bacia do Paraná, aumentando a área de drenagem, a bacia tende a ter formato mais arredondado quando é ultrapassado o limiar de cerca de 400.000km².

A Figura 10, por sua vez, apresenta os resultados de tempo de concentração calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho.

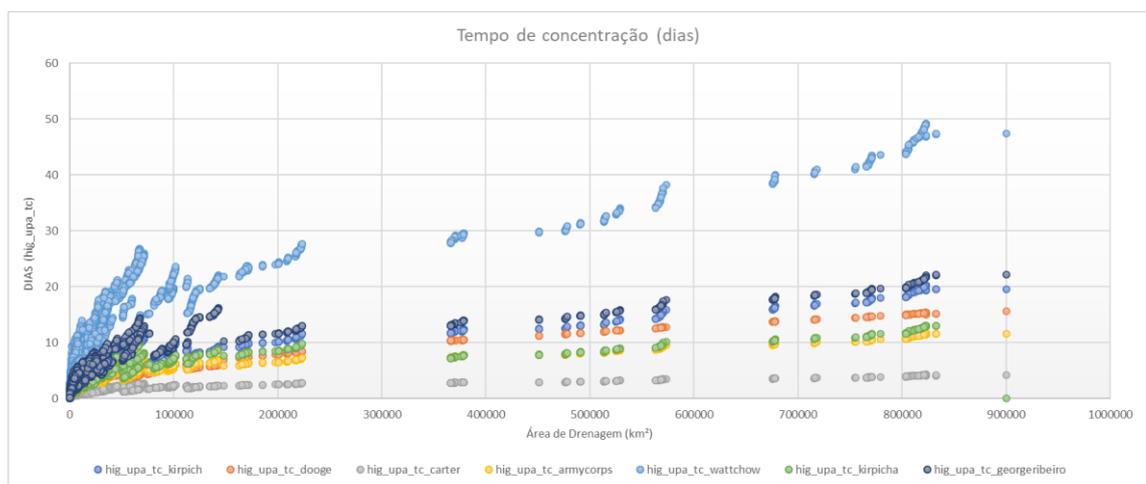


Figura 10. Aplicação para bacia do Taquari-Antas: tempos de concentração calculados para todas as áreas de montante dos trechos versus a área de drenagem de montante de cada trecho.

Novamente os resultados de tempo de concentração apresentados foram calculados utilizando todas as equações programadas no pghHGM. Para as áreas de drenagem maiores os valores ficaram na faixa de 1 a até 50 dias de tempo de concentração. Nenhuma das equações é sugerida para áreas de drenagem muito grandes, por extrapolar seus limites de desenvolvimento. Todavia, os resultados são gerados pelo pghHGM e sua inspeção pode sugerir utilidade dos valores obtidos.

A equação de Wattchow, além de um limite superior, mostrou-se muito distinta das demais em termos de ordem de grandeza.

No caso da aplicação, trabalhos anteriores (Lisboa et al., 2015) mostraram que a bacia do rio Paraná usada em sistemas de previsão possui tempos de propagação de ondas de cheia na ordem de 10 a 12 dias até a UHE de Itaipu. Estes valores coadunam com os resultados obtidos para as equações, principalmente, de Dooge e Kirpich.

6.4. Discussões

Comparados os resultados de tempo de concentração nota-se que geralmente a equação de Wattchow possui um comportamento anômalo em relação às demais, ao mostrar valores mais elevados de tempo de concentração quanto maior a área das bacias. As demais equações apresentaram valores em geral com a mesma ordem de grandeza para todas as áreas testadas, sendo que a equação de Carter sempre apresentou valores comparativamente ligeiramente menores.

Nas duas aplicações as equações de Dooge mostraram razoavelmente comparáveis a resultados da literatura. Este pode ser um indicativo da possibilidade de uso desta equação para aplicações de grande escala. Sugere-se testes comparativos entre estes resultados e os resultados mostrados em Petry et al. (2023).

No mais, as aplicações testadas foram bem sucedidas, mostrando tanto que o software desenvolvido funciona apropriadamente quanto o potencial de uso de seus resultados.

6.5. Base de atributos hidrogeomorfométricos nacional

Por fim, a equipe da ANA testou e fez a aplicação do pghHGM na escala nacional, sendo produzida a base de atributos hidrogeomorfométricos na mesma base hidrográfica da BHAE (trecho de drenagem e área de contribuição local). A BHAE possui cerca de 460 mil feições.

A base calculada inclui cerca de 140 novos atributos relacionados a forma geométrica, estatísticas de elevações, estimativas de larguras e profundidades, tempos de concentração das bacias hidrográficas e trechos, na escala local e a montante. Maiores detalhes sobre os atributos são apresentados no Manual Técnico (Sorribas et al. 2024).

A seguir ilustra-se alguns atributos calculados, derivados de dados do modelo digital de elevação e aspectos geométricos da bacia, tal como a razão de relevo (Figura 11); o tempo de concentração que utiliza as declividades, a largura de rios derivada de relações geomorfológicas (Figura 12); e celeridades (i.e., velocidade de propagação de onda) que são obtidas a partir da combinação de atributos hidráulicos estimados em cada trecho de drenagem (Figura 13)

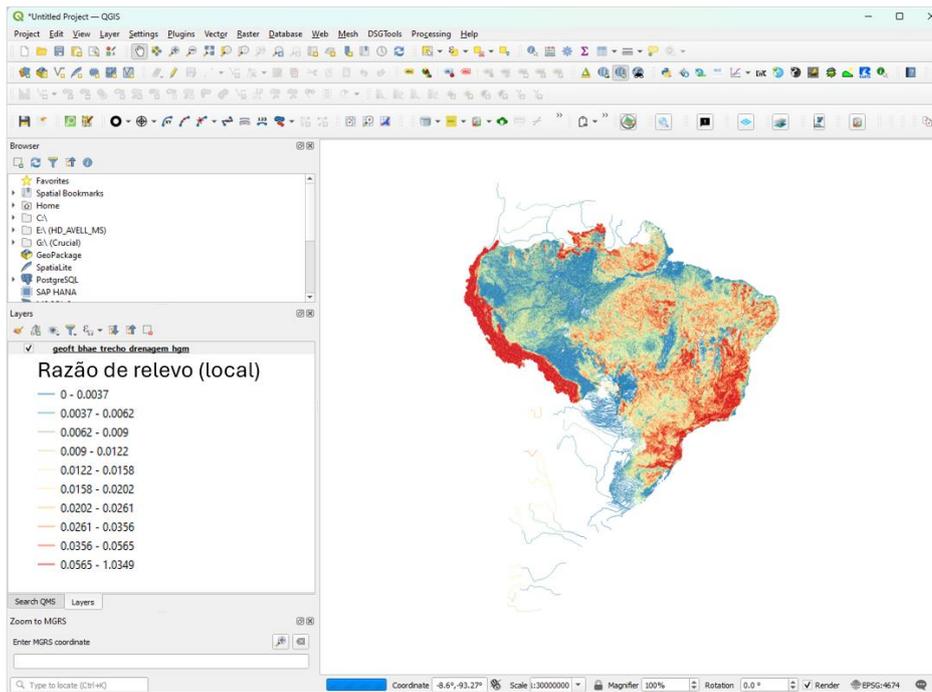


Figura 11. Exemplo do atributo Razão de Relevo, em área de contribuição local, obtido com o pghHGM na BHAÉ

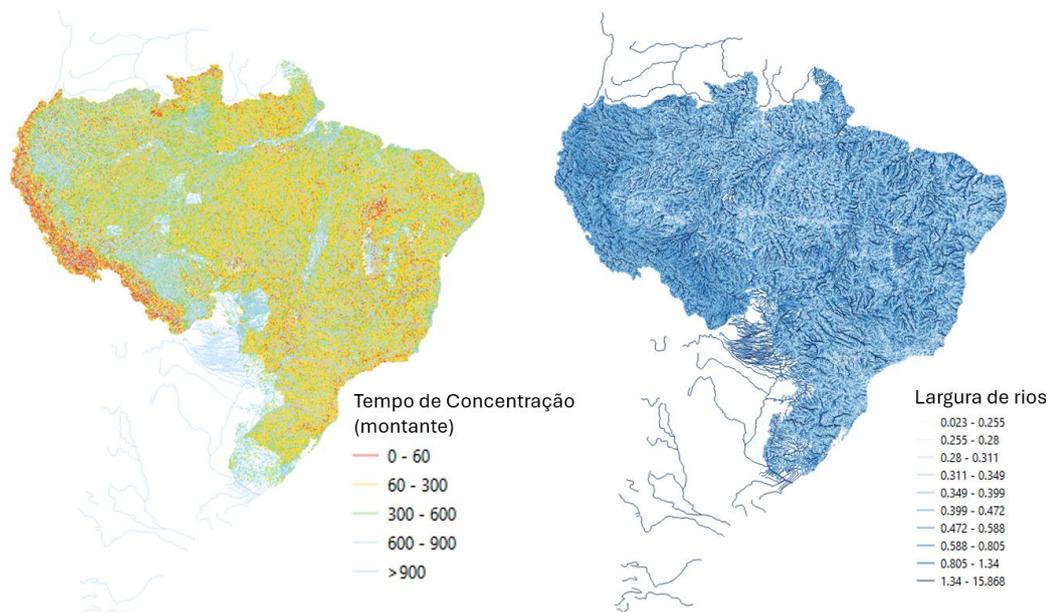


Figura 12. Exemplo dos atributos tempo de concentração (Kirpich) e largura dos rios obtidos com o pghHGM na BHAÉ

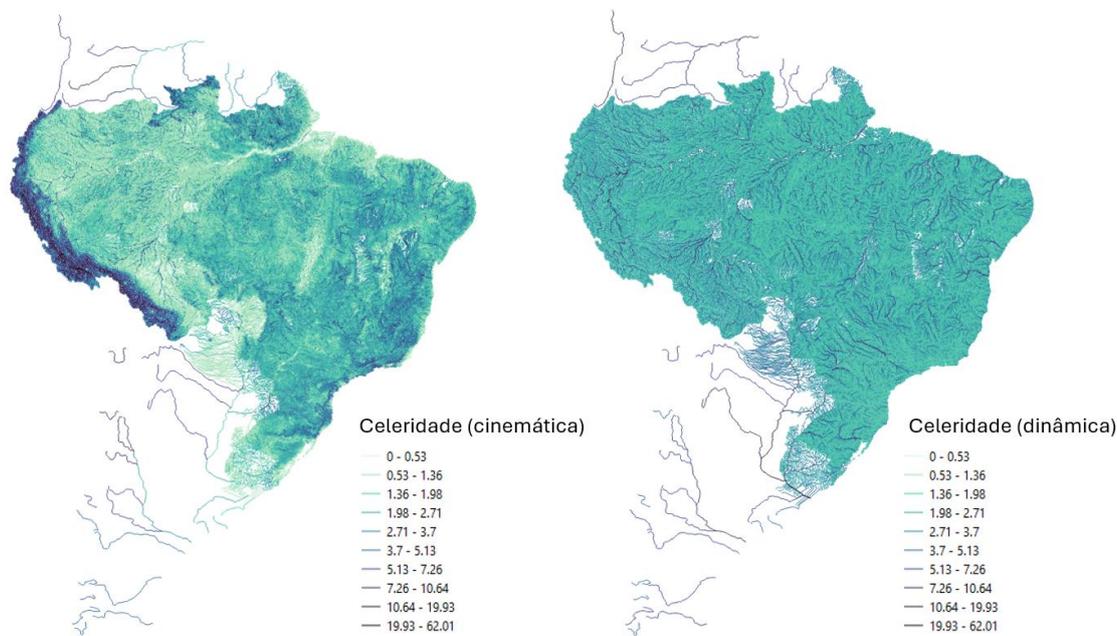


Figura 13. Exemplo dos atributos celeridade cinemática e dinâmica obtidos com o pghHGM na BHAÉ

7. Lista de atualizações do pghHGM

A extensão pghHGM apresentada neste relatório contempla diversas atualizações, decorrente de reuniões, orientações e decisões realizadas entre o IPH e ANA, desde a versão 2.2.3 finalizada em novembro de 2023.

7.1. Versão 2.0.2

A versão 2.0.2 (abr/2023) teve as principais atualizações a seguir:

- Atualização de nomenclaturas:
 - “altitude → elevation”
 - “altdrop” e “drop_” → “elevationdrop_”
 - “avgdistancetoboundary” → “avglengthoverlandflow”
 - “wave_travel_river” → “wave_travel_kinematic”
- Inclusão de wave_travel_dynamic
- Correção da função do comprimento axial de áreas a montante
- Inclusão de funções de comprimento axial, assumindo igual ao comprimento do rio (i.e. “_river”), para execução de testes de metodologia
- Correção da eq. do US Army Corps para o tc em área local (dra)
- Correção da eq. US Army Corps para o tc em área a montante (upa)

- Sinuosidade do trecho foi movido de hig_dra_ss para hig_drn_ss
- Sinuosidade do rio principal foi movido de hig_upa_ss para hig_upn_ss
- Inclusão da coluna geometria de rio principal (hig_upn_gm) na tabela de inteligência, para operações “online”
- Inclusão da coluna geometria e área a montante (hig_upa_gm) na tabela de inteligência, para operações “online”
- Atualização de função de cálculo de atributos à montante para duas versões:
 - pghfn_calculate_upa_offline, faz a consulta+merge a montante “on-the-fly” – importante para consulta “point-and-click”
 - pghfn_calculate_upa_online, faz a consulta upa_gm e upn_gm direto pela tabela - importante para evitar repetição de consultas e merge de geometrias a montante.
- Revisão/atualização do calculate_test_main para “calculate_main”
- Primeira inclusão de shape factor *versus* form factor, incluindo duas possibilidades. No entanto, isso será revisado para melhor conformidade com artigo recente Sener M & Arslanoglu MC (2023) Morphometric analysis in Google Earth Engine: An online interactive web-based application for global-scale analysis. Environmental Modelling and Software 162 (2023).
- Atualização de scripts para compatibilidade com Postgres10+
- Atualização de scripts para compatibilidade e pgh_hgm.control com PostGIS 3+

7.2. Versão 2.0.3

A versão 2.0.3 (mai/2023) teve as principais atualizações a seguir:

- Atualização de nomenclaturas de argumentos “target_xxx_pk” para “dra_pk_”
- Atualização de nomenclaturas de funções para formato _dra_, removendo as consultas por drn_pk.
- Atualização de todas as funções e consultas de target_drn_pk para dra_pk_, conforme sugerido
- Inclusão do pgh_raster 6.6 como extensão formal

7.3. Versão 2.1

A versão 2.1 (jun/2023) teve as principais atualizações a seguir:

- Correção de menores nos algoritmos de declividades: ponderada e harmônica
- Correção da unidade da área de drenagem para m² no modelo de Jobson

- Alteração da vazão de evento do modelo de Jobson “padrão” de 10% para 100% da vazão anual média
- Atualização do nome das funções removendo segunda parte do prefixo, por exemplo, pghfn_dra_drn_<atributo> para pghfn_dra_ atributo>, pois as consultas desde a 2.0.3 são feitas pelo dra_pk
- Consideração de descrições de índices do artigo recente de Sener et al. (2023), especificamente:
 - Atualização do gradiente do canal, para utilizar declividade max-min
 - Inclusão da equação do Schumm para cálculo de comprimento axial
 - Atualização do cálculo do fator de relevo para bacias, ao invés de fazer por trecho de drenagem:
 - Desenvolvimento e inclusão de script de consulta e extração do DEM por polígono de bacia
 - Desenvolvimento e inclusão o cálculo do índice para bacia local e a montante
- Inclusão de estatísticas do DEM para os recortes de bacia, _dra_elevations, _upa_elevations.
- Inclusão de cálculos “bônus” com alternativas para a estimativa de comprimento axial – Schumm, geometria da bacia, geometria da bacia + exutório, comprimento do rio – e nos índices derivados como fator de forma e razão de relevo.
- Inclusão preliminar de funções “calculate” separadas para cada índice
- Inclusão de funções para inicialização “default” (hydraulics, jobson)
- Inclusão de funções e atributos para cálculo de declividade com todos os métodos para o rio principal (upn)
- Inclusão de funções e atributos para cálculo de desnível “equivalente” (i.e. harmônica, ponderada e regressão) para os trechos de drenagem
- Criação do script “verifica_pgh_hgm.sql”
- Descontinuidade no desenvolvimento de funções “offline” para bacias e trechos a montante, agora assume-se o armazenamento prévio em upa_gm e upn_gm, bem como dos perfis de elevação pghft_upn_elevationprofile
 - As únicas exceções permitidas são o cálculo de declividade max-min, necessário para o gradiente de canal
 - No futuro, considerar alterar o nome das funções _tmp_
 - No futuro, considerar armazenar elevation_stats em uma tabela.

7.4. Versão 2.2 (jul/2023)

A versão 2.2 (jun/2023) teve as principais atualizações a seguir:

- A função `pghfn_create_tables()` foi removida e armazenada diretamente no `.SQL` da extensão
- Atualização de funções de `calculate_main` e `calculate_main_upa`
 - Inclusão de `SRID` de área e trecho nos argumentos
- Revisão de funções de `calculate` individualizados
 - Remoção do “checkbounds”
 - Remoção de `ilower` e `iupper` para controle de loop do `dra_pk` -agora faz para todos
 - Inclusão de `SRID` de área e trecho nos argumentos
 - Atualização dos filtros de cabeceira e linha de costa
 - Remoção de funções de filtragem por `strahler` e curso d’água para restringir as operações (`pghfn_utils_isheadwater` e `pghfn_utils_isnotwtc`)
 - Inclusão de filtros `WHERE` para `hig_drn_strahler` e `hig_wtc_pk` para restringir as operações
- Inclusão do `dra_pk` no argumento e filtro de `WHERE` nas funções de consulta nas tabelas de `elevation profile` temporárias, para resolver os `calculates` individualizados
- Agora é possível e necessário armazenar perfis de elevação de diferentes “`dra_pk`” nas tabelas de `elevationprofile`
- Atualização de `pghfn_utils_tmp_elevprof_getinsert` para gestão das tabelas de perfil de elevações
 - Remoção do `TRUNCATE` em
 - Inclusão de `DELETE WHERE dra_pk = dra_pk_`
- Inclusão da função `pghfn_utils_tmp_elevprof_delete`, que deve substituir a `pghfn_utils_tmp_elevprof_truncate`, essa última não é mais recomendada.
- Revisão e padronização de identações e cabeçalhos das funções
- `pghfn_utils_create_albers` -> `pghfn_utils_srid_create_albers`
- `pghfn_utils_export_table` -> `pghfn_utils_table_export`
- Revisão da função de `union/merge` dos polígonos de bacias, considerando a extração do exterior ring.

7.5. Versão 2.2.1 (ago/2023)

- Tratamento de recorte `ST_CLIP` do MDE quando o valor de `NODATA` não é fornecido, assumindo -9999 internamente
- Criação de função para gerenciamento de índices `pghfn_utils_index_dropcreate`
- Atualização de todas as funções “`calculate`” com chamadas para função de indexação mencionada antes.

- Agora os atributos de desnível “elevationdrop” são estimados a partir da multiplicação entre declividade e comprimento do rio, criando essa dependência. Assim, as funções novas abaixo:
 - 'pghfn_drn_elevationprofiledrop_from_slopes' para o desnível baseado nas declividades armazenadas na tabela pghft_hydro_intel
 - 'pghfn_upn_elevationprofiledrop_from_slopes' para o desnível baseado nas declividades armazenadas na tabela pghft_hydro_intel
- Atualização as funções de “calculate” de desnível para utilizar as funções 'elevationprofiledrop_from_slope'
- Remoção das funções com o algoritmo de cálculo explícito do 'elevationdrop', ou seja, a declividade pré-calculada agora é um requisito.
- Correção pequena na função calculate_upa_timeofconcentration
- Revisão do cálculo de declividades harmônicas, embora não resolve as dificuldades limitações e dificuldades inerentes a aplicação no MDE

7.6. Versão 2.2.2 (set/2023)

Nessa versão ocorreram a inclusão de algumas dependências para reduzir o custo computacional:

- A função para dra_reach_gradient agora aplica somente a conversão a partir da declividade drn_slopemaxmin que deve estar armazenada na pghft_hydro_intel
- A função para upa_reach_gradient agora aplica somente a conversão a partir da declividade upn_slopemaxmin que deve estar armazenada na pghft_hydro_intel
- A função dra_reliefratio utiliza o atributo dra_elevationdrop que deve estar armazenado na pghft_hydro_intel, pois a consulta já é realizada em dra_elevation_stats
- A função upa_reliefratio utiliza o atributo upa_elevationdrop que deve estar armazenado na pghft_hydro_intel, pois a consulta já é realizada em upa_elevation_stats
- As funções “bonus” para cálculo de reliefratio também dependem dos atributos pré-calculados e armazenados (dra_elevationdrop ou upa_elevationdrop)
- Correção de saída NULL na função de calculate_slope_harmonic, pois estava atribuindo o UPDATE de maneira equivocada
- Criação de uma função para exportar os resultados em 'geoft_bho_hgm' (substituída por uma VIEW, após discussão)
- Novo cálculo de comprimentos de trecho a montante (upn_length) com orientações e lógica fornecida pela ANA e utilizando atributos já existentes wtc.wtc_gm_length, drn.drn_nu_distancetowatercourse e drn.drn_nu_distancetosea
- Criação de uma VIEW para exportar os resultados em 'geoft_bho_hgm' (substituída em 2.2.3 por uma VIEW)

- Criação de atributos, funções e calculates para o tempo e concentração de Kirpich utilizando o desnível da bacia, utilizando o nome 'kirpicha'
- Correção da atribuição da largura e no UPDATE de pghfn_utils_drn_hydraulics_defaults
-

7.7. Versão 2.2.3 (out/2023)

- Atualização de comandos SET/UPDATE que não estava funcionando para "wave_travel_kinematic", "amhg_depth" e "amhg_width"
- Inclusão de equações de tempo de concentração (manual do DNIT), atributos e funções relacionadas

7.8. Versão 2.2.4 (jan-fev/2024)

- Inclusão de filtro de linha de costa ('hig_wtc_pk IS NOT NULL') nas funções_utils_drn_defaults e _utils_upn_defaults
- Inclusão de condição IF nas funções de pré-procossamento para ignorar linhas de costa
- Inclusão de condição NULLIF para evitar problema de divisão por zero, em casos espúrios de perfil de elevação com ponto único ou comprimento nulo, i.e., /NULLIF(MAX(xy),0) em todas as funções de declividade
- Inclusão de função 'pgh_hgm.pghfn_calculate_upa_elevations_stats_agg()' para cálculo de estatísticas de elevação upa, partir da agregação para jusante de elevações dra previamente calculadas.
- Atualização do tutorial

7.9. Versão 2.3 (mar-abr/2024)

- Aprimoramento de funções de estatísticas de elevações utilizando ST_SummaryAgg()
- Inclusão de funções para obter e atualizar elevações a partir o PointOnSurface em bacias onde o ST_CLIP falhou, por serem muito pequenas. Essa etapa deve ser executada depois da rodada normal de elevações. Atualização do tutorial com essa etapa.
- Revisão final

8. Considerações Finais

Este relatório apresentou o relato de finalização do subprojeto “*Novas bases de dados hidrológicas para a BHO*” resultante 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.

Foram apresentadas as etapas finais de desenvolvimento da ferramenta e aplicação para a base hidrográfica de referência.

As aplicações testadas foram bem-sucedidas, mostrando tanto que o software desenvolvido funciona apropriadamente quanto o potencial de uso de seus resultados. A aplicação das ferramentas pela equipe do ANA foi realizada de maneira satisfatória, permitindo a validação e consolidação da versão do pghGM na BHAE.

9. Referências

Collischonn W, Fan FM, Fleischmann AS et al. (2020) Análise da antecedência mínima necessária para previsões de inundações em lajeado no rio taquari (RS). Em: Anais do II Encontro Nacional de Desastres (II END), 2020, Rio de Janeiro. Porto Alegre - RS: ABRHIDRO.

Fan FM, Sorribas MV, Alves ME, Lima SG, Paiva RCD (2023) Relatório Parcial 2 - Subprojeto Base de dados Hidrológicas e BHO.

Garcez LN, Alvarez GA. (1998) Hidrologia. São Paulo: Edgard Blücher.

Giordani B (2021) Uso de dados não sistemáticos para calibração hidrodinâmica do modelo MGB: estudo de caso da região do Vale do Rio Taquari (RS) para a inundação de julho de 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre.

Laipelt, L. et al. (2023) Mancha de inundação ocasionada pela cheia do Rio Taquari-Antas (Set2023) via simulação hidrodinâmica. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/wp-content/uploads/2023/12/Nota-Tecnica-Simulacao-da-mancha-de-inundacao-Rio-Taquari-Antas2.pdf>

Lisboa, AMV, Gomes G, Fan FM, Collischonn W, Tucci CEM (2015) Uso del modelo MGB en la predicción de caudales en Itaipú. Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, v. 20, p. 189-203.

Petry I, Fan FM, Siqueira VA, Collischonn W, Paiva RCD (2022) Predictability of daily streamflow for the great rivers of South America based on a simple metric. Hydrological Sciences Journal, v. online, p. 1-53.

Sorribas MV, Lima SG, Alves ME, Fan FM, Paiva RCD (2024) Manual Técnico sobre Novos Parâmetros Hidrológicos no Desenvolvimento de Bases de Dados para Bases Hidrográficas Ottocodificadas no pgHydro

TUCCI, C. E. (1998). *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS.