



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE RONDÔNIA

**HÉRCULYS PESSOA E CASTRO**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE VAZÕES DO RIO MADEIRA  
PARA GESTÃO DE RISCO EM EVENTOS DE CHEIA:  
aplicações do MGB-IPH com apoio de ferramenta VBA**

Ji-Paraná  
2022

**PROFÁGUA - MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE  
NACIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS**



*Campus Ji-Paraná*

**HÉRCULYS PESSOA E CASTRO**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE VAZÕES DO RIO MADEIRA  
PARA GESTÃO DE RISCO EM EVENTOS DE CHEIA:  
aplicações do MGB-IPH com apoio de ferramenta VBA**

Dissertação apresentada ao PROFÁGUA – Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação Dos Recursos Hídricos, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos.

Área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos

Linha de pesquisa: Segurança hídrica e usos múltiplos da água

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nara Luísa Reis de Andrade

Catálogo da Publicação na Fonte  
Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR

---

C355m Castro, Hérculys Pessoa e.  
Modelagem matemática de vazões do Rio Madeira para gestão de risco em eventos de cheia: aplicações do MGB-IPH com apoio de ferramenta VBA / Hérculys Pessoa e Castro. - Ji-Paraná, 2022.

92 f.: il.

Orientador: Profª Drª Nara Luísa Reis de Andrade.

Dissertação (Mestrado) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Campus Ji-Paraná, Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, 2022.

1. Bacia Amazônica. 2. Modelo de Grandes Bacias. 3. Excel. I. Andrade, Nara Luísa Reis de. II. Título.

Biblioteca de Ji-Paraná

CDU 556

---

Bibliotecário(a) Bruno Crespo Soares

CRB-11/1151



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

### FOLHA DE APROVAÇÃO DE DEFESA DE MESTRADO

Título da Dissertação: **MODELAGEM MATEMÁTICA DE VAZÕES DO RIO MADEIRA PARA GESTÃO DE RISCO EM EVENTOS DE CHEIA: aplicações do MGB-IPH com apoio de ferramenta VBA**

Autor: **HERCULYS PESSOA E CASTRO**

Orientadora: **Profa. Dra. Nara Luísa Reis de Andrade**

A presente dissertação foi aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos, pela Comissão examinadora:

Prof.ª Dr.ª Nara Luísa Reis De Andrade – Prof.ªgua/UNIR  
Orientadora (Presidente)

Prof.ª Dr.ª Ana Cristina Santos Strava Correa – Prof.ªgua/ANA  
Membro interno

Prof. Dr. Artur José Soares Matos - SGB  
Membro externo

Ji-Paraná-RO, 04 de OUTUBRO de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **NARA LUISA REIS DE ANDRADE, Coordenador(a), Substituto**, em 04/10/2022, às 13:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Artur Jose Soares Matos, Usuário Externo**, em 04/10/2022, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Cristina Strava Correa, Usuário Externo**, em 17/10/2022, às 21:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.unir.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.unir.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1124294** e o código CRC **BF817E9F**.



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Cauã Souza Castro, para o qual eu não pude dedicar mais tempo nestes últimos três anos. Meu filho, papai te ama e, ao final desta jornada, minha maior realização é poder estar com você de forma plena.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela inspiração e perseverança concedida a mim quase como um milagre. Não consigo encontrar outra explicação para ter conseguido finalizar este trabalho que não seja a iluminação do Espírito Santo.

Agradeço a minha família, meus filhos Cauã e Davi, minha esposa Cristiana e meu pai Adelmo Castro, pelo apoio, compreensão e força para a realização do mestrado.

Agradeço ao apoio dos meus amigos e colegas do mestrado, Fredi, Mariana e Giulle.

Agradeço a minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nara Andrade, pela paciência que teve comigo e à Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Strava, por ter me dado esperança quando eu pensei em desistir.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcio Moraes por ter feito o download dos dados do ERA 5 utilizados neste trabalho, bem como ao Dr. Vinícius Siqueira por ter fornecido dados e orientações quando eu ainda estava iniciando o entendimento sobre o MGB.

Agradeço ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM como instituição e em especial agradeço à Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial, Alice Castilho, ao chefe do Departamento de Hidrologia, Frederico Peixinho, e à representante do DEHID na Comissão Técnico Científica da CPRM, Mariana Villas Boas.

Por fim, agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015. Ao campus Ji-Paraná da Fundação Universidade Federal de Rondônia.

## RESUMO

O ciclo anual de cheia do rio Madeira traz potenciais danos socioeconômicos aos estados de Rondônia e Acre, tendo este trabalho o objetivo de fornecer ferramentas para auxiliar na gestão de risco em eventos extremos de cheia no rio Madeira, por meio de caracterização da região e calibração do Modelo de Grandes Bacias (MGB) para a bacia hidrográfica a montante de Porto Velho. Foram realizadas 12 simulações que variaram entre dois tipos de Modelo Digital de Elevação (MDE), Bare-Earth, com resolução de 500 metros e HidroSHETS, com resolução de 90 metros; dois métodos de propagação de vazão, Muskingum-Cunge e Modelo Inercial Local; e três grupos de parâmetros de calibração, os utilizados no produto South America Simulated River Discharge Dataset e suas otimizações baseadas no algoritmo MOCOM-UA para funções objetivo de Nash-Sutcliffe e porcentagem de erro de volume. Também se utilizou uma pasta de trabalho do software Microsoft Excel, dotada de planilhas, sub-rotinas em Visual Basic for Applications (VBA), métricas de desempenho e gráficos, voltados para a avaliação de desempenho de simulações no período de cheias. Foi demonstrado que o referido modelo possui capacidade de representar as vazões do rio Madeira, bem como contribuir para compreensão da dinâmica da referida bacia hidrográfica e para fornecer informações que auxiliem na minimização dos efeitos de eventos extremos de cheia. Também foram identificados benefícios da utilização dos referidos códigos e planilhas, bem como disponibilizou-se um pacote de dados pré-processados para a bacia hidrográfica do rio Madeira desde suas nascentes andinas até a confluência com o rio Machado, que pode ser utilizado tanto no modo tradicional do MGB, através do QGis, quanto no modo alternativo, com as planilhas do Excel. Desta forma, este trabalho contribui para a tomada de decisão pelos órgãos gestores das águas e a deflagração de alertas às demais entidades responsáveis por ações mitigadoras, cumprindo um papel importante para o desenvolvimento sustentável e bem estar da população, sendo parte integrante do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, um dos instrumentos da PNRH, e tendo relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS/ONU) 01 (Erradicação da pobreza – 1.5) e 11 (Cidades e comunidades sustentáveis – 11.5 e 11b), dentre outros.

**Palavras-chave:** Bacia Amazônica, Modelo de Grandes Bacias, Excel

## ABSTRACT

The annual flood cycle of the Madeira River brings potential socioeconomic damages to the states of Rondônia and Acre, with the objective of providing tools to assist in the management of risk in extreme flood events in the Madeira River, through characterization of the region and calibration. of the Great Basin Model (GBM) for the upstream watershed of Porto Velho. Twelve simulations were performed that varied between two types of Digital Elevation Model (DEM), Bare-Earth, with a resolution of 500 meters and HidroSHETS, with a resolution of 90 meters; two flow propagation methods, Muskingum-Cunge and Local Inertial Model; and three groups of calibration parameters, those used in the South America Simulated River Discharge Dataset product and their optimizations based on the MOCOM-UA algorithm for Nash-Sutcliffe objective functions and volume error percentage. A Microsoft Excel software workbook was also used, equipped with spreadsheets, Visual Basic for Applications (VBA) subroutines, performance metrics and graphs, aimed at evaluating the performance of simulations during the flood period. It was demonstrated that the referred model has the capacity to represent the flows of the Madeira River, as well as to contribute to the understanding of the dynamics of the referred hydrographic basin and to provide information that helps to minimize the effects of extreme flood events. Benefits of using the aforementioned codes and spreadsheets were also identified, as well as a package of pre-processed data for the Madeira River watershed from its Andean sources to the confluence with the Machado River, which can be used both in of the MGB, through QGis, or in the alternative mode, with Excel spreadsheets. In this way, this work contributes to the decision-making by water management bodies and the triggering of alerts to other entities responsible for mitigating actions, fulfilling an important role for the sustainable development and well-being of the population, being an integral part of the Information System. on Water Resources, one of the PNRH instruments, and related to Sustainable Development Goals (ODS/UN) 01 (Poverty eradication – 1.5) and 11 (Sustainable cities and communities – 11.5 and 11b), among others.

**Keywords:** Amazon Watershed, Large Basins Model, Excel

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>POTENCIAL DESEMPENHO DO MGB PARA A SIMULAÇÃO DE CHEIAS NO RIO MADEIRA</b>	<b>7</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	8
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	10
2.2.1	Área de estudo.....	10
2.2.2	Modelo de Grandes Bacias.....	12
2.2.3	Geoprocessamento .....	16
2.2.4	Avaliação de desempenho.....	18
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
2.3.1	Geoprocessamento .....	24
2.3.2	Avaliação de desempenho.....	29
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	43
	REFERÊNCIAS.....	44
<b>3</b>	<b>UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE EXCEL PARA CALIBRAÇÃO DO MGB: ESTUDO DE CASO</b>	<b>51</b>
	<b>NO RIO MADEIRA .....</b>	<b>51</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	52
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	54
3.2.1	Área de estudos .....	54
3.2.2	Modelo de Grandes Bacias.....	55
3.2.3	Base de Dados.....	58
3.2.4	Aplicação no Excel.....	59
3.2.5	Avaliação da calibração do rio Madeira.....	61
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
3.3.1	Avaliação da calibração do rio Madeira.....	62
3.3.2	Comparação entre plataformas de calibração.....	74
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
	REFERÊNCIAS.....	81
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE A – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DE PLANILAS EM EXCEL ACOPLADAS AO</b>	
	<b>MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB-IPH).....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O ciclo anual de cheias do rio Madeira traz a possibilidade de alagação em núcleos populacionais ribeirinhos do Brasil e da Bolívia, bem como isolamento de vias de acesso terrestre à municípios do estado de Rondônia e ao estado do Acre, podendo acarretar em diversos danos socioeconômicos, conforme ocorreu na cheia histórica de 2014 (CGU, 2014; CORRÊA et al., 2016; OVANDO et al., 2016). Além disso, estudos como Marengo & Espinoza, 2016; Espinoza et al., 2019 e Souza et al., 2020 vêm indicando redistribuição de chuvas e intensificação de eventos extremos na região amazônica.

Por se tratar de um fenômeno natural e pela inviabilidade de intervenção através de barragens de contenção de cheia, devido ao grande impacto ambiental que isso causaria nas extensas planícies de inundação da região, não há medidas que possam neutralizar os impactos de eventos extremos. Há medidas mitigadoras que podem ser tomadas, como retirada da população de áreas susceptíveis, deslocamento de estruturas físicas de empresas para outros locais mais altos, alteamento de estradas, rebaixamento do nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas (UHE's Jirau e Santo Antônio) para que o remanso não contribua para o alagamento da BR-364, dentre outras. No entanto essas mitigações precisam de ferramentas que norteiem a tomada de decisão, com a antecedência mínima e na medida necessária.

O deslocamento de famílias e empresas sem necessidade gera impactos econômicos e sociais negativos, por outro lado a não retirada quando há um evento de cheia acima do normal, gera impactos ainda maiores. O mesmo raciocínio vale para as usinas hidroelétricas, rebaixamento dos reservatórios sem necessidade geram impactos negativos para o sistema elétrico nacional, tendo-se que compensar a energia que deixou de ser gerada pelas hidroelétricas com o aumento de produção por termoeletricas, já um rebaixamento que seria necessário e que não seja feito, pode gerar alagações indesejadas a montante ou acentuação do pico de vazão a jusante, se a água for liberada de forma abrupta.

Devido à essa problemática, todos os anos desde a grande cheia de 2014 é organizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a “Sala de Crise do Rio Madeira”, que consiste em reuniões periódicas para avaliar o cenário mais atual e possíveis ações para

mitigação dos efeitos da cheia, juntamente com a participação de órgãos e entidades públicas e privadas como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM-RO), Defesas civis estaduais e municipais de Rondônia e Acre, representantes das Hidroelétricas Jirau e Santo Antônio, dentre outros.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM), por sua vez, possui atualmente 17 Sistemas de Alerta Hidrológicos (SAH's) distribuídos em bacias hidrográficas brasileiras que enfrentam problemas com eventos críticos. O SAH do rio Madeira, atualmente, consiste no monitoramento e previsão de cotas através de dados em tempo real de equipamentos instalados em estações fluviométricas no território brasileiro, propiciando modelagens estatísticas de curto prazo por modelos cota-cota, bem como utiliza o modelo hidrológico chuva-vazão SMAP (modelo concentrado que utiliza a chuva média de toda a bacia hidrográfica), para previsões com horizonte de 15 dias, utilizando-se estimativas de chuvas do produto MERGE/INPE e previsão de chuvas por Ensemble com o modelo meteorológico GEFS (SANTOS et al., 2021).

O Rio Madeira, devido à sua internacionalidade, possui déficit de monitoramento fluviométrico na parte boliviana, onde não há o monitoramento de vazões em tempo real e/ou sua disponibilização nas plataformas digitais é muito defasada. Esta configuração restringe que modelos estatísticos de propagação de ondas de cheia baseados em estações a montante sejam aplicados apenas a partir de quando o rio Mamoré e Beni (formadores do rio Madeira) entrem em território brasileiro, algo que permite uma previsibilidade de 1 a 3 dias de antecedência para a cidade de Porto Velho (CORRÊA et al., 2016). Por outro lado, existem dados de precipitação estimada por satélite, que cobrem todo globo terrestre, indicando que um modelo chuva-vazão bem calibrado possa ser adequado para fornecer previsões de vazão com maior antecedência para a região.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta que permite aprofundar conhecimentos sobre a dinâmica da água em diversas partes da hidrosfera, sendo possível traçar cenários para a gestão de recursos hídricos, estando a região amazônica como área de estudo de diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo, na tentativa de compreender a dinâmica hidrológica e minimizar

os efeitos associados à ocorrência de eventos extremos (MARINHO FILHO et al. 2012, ALVES, 2018). Neste contexto, o Modelo de Grandes Bacias – MGB (COLLISCHONN, 2001) vem sendo aplicado na região amazônica em diversos trabalhos, devido à sua capacidade de representar as interações da água com o solo em grandes áreas com características heterogêneas, tanto na distribuição da precipitação como na fisiografia da bacia hidrográfica e sua cobertura do solo (RIBEIRO NETO, 2006; GETIRANA et al., 2010; PAIVA et al., 2012; PAIVA et al., 2013; CORREA et al. 2017; SIQUEIRA et al., 2017; SIQUEIRA et al; 2018; FLAISCHMANN et al. 2020).

Desde sua versão original o MGB utiliza a linguagem de programação em Fortran, sendo que nesta última década houve o acoplamento com Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), através dos softwares MapWindow GIS e Quantum GIS (FAN & COLLISCHONN, 2014; SIQUEIRA et al., 2016; PONTES et al., 2017; ALVES et al., 2020). Em sua versão mais atual são utilizadas ferramentas (“plugin”) acopladas ao software Quantum GIS, sendo elas o IPH-Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016) e o MGB 4.6, onde todo o pré-processamento é feito no primeiro plugin, que realiza a discretização da bacia hidrográfica e extração de características topográficas e de uso do solo, sendo o segundo plugin o responsável por ativar o executável em Fortran, responsável pelo cálculo hidrológico/hidrodinâmico. Esta última etapa também consegue ser realizada de forma paralela, por exemplo, através de rotinas em Visual Basic for Application (VBA) do software Microsoft Excel.

Por sua vez, softwares baseados em planilhas eletrônicas revolucionaram o mercado de informática na década de 60, sendo amplamente utilizados até os dias atuais por profissionais que tenham no seu trabalho a necessidade de efetuar cálculos financeiros, estatísticos ou científicos (SILVA & SANTOS, 2015; OLIVEIRA, 2019). O software Microsoft Excel está caracterizado como um dos mais importantes aplicativos para uso em microcomputadores, sendo o líder de mercado entre as planilhas eletrônicas desde os anos 90 até os dias atuais, onde em 2005 detinha de 80 a 90% do mercado deste tipo de software, tornando comum o seu uso por profissionais das áreas de engenharias e exatas, bem como tornando ferramentas desenvolvidas em Excel acessíveis à grande número de pessoas (SILVA & SANTOS, 2015; VALENTE, 2017; OLIVEIRA, 2019) e atrativas para utilização em trabalhos científicos de



diversas áreas (MEYER, 2009; BROWN, 2014; STOLF, 2014; VALENTE, 2017; RATHOD, 2018).

As fórmulas, ferramentas de análise de dados, visualização instantânea de gráficos e conexões com dados externos permitem ao usuário do Microsoft Excel diversas possibilidades de utilização, porém limitadas às ferramentas e funções nativas do software. Análises de dados mais específicas e rotinas de automatização mais complexas exigem que o usuário recorra ao Visual Basic for Applications (VBA), a partir da onde se abre uma gama muito maior de possibilidades. O Visual Basic (VB) é uma linguagem de programação orientada a objetos, desenvolvida pela Microsoft para criação de softwares no ambiente Windows. Já o Visual Basic for Applications (VBA) é uma linguagem de programação que usa como base as notações do VB, porém incorporada aos softwares do pacote Office, como Access, Excel, PowerPoint e Word, permitindo que sejam controladas e automatizadas por linha de comando todas as funcionalidades existentes nesses aplicativos, bem como automatizar fluxo de dados com outros softwares e plataformas.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, tem dentre os seus fundamentos e objetivos que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais. Produtos de modelagem hidrológica para a gestão de risco em eventos extremos podem subsidiar a tomada de decisão pelos órgãos gestores das águas e a deflagração de alertas às demais entidades responsáveis pela mitigação dos efeitos da cheia, incrementando o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, um dos instrumentos da PNRH.

No tocante aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU) que fomenta o atingimento de 17 grandes metas socioambientais até o ano de 2030, ferramentas que visem a mitigação de efeitos decorrentes das enchentes e inundação possuem relação, dentre outras, com a meta 1.5., que visa construir a resiliência dos pobres e daqueles em situação de vulnerabilidade, e reduzir a exposição e vulnerabilidade destes a eventos extremos relacionados com o clima e outros choques e desastres econômicos, sociais e ambientais, bem como com a meta 11.5, que visa reduzir significativamente o número de

mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água (CPRM, 2020).

Diante do exposto, o objetivo geral do presente trabalho é fornecer ferramentas para auxiliar na gestão de risco em eventos extremos de cheia no rio Madeira, por meio de funções, sub-rotinas e pastas de trabalho desenvolvidas em VBA e aplicadas na calibração do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH).

Os objetivos específicos do trabalho são:

- i. Caracterizar a bacia hidrográfica do rio Madeira e avaliar o potencial desempenho do Modelo de Grandes Bacias (MGB) na simulação de cheias para a área de drenagem a montante da cidade de Porto Velho;
- ii. Realizar a calibração manual do Modelo de Grandes Bacias (MGB) para a bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho por meio de pasta de trabalho desenvolvida no Excel;
- iii. Apresentar funcionalidades de códigos em Visual Basic for Application (VBA) e planilhas do software Microsoft Excel para manipulação de dados de entrada, calibração e avaliação de resultados do Modelo de Grandes Bacias, testados para as versões 4.5 e 4.6.;
- iv. Disponibilizar pacotes de dados pré-processados para a bacia hidrográfica do rio Madeira desde suas nascentes andinas até a confluência com o rio Machado, possibilitando sua aplicação em mais de 90% do estado de Rondônia.

Para tal intento, a estrutura do presente trabalho baseia-se em uma sequência de dois capítulos, correspondentes a dois artigos referentes aos objetivos específicos I e II, seguido do produto “Manual de Utilização de Planilhas em Excel Acopladas ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)”, presente no Apêndice A, juntamente com banco de dados, correspondentes aos objetivos específicos III e IV, respectivamente. Neste sentido, o presente trabalho tem grande aderência

com a linha de pesquisa “Segurança hídrica e usos múltiplos da água”, que tem por objetivo, dentre outros, desenvolver métodos, modelos e instrumentos para gestão de riscos, eventos hidrológicos extremos e desastres naturais.

## 2 POTENCIAL DESEMPENHO DO MGB PARA A SIMULAÇÃO DE CHEIAS NO RIO MADEIRA

### Resumo

O ciclo anual de cheia do rio Madeira traz eminentes danos socioeconômicos aos estados de Rondônia e Acre, tendo este trabalho o objetivo de avaliar o potencial desempenho do Modelo de Grandes Bacias (MGB) na simulação de cheias para a área de drenagem a montante da cidade de Porto Velho. Foram realizadas 12 simulações que variaram entre dois tipos de Modelo Digital de Elevação (MDE), Bare-Earth, com resolução de 500 metros e HidroSHETS, com resolução de 90 metros; dois métodos de propagação de vazão, Muskingum-Cunge e Modelo Inercial Local; e três grupos de parâmetros de calibração, os utilizados no produto South America Simulated River Discharge Dataset e suas otimizações baseadas no algoritmo MOCOM-UA para funções objetivo de Nash-Sutcliffe e porcentagem de erro de volume. Foram comparadas as vazões simuladas e observadas para algumas estações fluviométricas da região, tendo o MGB demonstrado capacidade de representar vazões da área de estudo, com melhores resultados apresentados pelo método hidrodinâmico Inercial Local. As simulações baseadas no Bare-Earth apresentaram melhores valores para as métricas de correlação de Pearson e Nash-Sutcliffe, porém mostrou atenuações de vazão excessivas para as bacias hidrográficas dos rios Mamoré e Beni. Por outro lado, as simulações baseadas no HidroSHETS 90 m, apesar de terem apresentado picos de vazão acentuados e grande antecipação na ocorrência da vazão máxima anual, apresentaram melhores métricas de erro percentual de volume em Porto Velho.

### Abstract

The annual flood cycle of the Madeira River brings imminent socioeconomic damage to the states of Rondônia and Acre, and this work aims to evaluate the potential performance of the Large Watershed Model (MGB) in the simulation of floods for the drainage area upstream of the city of Porto Velho. Twelve simulations were carried out, varying between two types of Digital Elevation Model (DEM), Bare-Earth with a resolution of 500 meters and HidroSHETS with a resolution of 90 meters; two methods of flow propagation, Muskingum-Cunge and Local Inertial Model; and three groups of calibration parameters, those used in the South America Simulated River Discharge Dataset product and their optimizations based on the MOCOM-UA

algorithm for Nash-Sutcliffe objective functions and volume error percentage. Simulated and observed flows were compared for some fluvimetric stations in the region, and the MGB demonstrated the ability to represent flows in the study area, and the flows were better represented by the local inertial hydrodynamic method. The simulations based on Bare-Earth presented better values for Pearson and Nash-Sutcliffe correlation metrics, however, showed excessive flow attenuations for the Mamoré and Beni river watershed. On the other hand, the simulations based on the 90 m HidroSHETS, despite having presented sharp peaks of flow and great anticipation in the occurrence of the maximum annual flow, presented better volume percentage error metrics in Porto Velho.

## **2.1 Introdução**

A bacia hidrográfica do rio Amazonas é um dos maiores sistemas fluviais do mundo, no qual eventos hidrológicos extremos vêm sendo relatados na última década (MARENGO et al., 2012; ESPINOZA et al., 2013; ESPINOZA et al., 2014; FILIZOLA et al., 2014; OVANDO et al., 2016), alguns deles com indicação de intensificação nas magnitudes e frequências ou com indicação de mudança na distribuição das precipitações (MARENGO & ESPINOZA, 2016; ESPINOZA et al., 2019; SOUZA et.al., 2020).

O rio Madeira é o maior afluente do rio Amazonas, com cerca de 23% de sua área total de captação (SOUZA et al., 2020), tendo em sua região de transição entre os andes e planície a área com maior taxa de escoamento superficial da Amazônia (ESPINOZA et al. 2020). Na região a montante da cidade de Porto Velho ocorreram inundações severas nos anos de 1992, 1993, 1997, 2007, 2008 e 2014, documentadas por Ronchail et al., 2005; Bourrel et al., 2009; Espinoza et al., 2014; Vauchel, 2014; Corrêa et al., 2016; Ovando et al., 2016, dentre outros autores.

Em 2014 ocorreu a maior cheia já registrada na série histórica de monitoramento do rio Madeira, inundando várias casas, ruas e estradas em todas as cidades e distritos ribeirinhos ao longo do rio e em demais afluentes de sua bacia hidrográfica. Dentre estes núcleos urbanos afetados, encontram-se Pimenteiras/RO, Guajará-Mirim/RO, Abunã/RO, Jaci Paraná/RO, Porto Velho/RO e Humaitá/AM. Na capital de Rondônia, Porto Velho, a cota média diária atingiu 19,69 metros, no dia 30 de março (SNIRH, 2021).

terrestre do estado do Acre ao restante do Brasil, ficou interditada por vários dias, deixando o referido estado desabastecido de materiais e mantimentos básicos de consumo. Também foi interditada a BR-425, principal via de acesso para as cidades de Nova Mamoré e Guajará-Mirim.

Segundo relatório da Controladoria Geral da União - CGU (2014), nesta época foram atingidas 3.758 famílias, entre desabrigadas e desalojadas, no município de Porto Velho. Também foram registrados vários danos socioeconômicos que abrangeram desde prejuízos diretos ao patrimônio público e privado, como comprometimento do abastecimento de água, coleta de lixo, transporte público, surtos de doenças e paralização de escolas. Ainda com base no relatório da CGU (2014), com o objetivo de remediação dos efeitos da cheia, foram feitos repasses da ordem 15 milhões de reais para a Prefeitura Municipal de Porto Velho pelo, até então, Ministério da Integração Nacional.

Cinco anos depois da grande cheia, em 2019, a cidade de Porto Velho e alguns núcleos populacionais ribeirinhos foram novamente atingidos pela elevação anormal do nível do rio Madeira, chegando momentaneamente à cota de 17,36 metros, no dia 08 de março (SNIRH, 2021), 36 cm a mais que a cota considerada como “Inundação” na cidade de Porto Velho (CPRM, 2019). No rio Mamoré, um dos principais formadores do rio Madeira, a cota na cidade de Guajará-Mirim chegou ao patamar de 11,25 metros, 15 cm a mais que a cota considerada como “Inundação” (CPRM, 2019).

A cheia de 2014 foi centenária, tendo período de recorrência estimado em 124 anos, porém uma vazão com Tempo de Retorno (TR) calculado para 03 anos já compromete parte de áreas comerciais, residências e de instituições públicas de Porto Velho (CORRÊA et al., 2016). Neste contexto, o ciclo anual de cheia do rio Madeira trás potenciais danos socioeconômicos aos estados de Rondônia e Acre, o que exige ferramentas para nortear o planejamento de ações mitigadoras.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta que permite aprofundar conhecimentos sobre a dinâmica da água em diversas partes da hidrosfera, sendo possível traçar cenários para a gestão de recursos hídricos, estando a região amazônica como área de estudo de diversos grupos de

pesquisa ao redor do mundo, na tentativa de compreender a dinâmica hidrológica e minimizar os efeitos associados à ocorrência de eventos extremos (MARINHO FILHO et al. 2012, ALVES, 2018). Neste contexto, o Modelo de Grandes Bacias (MGB) vem sendo aplicado na região amazônica em diversos trabalhos, devido a sua capacidade de representar fisicamente o comportamento do ciclo hidrológico em grandes áreas (RIBEIRO NETO, 2006; PAIVA et al., 2012; PAIVA et al., 2013; CORREA et al. 2017; SIQUEIRA et al., 2017; SIQUEIRA et al.; 2018; FÖEGER et al. 2019; FLAISCHMANN et al. 2020).

Tendo em vista o supracitado, o objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial desempenho do Modelo de Grandes Bacias (MGB) no Rio Madeira na simulação de cheias para a área de drenagem a montante da cidade de Porto Velho-RO.

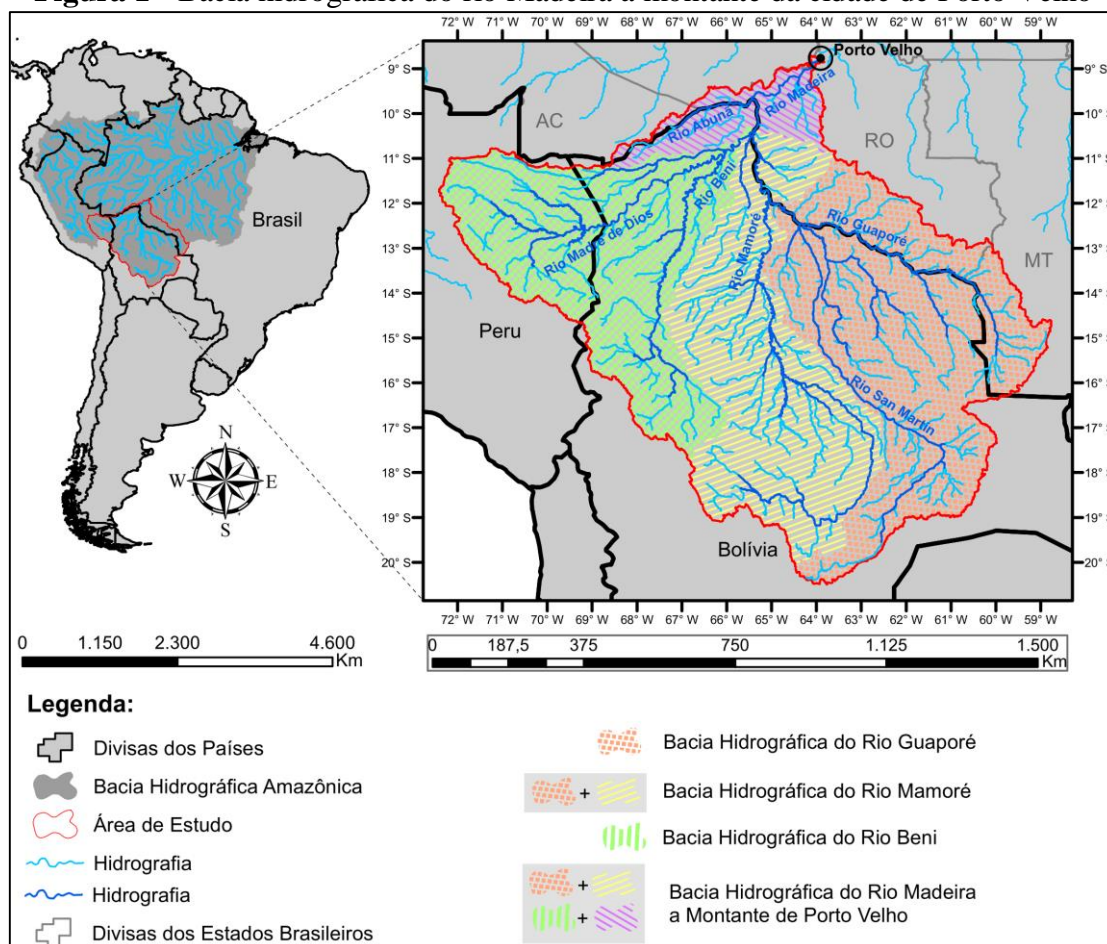
## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Área de estudo**

A bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho está localizada na porção sudoeste da bacia amazônica e possui uma drenagem de aproximadamente 980 mil km<sup>2</sup>, tendo como seus principais tributários os rios Guaporé, Mamoré e Beni, onde suas bacias hidrográficas isoladas ocupam respectivamente 34, 28 e 30% da área de estudo (CORRÊA et al., 2016; ESPINOZA et al., 2019), sendo o rio Guaporé afluente do Mamoré, que, por sua vez, passa a se chamar Madeira após a confluência com o rio Beni, conforme ilustrado na Figura 1.

A área é pertencente a três países, sendo 73% em território boliviano, abrangido desde a margem esquerda do rio Guaporé até a parte baixa do rio Madre de Dios. Ao Leste, os rios Guaporé, Mamoré, Madeira e Abunã coincidem com a fronteira entre a Bolívia e o Brasil, que por sua vez possui 16% da área. Os outros 11% são pertencentes ao Peru, no extremo oeste, próximo às cabeceiras do rio Madre de Dios (ESPINOZA et al, 2019).

**Figura 1 -** Bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho



Fonte: Elaborado pelo autor

A região pode ser separada por unidades morfo-estruturais em Cordilheira dos Andes, planície amazônica e escudo brasileiro (GUYOT,1993; RIBEIRO NETO, 2006), característica que confere alta variabilidade altimétrica, podendo chegar a mais de 6 mil metros de altitude nos Andes (23% da área de estudo), com terrenos de elevada declividade a oeste e sudoeste, e altitudes com menos de 100 metros na região de planície (região central), com declividades inferiores a 10 cm/km, vastas zonas de inundação e área de várzea que chegam a 150 mil km<sup>2</sup> (GUYOT, 1993; JUNK, 1997; RIBEIRO NETO, 2006; ADAMY, 2016; ESPINOZA et al., 2019). Por sua vez, o escudo brasileiro é formado por rochas cristalinas, evidenciadas por trechos encachoeirados entre a cidade de Guajará-Mirim e Porto Velho, bem como está concentrado na porção oriental da bacia hidrográfica, na área de drenagem do rio Guaporé (GUYOT, 1993; RIBEIRO NETO, 2006; VAUCHEL, 2014; ADAMY, 2016; ESPINOZA et al., 2019).



Do ponto de vista climatológico, a região possui uma precipitação média anual de 4,27 mm/dia (ESPINOZA et al., 2019), bem como é classificada pelo critério de Köppen Geiger como tropical equatorial e tropical de monções, tendo o seu quadrante chuvoso ocorrendo entre os meses de dezembro e março (mais de 50% da precipitação anual e média de 6 mm/dia), sendo influenciado pela Zona de Convergência do Atlântico Sul e pelo Sistema de Monções da América do Sul, predominando uma marcada estação seca entre junho e agosto (PEEL et al., 2007; ESPINOZA et al., 2019).

Essas características conferem um regime hidrológico bem definido ao rio Madeira, onde se tem elevação do nível a partir do mês de outubro, atingimento do pico da cheia entre março e abril e período de recessão nos demais meses do ano, com vazão média anual de 23.000 m<sup>3</sup>/s e amplitude entre vazões máximas e mínimas entorno de 40.000 m<sup>3</sup>/s na cidade de Porto Velho (ADAMY, 2016). O rio Beni, apesar de só possuir 30% da área de drenagem até a cidade de Porto Velho, é responsável por gerar 2/3 do volume de água escoado no período da cheia (CORRÊA et al., 2016).

Tratando-se da área brasileira, existem várias cidades e núcleos populacionais ribeirinhos, sendo os principais (montante para jusante): Pimenteiras, Pedras Negras, Príncipe da Beira, Guajará-Mirim, Nova Mamoré, Abunã, Jaci Paraná e Porto Velho, bem como no rio Abunã, Plácido de Castro e Fortaleza do Abunã, todos pertencentes ao estado de Rondônia, com exceção de Plácido de Castro, que pertence ao Acre.

No trecho compreendido entre a confluência do rio Madeira com o rio Abunã e a cidade de Porto Velho ainda há duas usinas hidroelétricas (UHE's) a “fio d'água”, que tiveram sua operação iniciada em 2012 (VAUCHEL, 2014; GERMANO et al., 2015), estando a UHE Jirau a montante da UHE Santo Antônio.

### **2.2.2 Modelo de Grandes Bacias**

O Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA et al. 2011; FAN & COLLISCHONN, 2014; PONTES et al., 2017), é um modelo hidrológico/hidrodinâmico conceitual e distribuído com intervalo de

tempo diário. Como tal, utiliza bases físicas, onde são inseridas equações que representam o transporte da água em seus diversos meios e discretiza a bacia hidrográfica em unidades menores, para considerar a variabilidade das suas características na área de estudo (MARINHO FILHO et al., 2012).

A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), é delimitada a bacia hidrográfica para um determinado exutório. Essa bacia é dividida em “minibacias”, que por sua vez é subdividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH’s), que são regiões de comportamento hidrológico similar, normalmente obtidos pela combinação de mapas de tipos de solo com o uso e cobertura vegetal (FAN & COLLISCHONN, 2014; FAN et al. 2015).

A partir de uma precipitação interpolada para o centroide de cada minibacia, para cada URH dentro delas, é calculada a interceptação, baseada no Índice de Área Foliar (IAF) e evapotranspiração baseada na equação de Penman-Monteith. O balanço de água no solo é calculado considerando uma camada vertical homogênea, onde a separação do escoamento superficial, subsuperficial e de base está ligado com a espessura total da camada de solo e a altura da zona saturada no tempo anterior, denominado de “bucket model” (COLLISCHONN, 2001; SIQUEIRA et al., 2018; COLLISCHONN et al. 2020).

Ainda a nível de URH, a parcela do escoamento superficial é calculada com base no modelo ARNO (TODINI, 1996) e o subsuperficial é calculado pela equação de condutividade hidráulica insaturada, que utiliza uma função não linear baseada na equação de Brooks-Corey, descrita por Rawls et al. (1993). Já o escoamento de base utiliza uma equação linear baseado na diferença entre o armazenamento máximo e o armazenamento de água no solo, multiplicado por uma taxa de percolação de águas subterrâneas em solo saturado (COLLISCHONN, 2001; SIQUEIRA et al., 2018).

Os escoamentos superficiais, subsuperficiais e de base, gerados pelo balanço hídrico em cada URH, passam para o patamar de minibacia, onde irão compor o volume dos “reservatórios lineares” que irão atenuar as vazões de cada escoamento antes de chegar ao canal principal do rio, baseados em um parâmetro de tempo de retardo (COLLISCHONN, 2001).

As minibacias estão ligadas pela rede de drenagem, onde cada uma escoava para uma de suas vizinhas. A propagação do escoamento recebido de montante para jusante é calculado dentro de cada minibacia, que possuem, atreladas às mesmas, dados de comprimento, declividade, coeficiente de rugosidade, largura e profundidade do canal, bem como a relação cota e área de inundação, que propiciam a utilização das equações da conservação de massa (Eq. 1) e quantidade de movimento (Eq. 2), também denominadas de equações de Saint Vénant (COLLISCHONN, 2001; TUCCI, 2007; PONTES et al., 2017; COLLISCHONN et al., 2020).

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = q$$

Eq. 1

$$\underbrace{\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta(Q^2/A)}{\delta x}}_{\text{inércia}} + \underbrace{gA \frac{\delta h}{\delta x}}_{\text{pressão}} = \underbrace{gAS_0}_{\text{gravidade}} - \underbrace{gAS_f}_{\text{atrito}}$$

Eq. 2

Onde Q é a vazão; A é a área da seção transversal ao escoamento; x é a distância no sentido longitudinal; t é o tempo; q é a vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento do trecho; h é a profundidade do rio, S<sub>0</sub> é a declividade do fundo do rio; S<sub>f</sub> representa a declividade da linha de energia e g a aceleração da gravidade.

As equações de Saint Vénant representam o escoamento superficial, não-permanente, gradualmente variado e unidimensional (1-D), tendo em vista que despreza a variação de velocidade nas direções transversal e vertical (TUCCI, 2007), considerando-se, portanto, que o espalhamento na planície de inundação ocorre em tempo único e que o nível de água na planície é igual ao nível do canal principal (PAIVA et al. 2011; PAIVA et al. 2012).

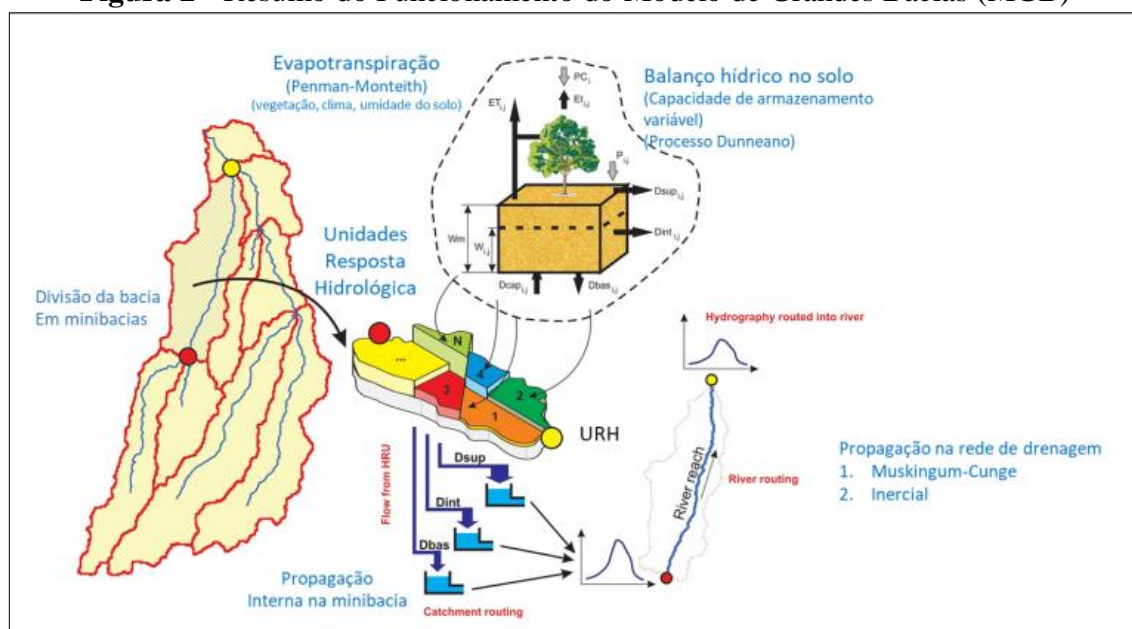
Na equação da quantidade de movimento os dois primeiros termos representam a inércia, respectivamente, local e convectiva, e o terceiro representa o diferencial de pressões hidrostáticas atuantes nos limites do volume de controle. Os dois termos da direita representam respectivamente a gravidade, proporcional à declividade do fundo do canal, e o atrito com o

fundo e as margens do rio, proporcional à declividade da linha de energia (TUCCI, 2007; MOUSSA, 2004 apud ALVES, 2018).

A Figura 2 ilustra um resumo do funcionamento do modelo e dos processos descritos nesta seção. O MGB versão 4.5, utilizado neste trabalho, permite simular a propagação de vazões por dois métodos:

- Método Muskingum-Cunge (COLLISCHONN et al., 2007), que despreza os termos inerciais e de pressão da equação da quantidade de movimento, não permitindo a simulação de níveis e áreas inundadas; ou
- Método denominado de “modelo inercial local” (BATES et al. 2010; PONTES et al., 2017; SIQUEIRA et al. 2018), que é um método hidrodinâmico que despreza apenas o termo da inércia convectiva da equação da quantidade de movimento, que em comparação com o método hidrodinâmico completo unidimensional (PAIVA et al., 2011; PAIVA et al, 2012; PAIVA et al., 2013) apresentou resultados semelhantes e maior celeridade computacional (PONTES et al., 2017; FÖEGER et al. 2019).

**Figura 2 - Resumo do Funcionamento do Modelo de Grandes Bacias (MGB)**



Fonte: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>

### 2.2.3 Geoprocessamento

As características fisiográficas da bacia estudada e sua divisão em minibacias foi obtida através de geoprocessamento do pacote IPH- Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016), utilizando-se o MDE hidrológicamente condicionado HydroSHEDS (LEHNER et al., 2008) com resolução de 3 arcsec (aproximadamente 90 metros), bem como mapa de direção de fluxo com a mesma resolução (LEHNER et al., 2008). Os dois mapas utilizados da base HydroSHEDS são derivados do MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), porém com tratamentos voltados para o uso hidrológico, como preenchimento de espaços vazios, filtragem de pixels, correções automáticas e manuais nos percursos dos rios e em áreas endorreicas (LEHNER et al., 2008).

Para a definição da rede de drenagem, adotou-se uma área de captação igual ou superior a 1.000 km<sup>2</sup> e divisão das sub-bacias a cada 15 km pelo critério de igual comprimento de rio, conforme sugerido por Siqueira et al. (2018) em trabalho que simulou todo o continente americano.

Os parâmetros que aproximam a seção transversal do rio a um formato retangular (calha abaixo da altitude captada pelo MDE) foram obtidos com base em Paiva et al. (2013), que estimou equações geomorfológicas que relacionam a área de drenagem rio à sua largura e profundidade máxima em relação ao nível d'água. Essas equações foram desenvolvidas para a região amazônica a partir de levantamentos de seções transversais de estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para o rio Madeira foram encontradas as relações descritas nas Equações 3 e 4. Ainda com base em Paiva et al. (2013), foi adotado o valor de 0,030 como o coeficiente de Manning para os rios da área de estudo.

$$B = 1,30 \cdot (A_d)^{0,46} \quad \text{Eq. 3}$$

$$H = 1,25 \cdot (A_d)^{0,20} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde B é a largura do rio em metros, H é a profundidade máxima da água em metros e  $A_d$  é a área de drenagem a montante da seção transversal em km<sup>2</sup>.

Na determinação das Unidades de Resposta Hidrológica (URH's), foi utilizado o produto disponibilizado por Fan et al. (2015), onde foram combinados mapas de tipos e uso do solo para toda a América do Sul. Os tipos de solo foram obtidos para a região brasileira através de dados espaciais do Ministério do Meio Ambiente (MMA), na escala 1:1.000.000, e para o restante da América do Sul, mapas da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), na escala 1:5.000.000. A cobertura do solo foi obtida através de mapa com resolução espacial de 300m, elaborado pelo projeto GlobCover da Agência Espacial Européia (ESA), com dados levantados via satélite ao longo do ano de 2009.

Quanto ao tipo de solo, os “latossolos”, “nitossolos”, “areias quartzarenicas”, “chernossolos”, “plintossolos”, “vertissolos”, “organossolos” e “argissolos” foram classificados como sendo de baixo potencial para geração de escoamento superficial (denominados como profundos). Os “neossolos”, “litossolos”, “luviossolos” e “cambiossolos” foram classificados como tendo elevado potencial de geração de escoamento superficial (denominados como rasos). Os “gleissolo”, “fluvissolo”, “pantanossolo” e “espodossolos” foram classificados como solos de elevada saturação (denominados como várzea). Os afloramentos rochosos foram agrupados como áreas semi-impermeáveis (FAN et al., 2015).

Quanto à cobertura do solo, os usos foram simplificados e agrupados para aqueles que apresentam características hidrológicas semelhantes. Agricultura intensiva e pastagens foram classificadas como “agricultura”. Áreas urbanas foram classificadas como “semi-impermeáveis”. Formações abustivas, estepes e cerrado foram classificados como “campos”. Todos os tipos de floresta foram classificados como “floresta”. Manguezais, várzeas, igapós e florestas hidrófilas foram classificados como “várzeas e florestas inundáveis” (FAN et al., 2015).

A combinação da reclassificação feita por Fan et al. (2015), gerou um raster com resolução de 400 metros separando as seguintes classes: Florestas em solo raso, florestas em solo profundo, agricultura em solo raso, agricultura em solo profundo, campo em solo raso, campo em solo profundo, várzeas e florestas inundáveis, áreas semi-impermeáveis e espelhos de água.

Como segunda fonte de características físicas da bacia de estudo, foi utilizado o produto intitulado de “*South America Simulated River Discharge Dataset*” (SASRDD), fruto do trabalho de Siqueira et al. (2018), disponível no website do grupo de pesquisa HGE (Hidrologia de Grande Escala). Este produto disponibiliza uma base de dados de vazões simuladas para o continente da América do Sul no período de 01/01/1990 a 31/12/2009, como também disponibiliza os arquivos *shapefiles* contendo as 33749 minibacias discretizadas para o continente.

No trabalho de Siqueira et al. (2018) foram utilizados como base do processamento o MDE Bare-Earth (O’LOUGHLIN et al., 2016), baseado no produto SRTM, mas que estima a altitude com a remoção da vegetação, tendo sido feita uma remostragem de 3 para 15 arcsec (aproximadamente 500 metros). Também foi utilizado o mapa de direção de fluxo disponibilizado pelo HydroSHEDS (LEHNER et al., 2008) e o mapa de URH’s descrito por Fan et al. (2015).

Nesta segunda alternativa, as minibacias da área de interesse na região do rio Madeira foram separadas no software ArcGIS 10.7 e os arquivos de entrada para o plugin do MGB versão 4.5 foram compatibilizados através de scripts em Visual Basic for Applications (VBA).

Tanto na primeira como na segunda alternativa, a área da bacia do rio Madeira adotada para a simulação (AS) foi maior do que a área estudada (AE), cerca de 400 km no percurso do rio a jusante, para se obter uma diferença de nível do fundo do canal de aproximadamente 20 metros, propiciando que resultados de vazão simulados para a cidade de Porto Velho não fossem influenciados por distorções na declividade da linha da água, algo interveniente no modo de propagação hidrodinâmico das vazões (PAIVA et al., 2011; PONTES et al., 2017). Por fim, as duas bases de dados de minibacias foram reagrupadas conforme Siqueira et al. (2018), que utilizou a litologia como critério para determinação das sub-bacias de calibração.

#### **2.2.4 Avaliação de desempenho**

Para fins de avaliar a potencialidade de aplicação do modelo MGB 4.5 na representação das cheias do rio Madeira, foram feitas 12 simulações. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das simulações feitas e as siglas adotadas para identifica-las. Onde os resultados são divididos pela

resolução dos mapas utilizados para determinação das características fisiográficas das unidades de cálculo “minibacias”, método de propagação das vazões e parâmetros de calibração do solo, tendo em vista que os parâmetros de vegetação, unidades de resposta hidrológica, clima e precipitação foram idênticos para todas as simulações.

**Tabela 1 - Siglas das simulações realizadas**

<b>Sigla</b>	<b>Resolução do MDE gerador da minibacia</b>	<b>Propagação no Canal</b>	<b>Parâmetros Calibração do Solo</b>
90 MC SA	90 metros*	Muskingum-Cunge***	Utilizado no produto SASRDD*****
90 HD SA	90 metros*	Hidrodinâmico (Inercial local)****	Utilizado no produto SASRDD*****
90 MC Auto NS	90 metros*	Muskingum-Cunge***	Otimizado para Nash-Sutcliffe*****
90 HD Auto NS	90 metros*	Hidrodinâmico (Inercial local)****	Otimizado para Nash-Sutcliffe*****
90 MC Auto dV	90 metros*	Muskingum-Cunge***	Otimizado para diferença de volume*****
90 HD Auto dV	90 metros*	Hidrodinâmico (Inercial local)****	Otimizado para diferença de volume*****
500 MC SA	500 m com remoção de vegetação**	Muskingum-Cunge***	Utilizado no produto SASRDD*****
500 HD SA	500 m com remoção de vegetação**	Hidrodinâmico (Inercial local)****	Utilizado no produto SASRDD*****
500 MC Auto NS	500 m com remoção de vegetação**	Muskingum-Cunge***	Otimizado para Nash-Sutcliffe*****
500 HD Auto NS	500 m com remoção de vegetação**	Hidrodinâmico (Inercial local)****	Otimizado para Nash-Sutcliffe*****
500 MC Auto dV	500 m com remoção de vegetação**	Muskingum-Cunge***	Otimizado para diferença de volume*****
500 HD Auto dV	500 m com remoção de vegetação**	Hidrodinâmico (Inercial local)****	Otimizado para diferença de volume*****

**Legenda:**

\* MDE com 90 metros de resolução combinado com mapa de direção de fluxo hidrológicamente condicionado HidroSHETS (LEHNER et al., 2008);

\*\* Minibacias processadas da Base de dados “*South America Simulated River Discharge Dataset*” (SIQUEIRA et al. 2018), que utilizou MDE com resolução de 500 metros e remoção de vegetação Bare-Earth (O’LOUGHLIN et al., 2016) combinado com mapa de direção de fluxo de 500 metros HidroSHETS (LEHNER et al., 2008);

\*\*\* Método de propagação de vazão unidimensional (1D) simplificado, utilizado por Collischonn, 2001;

\*\*\*\* Método de propagação hidrodinâmico unidimensional (1D) que despreza apenas a inércia convectiva das equações de Saint Vénant, utilizado por Pontes et al., 2017 e SIQUEIRA et al., 2018;

\*\*\*\*\* Parâmetros de calibração do solo obtidos pelo produto “*South America Simulated River Discharge Dataset*” (SIQUEIRA et al., 2018);

\*\*\*\*\* Parâmetros de calibração do solo otimizado pelo algoritmo MOCOM-UA (YAPO et al. 1998) que apresentou melhor desempenho para o coeficiente de Nash-Sutcliffe no “Grupo de Pareto”;



\*\*\*\*\* Parâmetros de calibração do solo otimizado pelo algoritmo MOCOM-UA (YAPO et al., 1998) que apresentou melhor desempenho para o objetivo de menor diferença de volume no “Grupo de Pareto”.

Nesta etapa de avaliação foi utilizada a precipitação oriunda do produto MERGE/CPTEC (ROZANTE et al., 2010), que reanalisou dados de chuva obtidos pelo satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) com base em dados observados por estações pluviométricas da América do Sul. Adotou-se o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2014, considerando-se respectivamente a data mínima de disponibilidade dos dados diários de chuva pelo produto MERGE e a cheia histórica ocorrida entre março e abril de 2014. Para validação dos resultados, foram utilizadas séries de vazão disponíveis no Hidroweb, plataforma digital de dados fluviométricos da ANA.

Também foram utilizados parâmetros mensais de vegetação baseados no trabalho de Siqueira et al. (2018) e parâmetros climatológicos da base de dados CRU (NEW et al., 2002), que compatibilizou informações de postos climatológicos de vários países, gerando uma grade de pontos com resolução de 10' (aproximadamente 18 km), em escala global, com valores de médias mensais.

Da base de dados CRU (NEW et al., 2002) foram utilizados as médias mensais de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), percentual de insolação por mês (%), velocidade do vento (m/s) e altitude (km). Para adequar os dados às unidades requeridas pelo MGB, para cada ponto da grade, a insolação foi transformada para a unidade de horas/dia, considerando-se o percentual encontrado para o mês aplicada a 24 horas, e foi utilizada a fórmula barométrica de Laplace (BERBERAN-SANTOS, 1997) para encontrar a pressão atmosférica (kPa) baseada na temperatura e altitude local.

Com relação aos parâmetros calibráveis (solo), como primeira opção, foram utilizados os parâmetros encontrados por Siqueira et al. (2018) através de calibração manual com base na precipitação fornecida pelo modelo *Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation* - MSWEP v1.1 (BECK et al., 2017) e como segunda opção foi utilizado o algoritmo MOCOM-UA (*Multiple-Objective Complex Evolution* – Universidade do Arizona), proposto por Yapo et al.

(1998) e acoplado ao modelo MGB (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN & TUCCI, 2003).

O MOCOM-UA é um modelo de otimização baseado em princípios da seleção natural que parte da sugestão inicial de vários “indivíduos” no universo amostral, diferenciando-se de métodos mais simples de otimização, onde são sugeridos apenas um valor inicial, algo que torna o resultado da otimização muito dependente da qualidade da sugestão. No modelo são gerados grupos de variáveis (“indivíduos”) que interagem entre si, mesclando suas características e gerando novos grupos de variáveis (“novo indivíduo”), se dentro de uma “família” com número de indivíduos limitados alguns desses novos indivíduos forem mais “adaptados” que alguns dos originais, estes novos irão ser “dominantes” e passarão para a próxima geração (“ocupar o lugar dos ancestrais”) e assim sucessivamente. Fazendo a analogia com os parâmetros de calibração do modelo, o “indivíduo” seria o grupo de variáveis e a “adaptação” seriam resultados melhores na função objetivo, que é análoga a uma métrica de eficiência (DUAN et al., 1992; YAPO et al. (1998); COLLISCHONN & TUCCI, 2003).

Tendo em vista que para tentar representar a eficiência de modelos hidrológicos é necessário utilizar mais de uma métrica, um grupo de parâmetros de calibração pode ser mais eficiente para atingir uma determinada função objetivo, porém menos eficiente para atingir outra, tendo-se como objetivo gerar conjuntos de valores (“indivíduos”) que dentro de uma “família” na mesma “geração” não tenha dominância em relação ao outro, esta última geração é equivalente ao “Grupo de Pareto” (YAPO et al. 1998; COLLISCHONN & TUCCI, 2003)

As funções objetivo adotadas para a otimização dos parâmetros de solo neste trabalho foram o Nash-Sutcliffe (NS) e porcentagem de erro de volume ( $\Delta V$ ). As “famílias” foram formadas por 100 indivíduos e o número máximo de gerações para se tentar atingir a Frente de Pareto foi limitado a 500.

Apenas para indicativo de aptidão na predição de vazões, estas simulações foram feitas considerando todos os parâmetros calibráveis das estações fluviométricas listadas na Tabela 2, considerando-se pesos maiores para os postos fluviométricos localizados em Príncipe da Beira (15200000); Guajará-Mirim (15250000) e Porto Velho (15400000). Por fim, foram

considerados os conjuntos de parâmetros que apresentaram os melhores valores para cada uma das funções objetivo.

**Tabela 2 - Estações Fluviométricas Utilizadas na Calibração Automática**

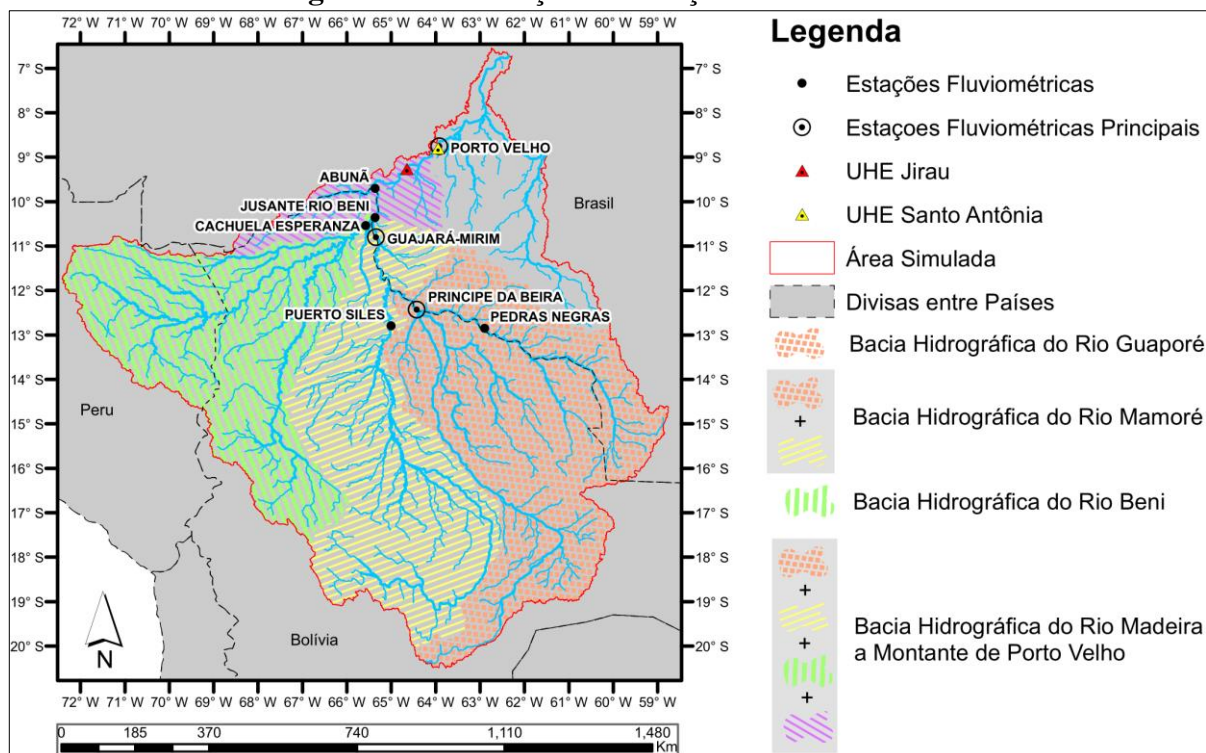
<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Rio</b>	<b>Instituição</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Período de dados</b>	
15150000	PEDRAS NEGRAS	Rio Guaporé	ANA (Brasil)	-12.8514	-62.8992	dez/80	nov/20
15200000	PRINCIPE DA BEIRA	Rio Guaporé	ANA (Brasil)	-12.4267	-64.4253	abr/83	jan/20
15242000	PUERTO SILES	Rio Mamoré	SENAMHI/Bolivia	-12.7994	-65.0064	ago/83	abr/11
15250000	GUAJARÁ-MIRIM	Rio Mamoré	ANA (Brasil)	-10.7925	-65.3478	ago/70	jul/20
15295500	CACHUELA ESPERANZA	Rio Beni	SENAMHI/Bolivia	-10.5403	-65.5722	set/81	abr/14
15318000	JUSANTE RIO BENI	Rio Madeira	UHE JIRAU	-10.3569	-65.3614	abr/10	set/14
15320002	ABUNÃ	Rio Madeira	ANA (Brasil)	-9.7053	-65.3667	fev/76	nov/20
15400000	PORTO VELHO	Rio Madeira	ANA (Brasil)	-8.7483	-63.9169	abr/67	nov/20

Fonte: SNIRH, 2021.

Para a avaliação dos resultados foram selecionadas as estações em destaque na Figura 3, estando Príncipe da Beira, Guajará-Mirim e Porto Velho localizados em pontos estratégicos, onde a estação de Príncipe da Beira está localizada após a confluência dos rios San Martín e Guaporé, representando 97% da bacia hidrográfica do rio Guaporé, que por sua vez possui cerca de 353 mil km<sup>2</sup>; Guajará-Mirim está localizada no rio Mamoré após a confluência com o Guaporé e antes da confluência com o rio Beni, representando 96% da bacia do rio Mamoré, que possui cerca de 635 mil km<sup>2</sup>, e Porto Velho representa o exutório da Área de Estudo (AE).

Após o descarte dos dois primeiros anos (1998 e 1999), utilizados apenas para estabelecimento da situação hidrológica inicial da AS, as vazões simuladas entre 2000 e 2014 foram comparadas com as observadas nas estações de Príncipe da Beira (15200000), Guajará-Mirim (15250000) e Porto Velho (15400000), medindo-se os desempenhos pelos coeficientes de eficiência NS (Eq. 5),  $\Delta V$  (Eq.6) e correlação linear de Pearson ( $r$ ) (Eq.7). Ainda foi feita a comparação entre os hidrogramas simulados e observados para verificara a aderência e capacidade de previsão de picos das cheias.

**Figura 3 - Localização das estações fluviométricas**



Fonte: Elaborado pelo autor

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{Eq.5}$$

$$\Delta V = \frac{\sum (Q_{cal}(t)) - \sum (Q_{obs}(t))}{\sum (Q_{obs}(t))} \times 100 \quad \text{Eq.6}$$

$$r = \frac{\sum [(Q_{Cal} - \overline{Q_{Cal}})(Q_{Obs} - \overline{Q_{Obs}})]}{\sqrt{\sum (Q_{Cal} - \overline{Q_{Cal}})^2} \sqrt{\sum (Q_{Obs} - \overline{Q_{Obs}})^2}} \quad \text{Eq. 7}$$

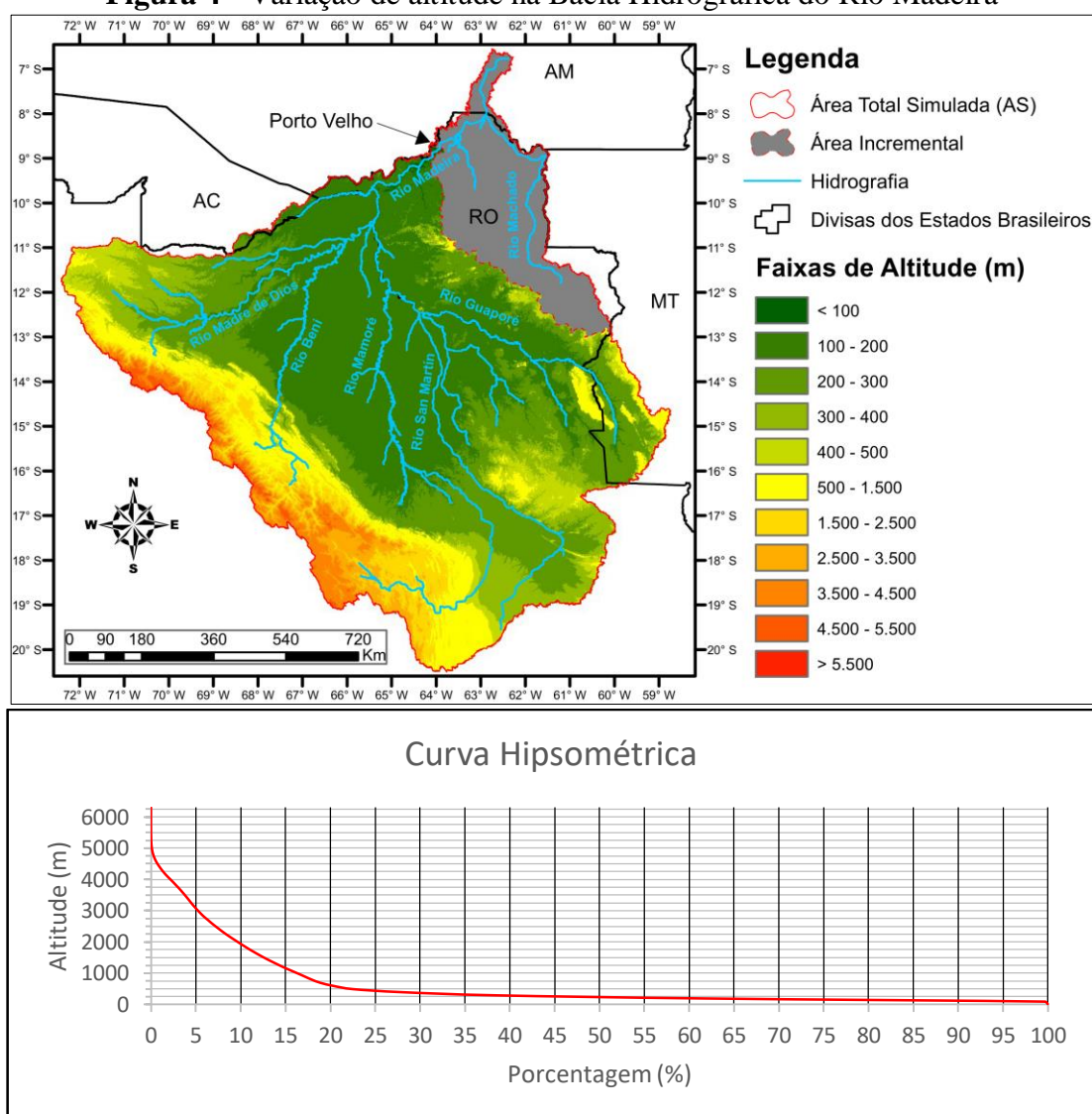
Onde NS é o coeficiente de Nash-Sutcliffe,  $\Delta V$  é o erro percentual de volume,  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson,  $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada no tempo  $t$  e  $Q_{cal}(t)$  é a vazão calculada no tempo  $t$ .

## 2.3 Resultados e discussões

### 2.3.1 Geoprocessamento

Conforme descrito no item 2.2.3, adotando-se o limiar de 400 km a jusante do percurso do rio após a cidade de Porto Velho para uma melhor representação da declividade da linha água, obteve-se uma área complementar de cerca de 120 mil km<sup>2</sup> em relação à área de estudo (AE) e uma área total simulada (AS) de 1,1 milhões de km<sup>2</sup>. A Figura 4 ilustra a variação de altitude na AE, estando cerca de 80% da bacia abaixo dos 500 metros de altitude e os outros 20% com elevações que chegam aos 6.300 metros.

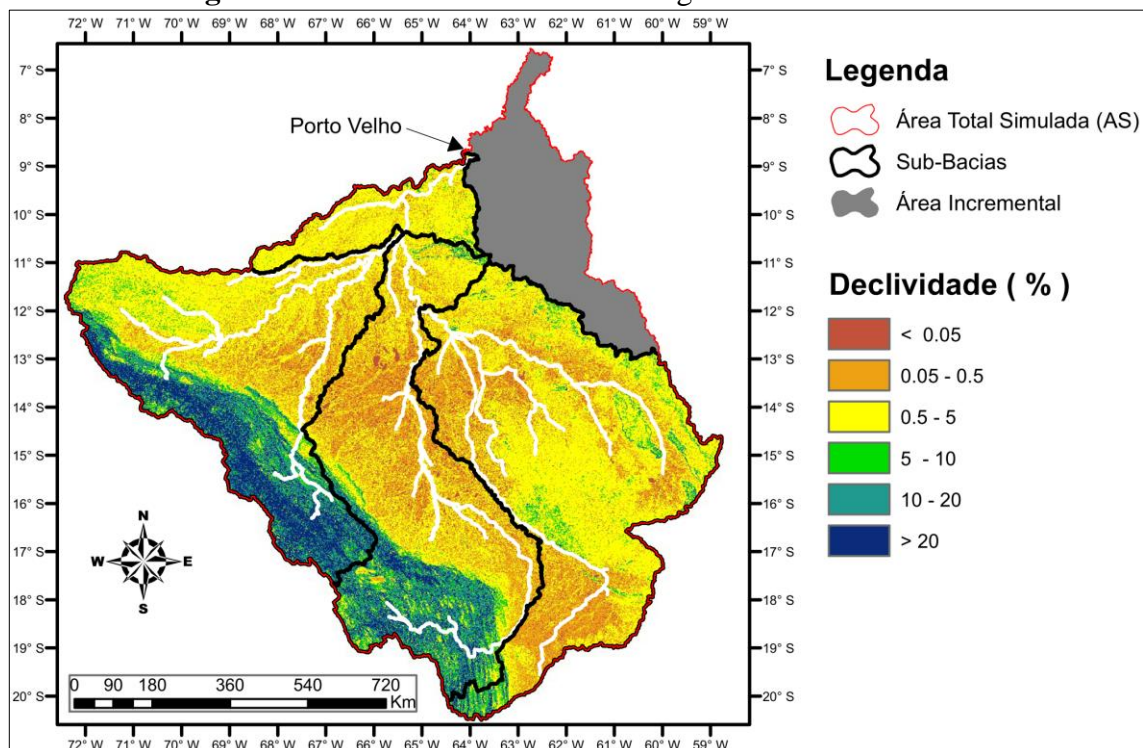
**Figura 4 - Variação de altitude na Bacia Hidrográfica do Rio Madeira**



Fonte: Elaborado pelo autor

É notável também que a região de transição entre os Andes e a planície amazônica apresenta declividades que chegam ao patamar de 670 metros em 1 km (Figura 5), fator que, juntamente com a ocorrência de chuvas orográficas de grande intensidade, torna a região a maior responsável pela geração de escoamento superficial da bacia, que também justifica a grande geração de sedimentos relatada por diversos estudos na região, tornando o rio Madeira um dos cursos d'água com maior carga de sedimentos do mundo (GUYOT et al., 1996; ADAMY, 2016; ESPINOZA et al., 2020, SOUZA et al., 2020).

**Figura 5 - Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Madeira**



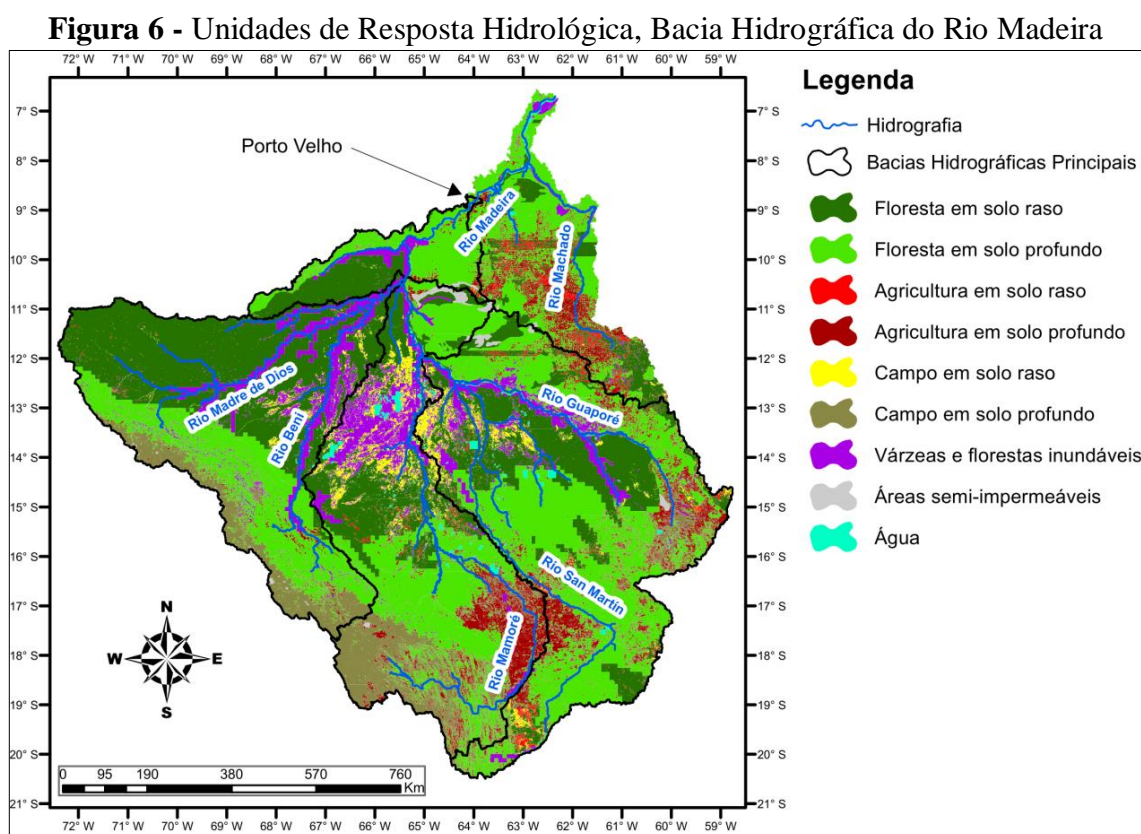
Fonte: Elaborado pelo autor

Por outro lado, após as grandes declividades observadas entre a região andina e as demais áreas da bacia, é perceptível uma vasta área plana com declividades abaixo de 0,05 m/m, favorecendo a geração de grandes áreas alagáveis, efeitos de remanso consideráveis entre os cursos d'água e interligação entre trechos de rio normalmente separados no período de cotas baixas, algo bastante comum nos rios da Amazônia (PAIVA et al., 2012; OVANDO et al., 2016; ALVES, 2018). Esta baixa declividade do curso do rio e efeito de remanso alteram a declividade da linha da água no período da cheia, podendo tornar a vazão de um determinado trecho de rio



dependente não só da bacia hidrográfica a montante, mas também da cota de grandes rios e áreas alagadas a jusante (PAIVA et al., 2012; ALVES et al., 2020).

A Figura 6 apresenta as URH's (FAN et al., 2015), onde a AS possui 29,1% de florestas em solo raso; 36,7% de florestas em solo profundo; 1,6 % de agricultura em solo raso; 8,6% de agricultura em solo profundo; 3,2% de campos em solo raso; 9,2 % de campos em solo profundo; 9,6% de várzeas e florestas inundáveis; 0,5% de áreas semi-impermeáveis e 1,5% de espelho d'água.



Fonte: Extraído do produto disponibilizado por Fan et al. (2015).

Na AE é perceptível vastas áreas de inundáveis que circundam os rios principais da região durante o período de cheia, com destaque para a margem esquerda do rio Mamoré, na porção final, que concentra cerca de 50 dos 150 mil km<sup>2</sup> de áreas inundáveis da região. Essas áreas alagáveis durante o período de cheias, conhecidas como “Llanos de Moxos”, são fruto da combinação da região de planície, verificada na Figura 5, e imersão em solos rasos, verificados

na Figura 6 (cor verde). Em cheias de grande magnitude, como a de 2014, as áreas de campo em solo raso (cor amarela) também chegam a ser alagadas (OVANDO et al., 2016).

A dinâmica de alagação dessas áreas inundáveis, principalmente a concentração na margem esquerda do rio Mamoré, é algo essencial para o entendimento do atraso e atenuação de ondas de cheia na região, bem como na atenuação da recessão, devido à retroalimentação ocorrida das áreas alagadas para o curso natural do rio (OVANDO et al., 2016; ESPINOZA et al., 2019; ALVES et al. 2020).

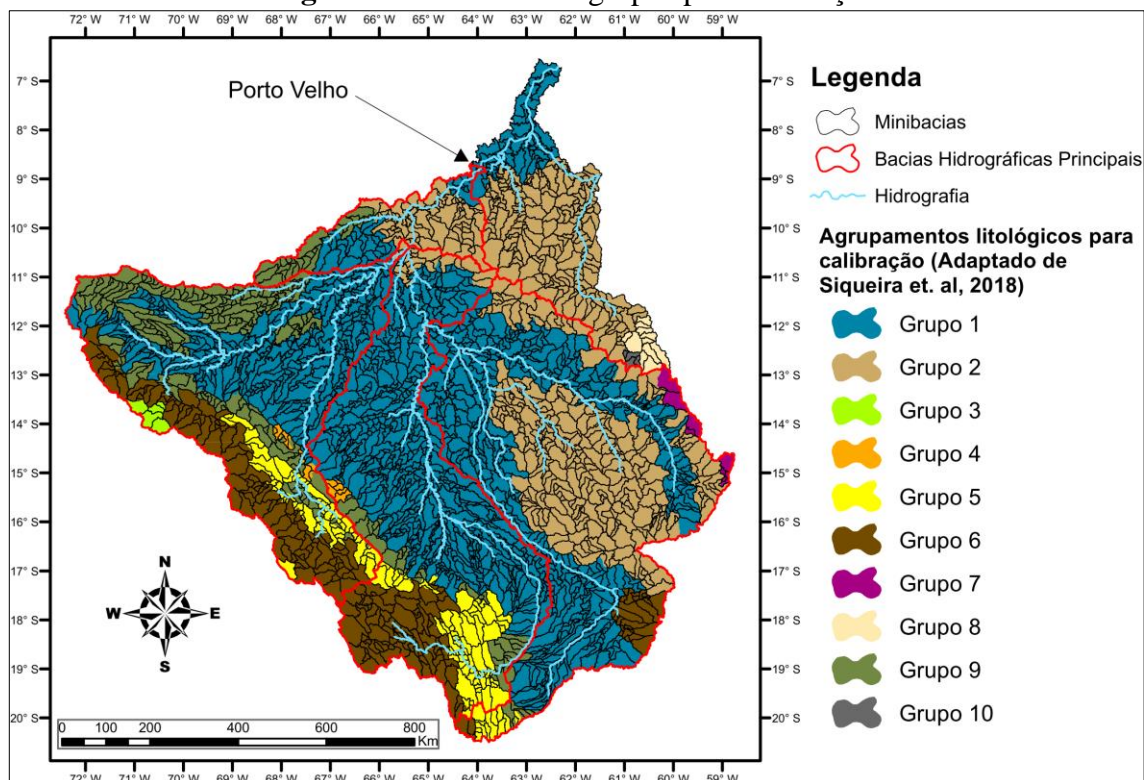
Utilizando-se os mapas da base HidroSHETS (LEHNER et al., 2008) com resolução de 90 metros, e divisão dos trechos de rio a cada 15 km, obteve-se 2.550 minibacias para a AS (Figura 7), com área média de 432 km<sup>2</sup> e declividade média de 1,56 m/km, já utilizando-se a base de dados SASRDD (SIQUEIRA et al., 2018), gerado a partir de MDE de 500 m com remoção de vegetação, foram encontradas 2.361 minibacias, com área média de 466 km<sup>2</sup> e declividade média de 1,66 m/km.

Essas diferenças entre os dois resultados são explicadas pela diferença de resolução entre os MDE's, naturalmente maiores resoluções conseguem representar maiores sinuosidades dos cursos d'água, gerando mais divisões com comprimentos de 15 km e, conseqüentemente, menores áreas, bem como trechos de rio maiores para cada variação de altitude. A Figura 7 também apresenta o agrupamento das minibacias para fins de calibração nas duas configurações.

As maiores diferenças entre as duas bases de elevação do solo são encontradas na relação entre a cota extrapolada da calha principal do rio e a planície de inundação (Figura 8). Com o MDE de 90 m de resolução, 01 (um) metro de extrapolação corresponde em média a 4,4% da área da minibacia, que seria entorno de 19 km<sup>2</sup>, já com o SASRDD essa extrapolação média passaria para 23,6%, que representa cerca de 109 km<sup>2</sup>, 10 (dez) metros de extrapolação corresponderiam em média a 70 km<sup>2</sup> e 198 km<sup>2</sup>, respectivamente. Essa diferença é dada não somente pela diferença entre resoluções dos MDE's, mas também pela remoção computacional da vegetação no caso do produto SASRDD.

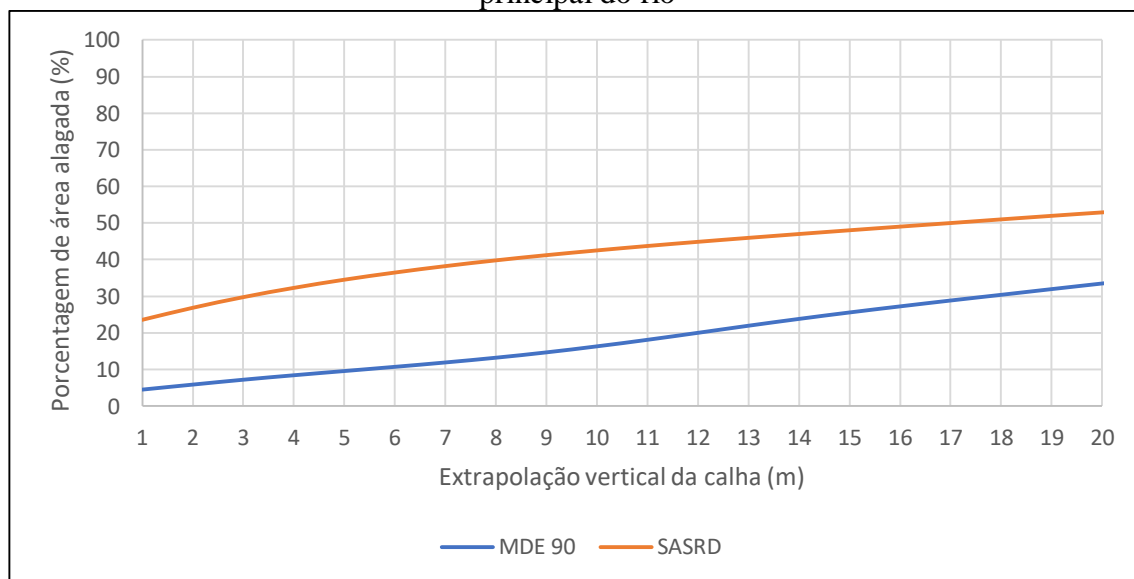


**Figura 7 - Minibacias e grupos para calibração**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 8 - Porcentagem média de ocupação da área da minibacia após extrapolação da calha principal do rio**



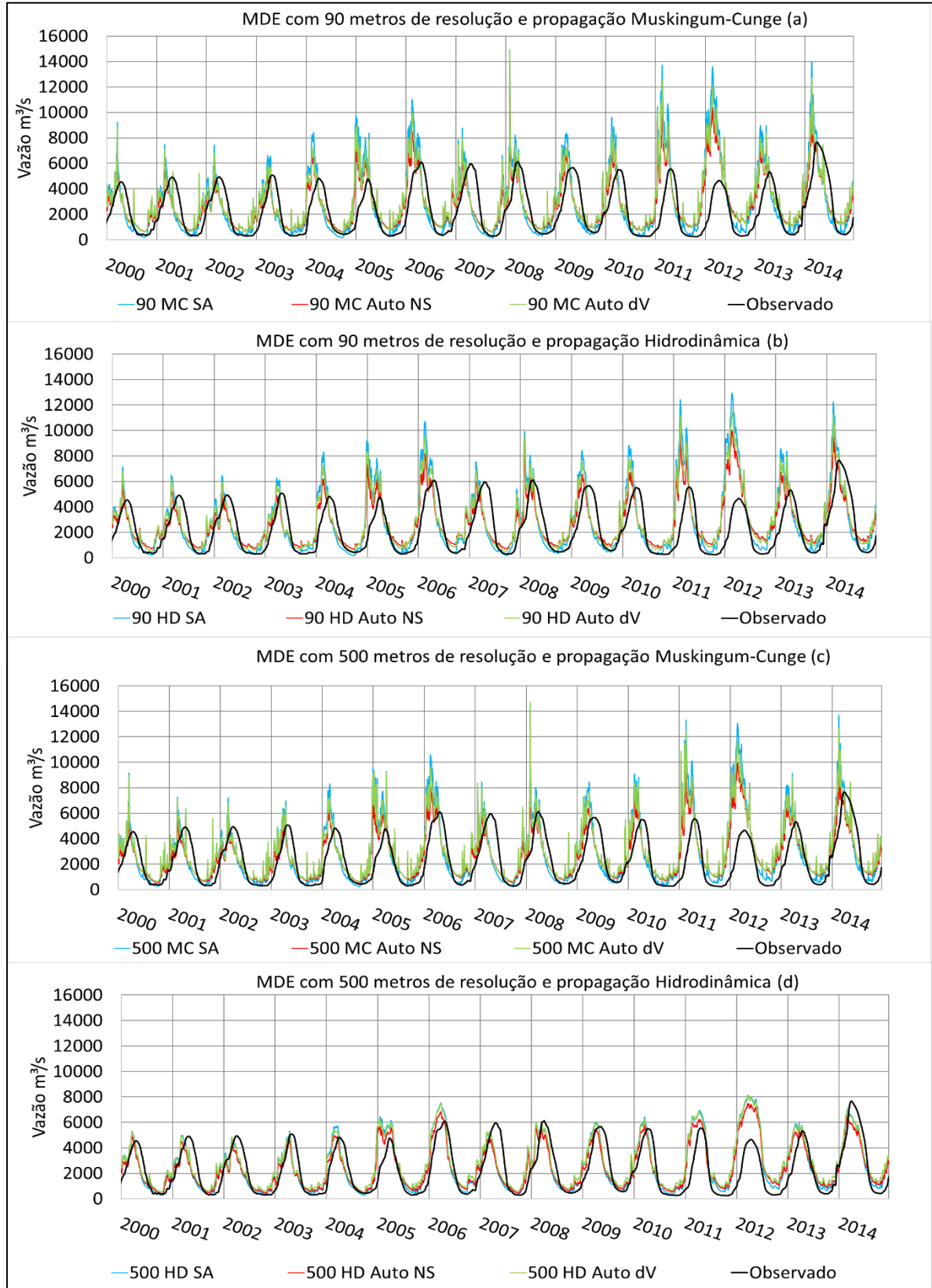
### 2.3.2 Avaliação de desempenho

Conforme descrito na metodologia e sintetizado na Tabela 1, foram simulados e otimizados os parâmetros para o período de 1998 a 2014, porém os dois primeiros anos foram descartados da análise de eficiência, pelo entendimento da necessidade de consolidação das condições hidrológicas iniciais da bacia. Desta forma o período analisado foram os 15 anos existentes entre 2000 e 2014, onde é perceptível que a eficiência das vazões simuladas em comparação com as observadas varia por período, portanto os parâmetros encontrados automaticamente para a otimização de uma determinada função objetivo entre 1998 e 2014 talvez não seja o que tem a melhor eficiência para o mesmo coeficiente no período de 2000 a 2014.

Iniciando-se a análise nas estações de montante para jusante, a Figura 9 apresenta o resultado das simulações para a estação de Príncipe da Beira (15200000) onde as Figuras 9 (a) e (b) apresentam o desempenho do MDE de 90 metros de resolução com os respectivos métodos de propagação da vazão Muskingum-Cunge (MC) e Hidrodinâmico Inercial Local (HD) e as Figuras 9 (c) e (d) apresentam o desempenho do MDE de 500 metros de resolução com ambos os métodos de propagação de vazão.

É perceptível que as vazões simuladas com o MDE de 90 tendem a gerar picos de hidrograma mais acentuados em relação ao MDE de 500 metros, não só pela resolução, mas também pela remoção artificial da vegetação utilizada no segundo caso, isso se deve pelo fato do radar de banda C usado pelo SRTM não conseguir penetrar totalmente na vegetação, principalmente em áreas com densa cobertura de árvores (O'LOUGHLIN et al., 2016), desta forma a vegetação no MDE cria uma barreira para a alagação das planícies em modelos hidrodinâmicos, gerando maior canalização do rio. O efeito de suavização do hidrograma também é observado por Siqueira et al. (2017), onde foi feita a comparação entre o MDE SRTM original e o produto Bare-Erath (O'LOUGHLIN et al., 2016) na bacia hidrográfica do rio Purus.

**Figura 9 - Hidrogramas simulados e observado na estação de Príncipe da Beira (15200000) entre os anos 2000 e 2014.**



Quanto ao método de propagação, diversos estudos indicam que modelos hidrodinâmicos possuem maior aptidão na representação de vazões em áreas com grandes planícies de inundação (YAMAZAKI et al., 2011; PAIVA et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2018), algo que também é percebido quando comparadas as Figura 9 (c) e (d), onde o método MC reproduz um hidrograma com picos acentuados e de curta duração e o método HD tem uma atenuação nesses picos. Em uma análise visual, é nítida a maior aderência dos hidrogramas simulados com base no MDE de 500 metros de resolução com remoção de vegetação e propagação HD, estando os parâmetros do solo calibrados com estas configurações apresentando resultados bem semelhantes para correlação de Pearson, Nash-Sutcliffe e  $\Delta V$ .

Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos resultados, onde é perceptível que a simulação “500 HD Auto NS” é a que apresenta as melhores métricas de desempenho (grifados em amarelo). Percebe-se também que o desempenho varia de acordo com o período simulado estando o período de 2010 a 2014 com resultados inferiores aos anos anteriores, devido a cheia simulada para 2012, que teve erros significativos.

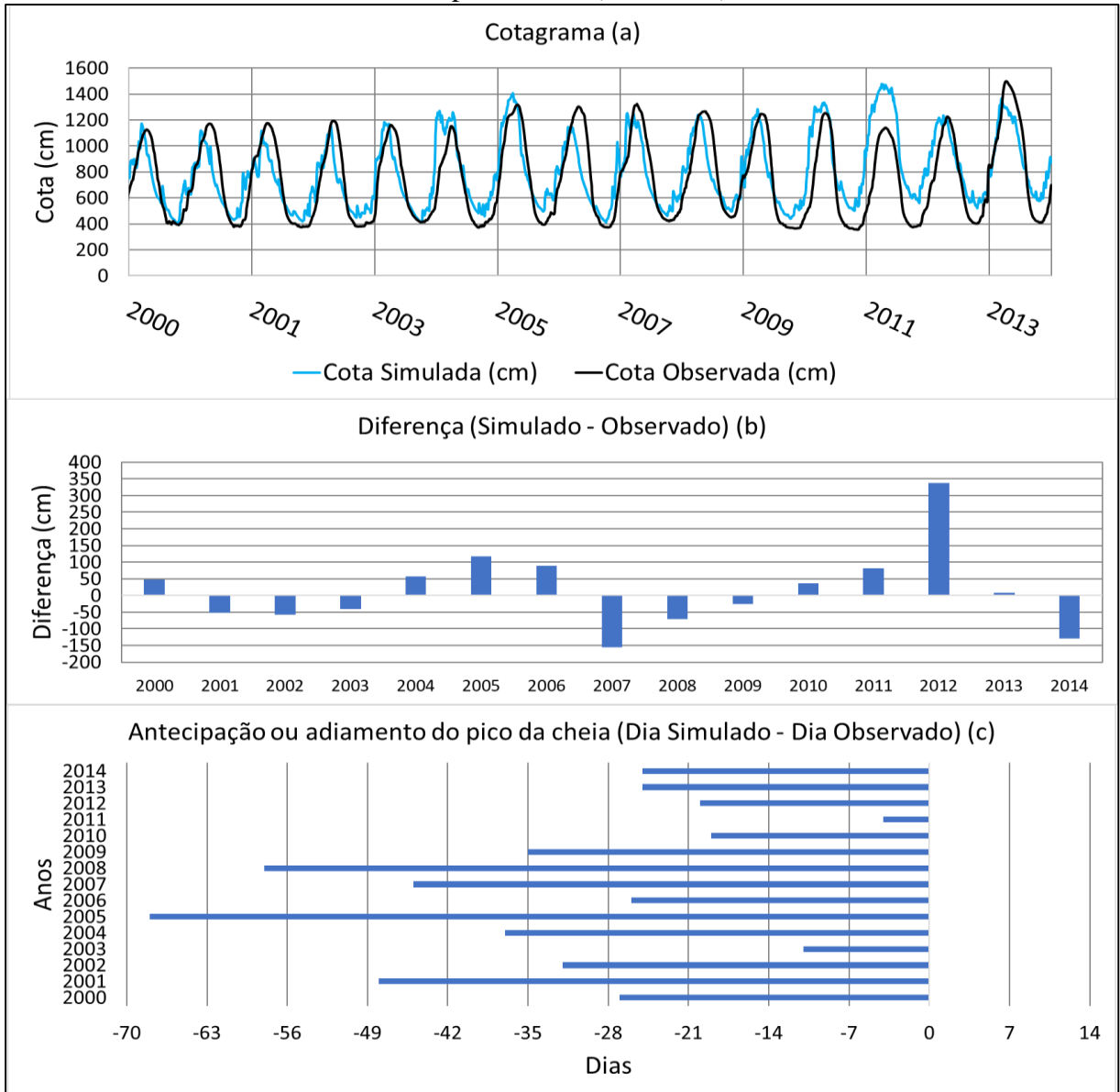
**Tabela 3 - Métricas de desempenho das simulações de Príncipe da Beira (15200000)**

Tipo de Simulação	Correlação (r)				Nash-Sutcliffe (NS)				Porcentagem de Variação do Volume (%)			
	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014
500 HD Auto NS	0.81	0.78	0.8	0.78	0.64	0.61	0.5	0.57	-6.38	3.13	30.92	9.94
500 HD SA	0.78	0.77	0.8	0.78	0.59	0.51	0.38	0.48	-2.77	7.2	35.04	13.9
500 HD Auto dV	0.78	0.77	0.8	0.77	0.59	0.52	0.32	0.47	6.39	16.23	44.92	23.26
500 MC Auto NS	0.74	0.7	0.68	0.68	0.54	0.42	0.1	0.33	1.69	10.1	40.26	18.06
90 HD Auto NS	0.72	0.68	0.66	0.66	0.51	0.39	0.05	0.29	4.53	10.43	40.89	19.24
90 MC Auto NS	0.69	0.65	0.65	0.65	0.46	0.31	-0.04	0.22	6.1	12.81	43.35	21.4
90 HD Auto dV	0.69	0.65	0.64	0.65	0.39	0.18	-0.31	0.04	10.38	18.33	50.27	27.04
500 MC Auto dV	0.67	0.63	0.63	0.63	0.38	0.16	-0.31	0.03	12.22	20.59	53.17	29.4
90 MC Auto dV	0.63	0.6	0.6	0.6	0.29	0.09	-0.4	-0.05	11.63	19.63	51.81	28.41
500 MC SA	0.67	0.65	0.63	0.64	0.29	0	-0.61	-0.16	6.12	17.05	48.56	24.73
90 HD SA	0.67	0.64	0.62	0.63	0.24	-0.04	-0.72	-0.23	4.66	15.49	47.17	23.26
90 MC SA	0.64	0.62	0.59	0.61	0.14	-0.16	-0.85	-0.35	6.43	17	48.76	24.87

Em termos de cota, considerando-se a simulação “500 HD Auto NS” com melhor desempenho e aplicando-se as curvas-chave (SNIRH, 2021) em seus respectivos períodos e tramos de

validade, foi obtida a Figura 10, na qual, Figura 10 (a) ilustra a diferença entre as cotas simuladas e observadas, Figura 10 (b), a diferença entre as cotas máximas e Figura 10 (c), a diferença entre os dias de ocorrência dos picos das cheias simulados e observados, sendo perceptível que a maioria dos erros ficou abaixo de um metro e não há um padrão que indique sub ou superestimação constante dos picos, porém em todos os anos há antecipação no pico da cheia.

**Figura 10 - Comparação de cotas entre simulação 500 HD Auto NS e observadas para Príncipe da Beira (15200000)**



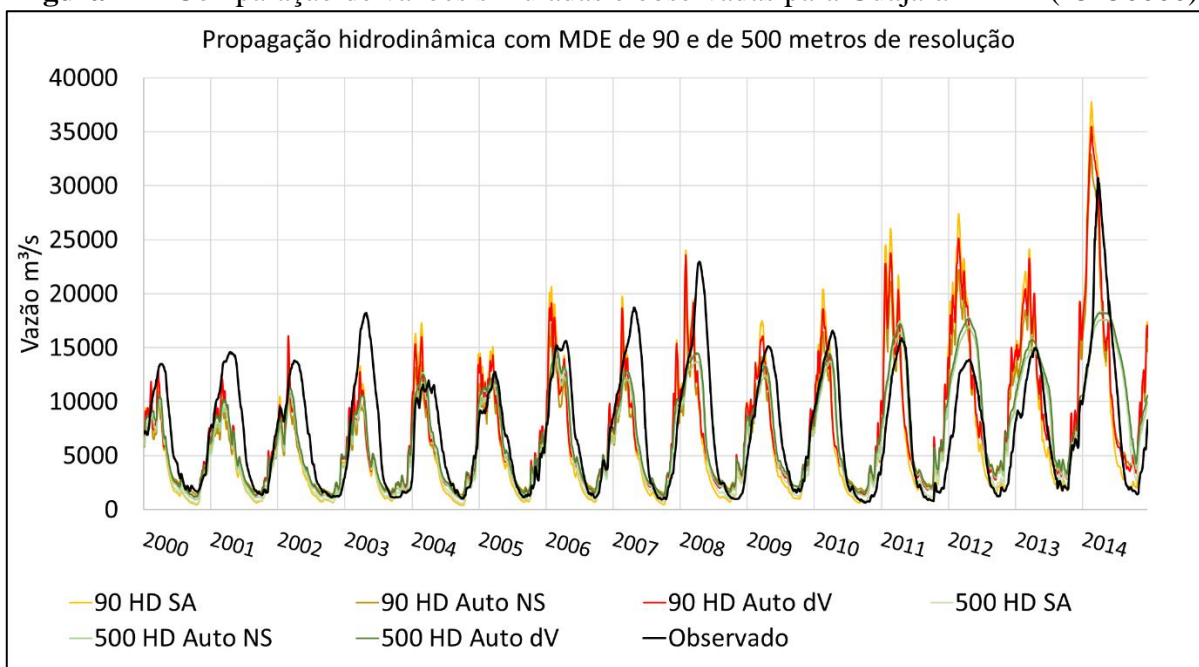
**Nota:** Figura 10 (a) ilustra a diferença entre as cotas simuladas e observadas, Figura 10 (b), a diferença entre as cotas máximas e Figura 10 (c), a diferença entre os dias de ocorrência dos picos das cheias simulados e observados.

Para a estação de Guajará-Mirim (15250000), assim como para Príncipe da Beira (1520000), os melhores ajustes foram obtidos para simulações com propagação hidrodinâmica, porém não há uma indicação clara de qual MDE teve o melhor desempenho na representação das vazões.

A Figura 11 ilustra as simulações com o MDE com 500 metros de resolução e remoção de vegetação. É possível observar a representação da suavidade na transição entre as vazões, porém os picos de 09 das 15 cheias analisadas foram subestimados, principalmente em vazões de maior porte, como as de 2003, 2007, 2008 e 2014, onde os picos de vazão foram subestimados em cerca de 8.000, 6.000, 8.000 e 12.000 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, o que representaria um erro de quase três metros a menos na cheia de 2014 pela curva-chave.

Por outro lado, as simulações que tiveram como base o MDE de 90 metros apresentaram um hidrograma com variações bruscas de vazão, mas que conseguiram representar melhor a magnitude das cheias que ultrapassaram os 20.000 m<sup>3</sup>/s, sempre com antecipação do pico de vazão e magnitudes maiores que as observadas.

**Figura 11** - Comparação de vazões simuladas e observadas para Guajará-Mirim (15250000)





A Tabela 4 apresenta um resumo das métricas de desempenho onde estão selecionadas em amarelo as simulações que obtiveram os melhores resultados por período e globais, despontando as simulações “500 HD SA” e “500 DH Auto dV”.

**Tabela 4 - Métricas de desempenho das simulações de Guajará-Mirim (15250000)**

Tipo de Simulação	Correlação ( r )				Nash-Sutcliffe (NS)				Porcentagem de Variação do Volume (%)			
	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014
500 HD Auto NS	0.81	0.85	0.87	0.8	0.4	0.61	0.72	0.61	-33.34	-21.3	13.37	-12.49
500 HD SA	0.81	0.85	0.88	0.81	0.41	0.63	0.75	0.63	-34.58	-21.63	12.96	-13.12
500 HD Auto dV	0.79	0.84	0.87	0.8	0.49	0.66	0.68	0.63	-25.19	-13.47	20.66	-4.75
500 MC Auto NS	0.75	0.72	0.73	0.68	0.31	0.43	0.38	0.39	-34.19	-21.68	17.21	-11.5
90 HD Auto NS	0.74	0.71	0.75	0.69	0.33	0.43	0.41	0.4	-31.39	-20.58	19.01	-9.65
90 MC Auto NS	0.7	0.68	0.7	0.66	0.32	0.39	0.26	0.33	-30.09	-18.91	20.99	-7.97
90 HD Auto dV	0.71	0.69	0.74	0.68	0.39	0.41	0.22	0.33	-24.64	-13.22	27.41	-2.09
500 MC Auto dV	0.69	0.67	0.69	0.65	0.36	0.39	0.11	0.27	-24.11	-12.19	29.21	-0.94
90 MC Auto dV	0.66	0.64	0.66	0.62	0.3	0.32	0	0.19	-24.77	-13.2	27.82	-1.98
500 MC SA	0.72	0.69	0.7	0.67	0.32	0.37	0.04	0.23	-30.92	-17.07	23.06	-6.84
90 HD SA	0.72	0.68	0.72	0.68	0.31	0.33	0.04	0.21	-32.02	-18.1	22.12	-7.86
90 MC SA	0.68	0.66	0.67	0.64	0.26	0.26	-0.17	0.09	-31.11	-17.25	23.25	-6.9

Uma hipótese é de que as vazões estejam sendo atenuadas excessivamente pelo modelo baseado no MDE de 500 metros com remoção de vegetação, principalmente considerando-se que a simulação do escoamento na versão do MGB adotada neste trabalho é unidimensional (1-D).

Este efeito de atenuação do MDE Bare-Earth (O’LOUGHLIN et al., 2016) foi verificado por Siqueira et al. (2017) na bacia hidrográfica do rio Purus, indicando um atraso na subida dos níveis do rio devido a um espalhamento precoce da vazão superficial, porém considerando a remoção de vegetação favorável à previsão de vazões altas, relatando ganhos na acertabilidade temporal do pico da cheia em relação ao SRTM original, que tinha a tendência de antecipação.

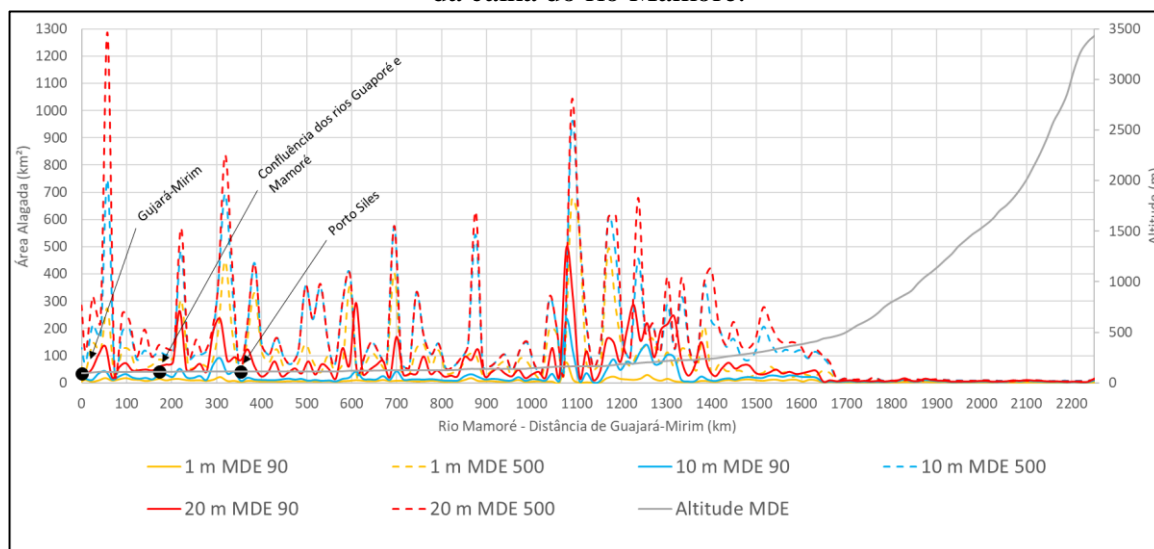
Por sua vez, Fleischmann et al. (2020), em trabalho feito na bacia hidrográfica do rio Negro, alertou que regiões com grandes várzeas que interligam canais de vários cursos d’água têm suas áreas alagadas superestimadas por modelos hidrodinâmicos 1-D e vazões muito atenuadas, sendo recomendado a utilização de modelos hidrodinâmicos bidimensionais (2 -D), que não

desprezam a velocidade de propagação das vazões na planície de inundação e conseguem representar a drenagem ao longo das áreas úmidas interfluviais.

A região dos Llanos de Moxos se encaixa no tipo de região estudada por Feischmann et al. (2020), onde Bourrel et al. (2009) e Ovando et al. (2016) sugerem que a região tenha um fluxo exógeno de inundação apenas em um período curto no início de grandes cheias, onde desempenha um papel importante no amortecimento de vazões (no máximo até o mês de fevereiro nas cheias de 2008 e 2014), após isso as áreas úmidas passam a ter um fluxo invertido (endógeno), onde contribuem para o aumento da magnitude e duração dos eventos de cheia ainda durante a enchente.

A combinação de um MDE com resolução menos detalhada, remoção de vegetação e propagação 1-D (onde planícies de inundação têm apenas o efeito de dissipação da vazão e em tempo único) é algo que pode explicar o menor desempenho das simulações tipo “500 HD” para eventos de cheia de maior magnitude no rio Mamoré. A Figura 12 ilustra grandes diferenças na estiva das áreas alagadas ao longo do curso principal do rio Mamoré mediante a utilização dos dois diferentes tipos de MDE.

**Figura 12** - Diferença entre áreas alagadas por MDE para 01, 10 e 20 metros de extrapolação da calha do rio Mamoré.

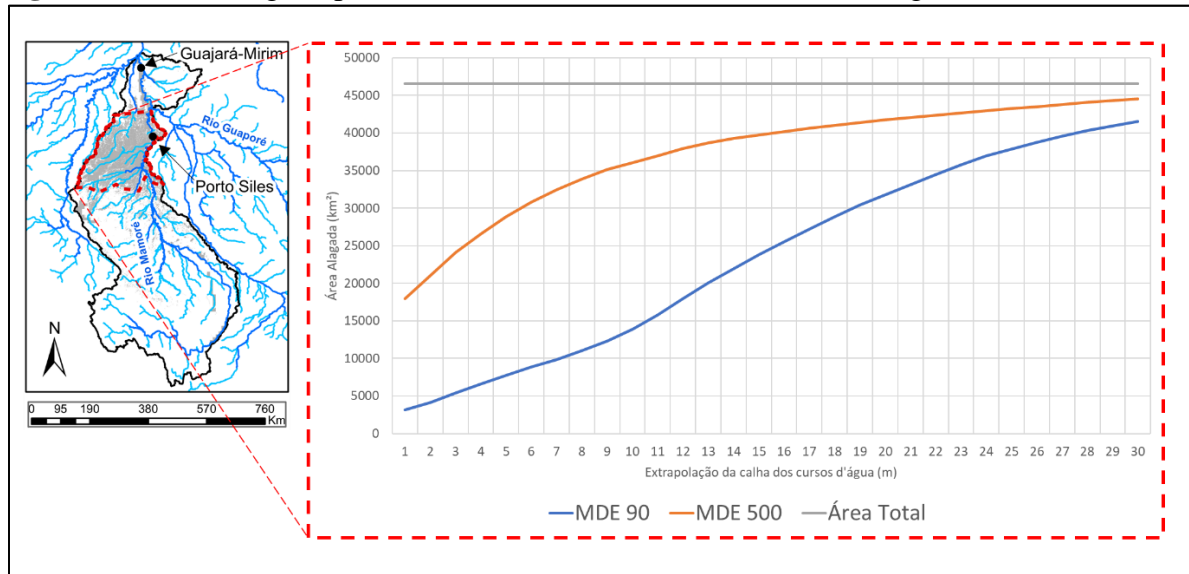


A Figura 13, apresenta o somatório da área alagada na região dos Llanos de Moxos variando por cota de extrapolação, chegando a haver uma diferença de estimativa de até 22.858 km² entre



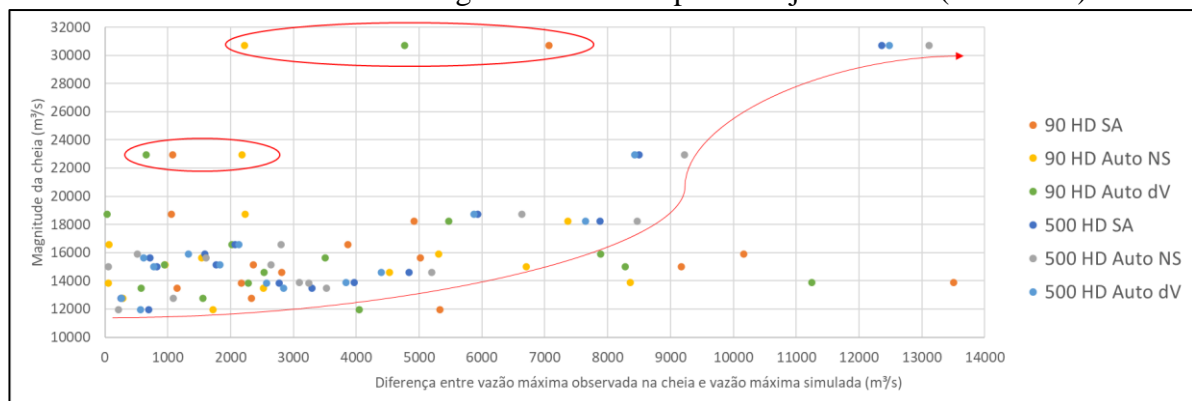
os dois MDE's em extrapolações de calhas equivalentes a oito metros e aproximação de seus valores na medida em que os divisores de águas vão sendo atingidos.

**Figura 13 - Área alagada por cota nos Llanos de Moxos da bacia hidrográfica do rio Mamoré**



A Figura 14 apresenta a comparação da diferença absoluta entre as vazões máxima simuladas e vazões máxima obtidas com a magnitude da cheia, onde pode ser identificado que os resultados das simulações “500 HD” possuem maior acertabilidade para anos em que as vazões não ultrapassam os 17 mil m<sup>3</sup>/s, acima disso os valores previstos passam a ter um nítido distanciamento da vazão observada estando mais adequadas as simulações do tipo “90 HD”, principalmente em cheias que ultrapassam 20 mil m<sup>3</sup>/s.

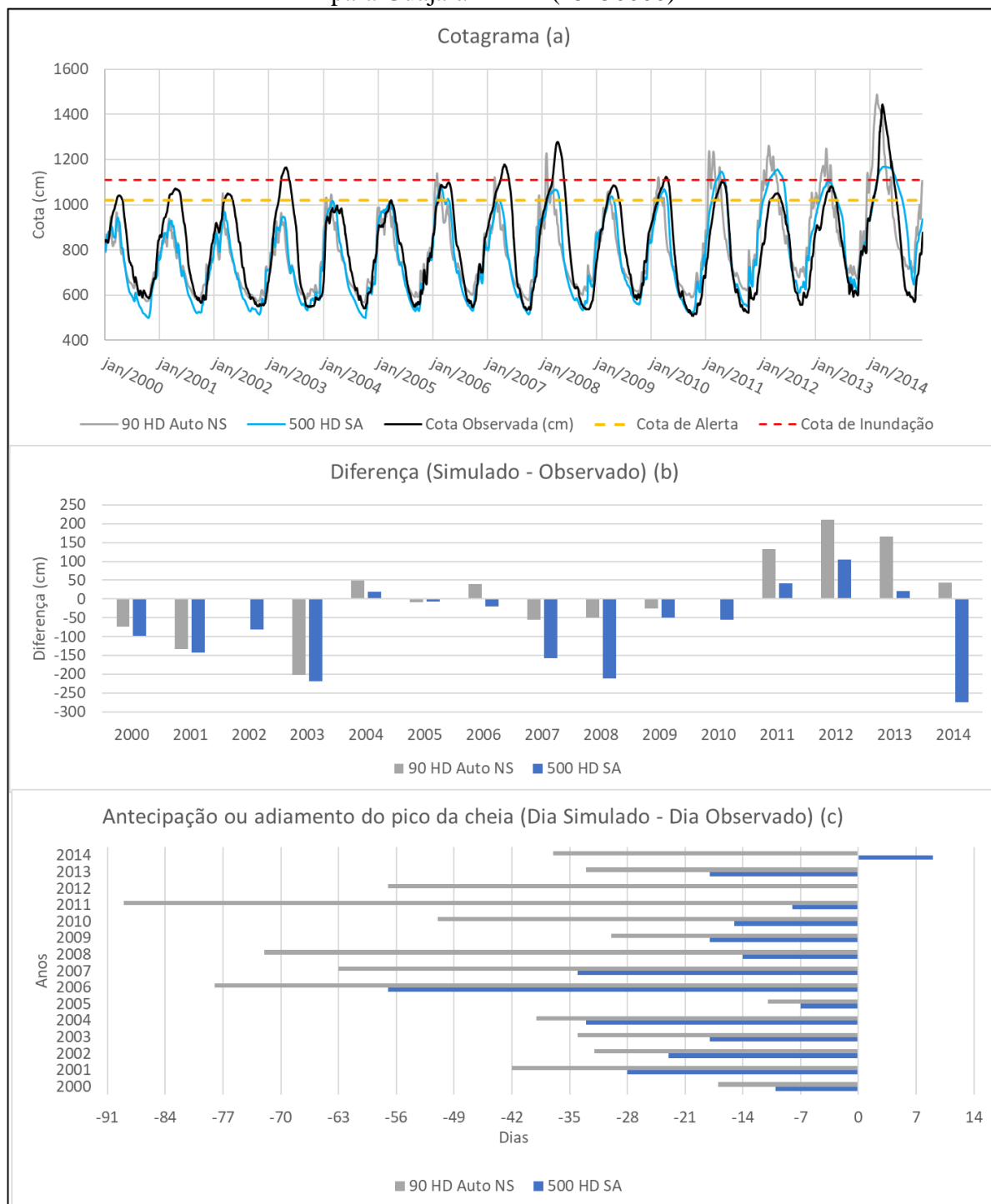
**Figura 14 - Comparação da diferença absoluta entre as vazões máxima simuladas e vazões máxima obtidas com a magnitude da cheia para Guajará-Mirim (15250000).**



Em termos de cotas, selecionando-se as simulações “500 HD SA” e “90 HD Auto NS” como aquelas que melhor representaram suas respectivas resoluções, é perceptível pela Figura 15 (a) que há um comportamento semelhante entre as duas simulações, onde na maioria dos anos elas seguem a mesma tendência de subestimar ou superestimar as cotas de pico, porém com erros menores sendo observados na simulação “90 HD Auto NS” quando a tendência é subestimar e erros menores sendo observados na simulação “500 HD SA” quando a tendência é superestimar (Figura 15 b).

Com relação ao atingimento da cota de inundação, estabelecida para 1110 cm (CPRM, 2021), a simulação “90 HD Auto NS” apresenta um falso negativo, no ano de 2003, e quatro falsos positivos, nos anos de 2006, 2011, 2012 e 2013. Por outro lado, a simulação “500 HD SA” apresentou três anos falsos negativos, 2003, 2007 e 2008, bem como dois anos falsos positivos, 2011 e 2012.

**Figura 15 - Comparação entre simulações 90 HD Auto NS, 500 HD SA e cotas observadas para Guajará-Mirim (15250000)**



**Nota:** Figura 15 (a) ilustra a diferença entre as cotas simuladas e observadas, Figura 15 (b), a diferença entre as cotas máximas e Figura 15 (c), a diferença entre os dias de ocorrência dos picos das cheias simulados e observados

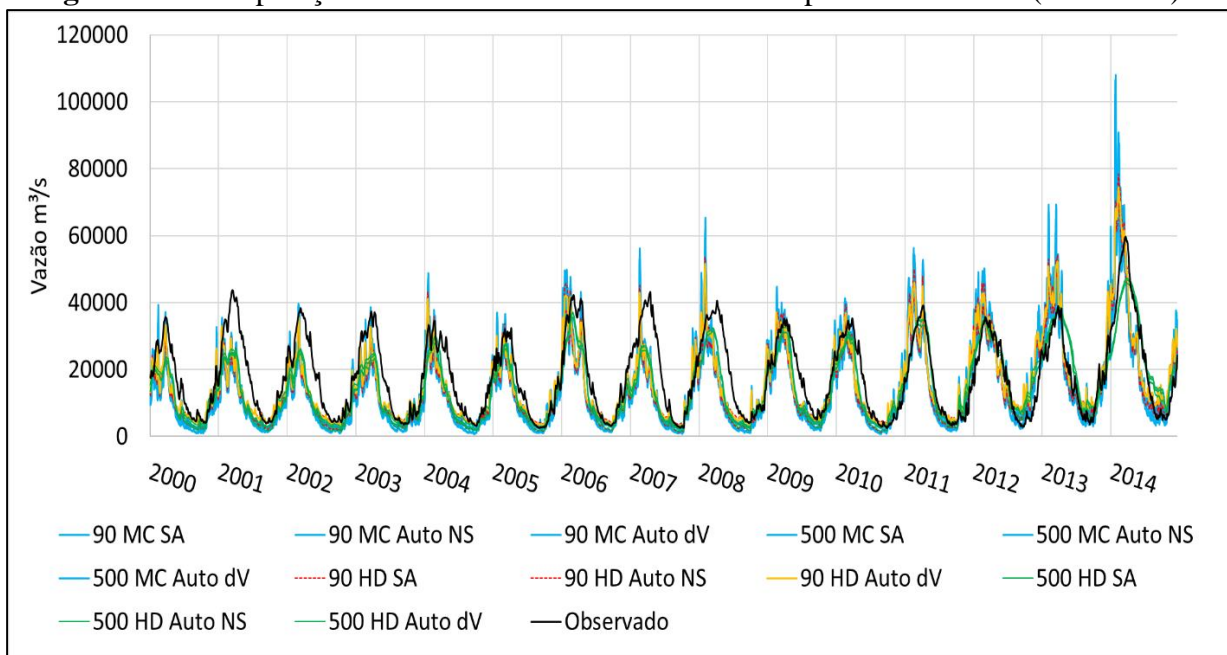
A estação de Porto Velho (15400000) está localizada a jusante da confluência do rio Mamoré com o rio Beni, onde é perceptível uma mudança no patamar da vazão. Até a estação fluviométrica de Guajará-Mirim (15250000) a vazão média anual registrada para a bacia, para o período de 2000 a 2014, é de aproximadamente 7.500 m<sup>3</sup>/s e vazões máximas anuais com média de 16.600 m<sup>3</sup>/s, com a entrada do rio Beni essas vazões passam para 18.300 m<sup>3</sup>/s e 39.500 m<sup>3</sup>/s. A partir desse ponto o rio passa a ter uma característica de variações mais bruscas de vazões, fruto das maiores declividades mostradas na Figura 5 e de uma maior pluviometria na região (ESPINOZA et al., 2015; ESPINOZA et al., 2019) em comparação com as outras sub-bacias.

Assim como para Guajará-Mirim, os melhores ajustes foram obtidos para simulações com propagação hidrodinâmica, porém não há uma indicação clara de qual MDE teve o melhor desempenho na representação das vazões, conforme mostra a Figura 16.

Na Tabela 5 é apresentado um resumo das métricas de desempenho onde estão selecionadas em amarelo as simulações que obtiveram os melhores resultados por período e globais, despontando as simulações “500 HD SA”, “500 HD Auto dV” e “90 HD Auto dV”.

É perceptível que todas as métricas de desempenho estão melhores para o período de 2010 a 2014, bem como há uma tendência de subestimação das vazões entre 2000 e 2009, refletida principalmente na métrica de porcentagem da diferença de volume ( $\Delta V$ ) e também perceptível na estação de Guajará-Mirim.

**Figura 16 - Comparação de vazões simuladas e observadas para Porto Velho (15400000)**



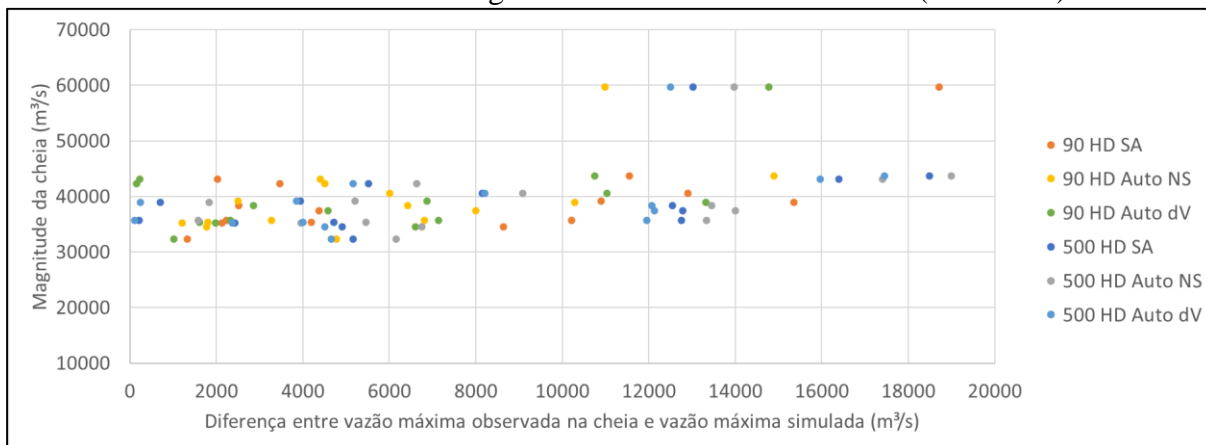
**Tabela 5 - Métricas de desempenho das simulações de Porto Velho (15400000)**

Tipo de Simulação	Correlação ( r )				Nash-Sutcliffe (NS)				Porcentagem de Variação do Volume (%)			
	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2000-2014
500 HD Auto NS	0.93	0.91	0.94	0.88	0.46	0.62	0.87	0.68	-37.32	-27.98	1.32	-20.66
500 HD SA	0.93	0.91	0.94	0.89	0.46	0.63	0.89	0.69	-38.43	-28.85	-0.23	-21.84
500 HD Auto dV	0.92	0.91	0.93	0.88	0.59	0.7	0.86	0.73	-29.65	-22.48	6.82	-14.47
500 MC Auto NS	0.88	0.83	0.85	0.8	0.23	0.42	0.68	0.48	-44.44	-32.83	-3.18	-26.1
90 HD Auto NS	0.87	0.81	0.85	0.8	0.4	0.49	0.71	0.55	-33.98	-26.17	3.68	-18.17
90 MC Auto NS	0.87	0.82	0.85	0.8	0.27	0.44	0.67	0.49	-42.52	-31.33	-1.39	-24.36
90 HD Auto dV	0.85	0.8	0.85	0.8	0.51	0.54	0.64	0.57	-28.37	-20.31	10.3	-12.13
500 MC Auto dV	0.86	0.8	0.83	0.79	0.36	0.47	0.61	0.5	-37.94	-26.39	4.32	-19.27
90 MC Auto dV	0.85	0.79	0.83	0.78	0.35	0.45	0.56	0.47	-38.13	-26.62	4.04	-19.5
500 MC SA	0.87	0.82	0.85	0.81	0.34	0.45	0.56	0.46	-41.06	-28.73	1.53	-22.01
90 HD SA	0.86	0.8	0.85	0.81	0.44	0.47	0.57	0.51	-35.01	-25.26	6.02	-17.37
90 MC SA	0.86	0.8	0.83	0.8	0.32	0.41	0.48	0.42	-41.13	-28.77	1.62	-22.01

Diferentemente dos resultados obtidos para Guajará-Mirim, não há uma indicação clara da existência de uma atenuação excessiva de vazões do modelo baseado no MDE com resolução de 500 metros e remoção de vegetação, bem como do maior desempenho em vazões altas para

as simulações baseadas no MDE de 90 metros de resolução (Figura 17). Apesar dos resultados na estação fluviométrica de Porto Velho sofrer interferência dos resultados obtidos para Guajará-Mirim, a magnitude das vazões escoadas pelo rio Beni mais que dobra a quantidade de água escoada pelo rio Mamoré, amenizando a tendência observada na Figura 14.

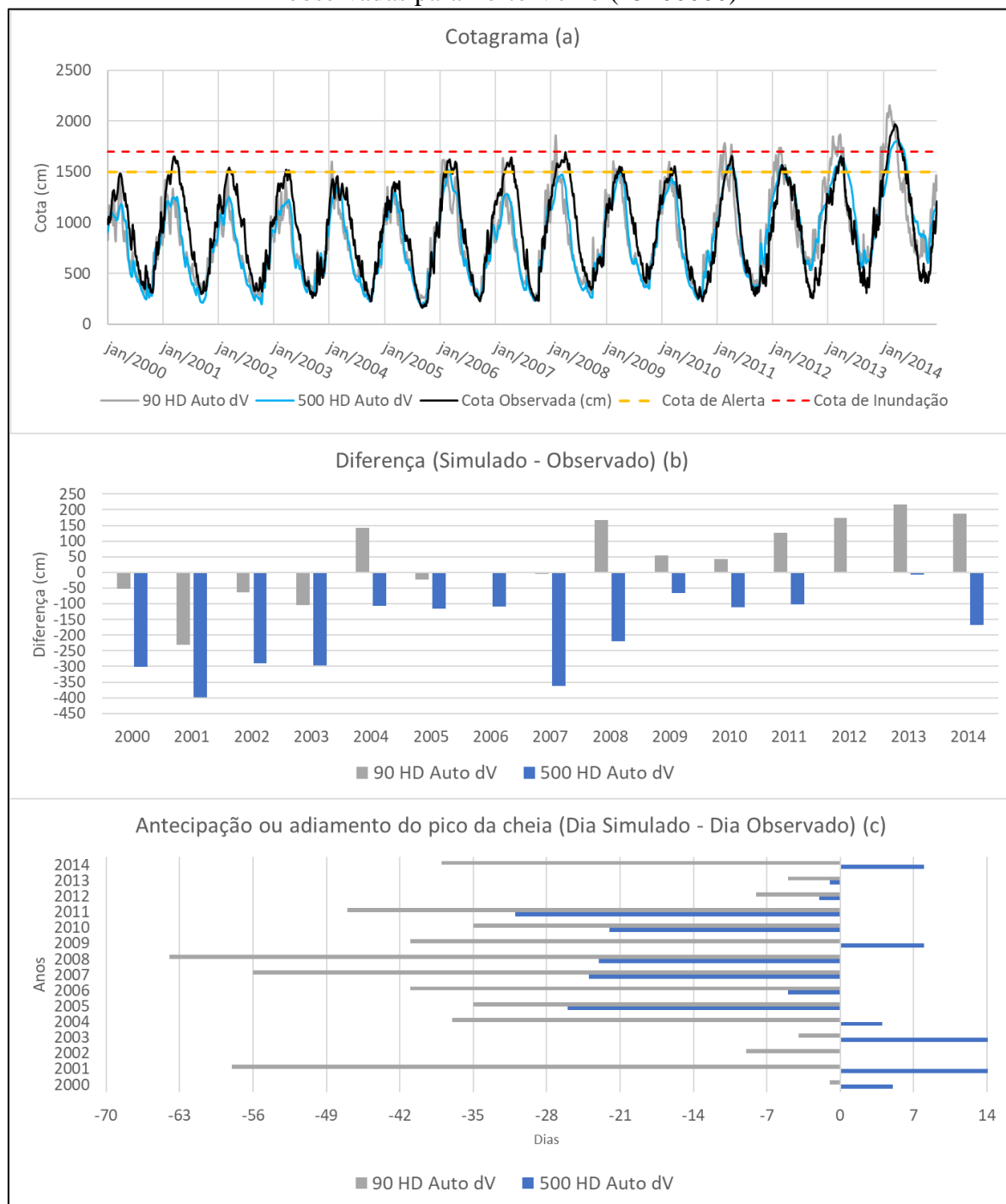
**Figura 17** - Comparação da diferença absoluta entre as vazões máximas simuladas e vazões máximas obtidas com a magnitude da cheia em Porto Velho (15400000).



A Figura 18 (a) compara as simulações “500 HD Auto dV” e “90 HD Auto dV” em termos de cota. Pela Figura 18 (b) é perceptível que a simulação “500 HD auto dV” sempre tende a subestimar as cotas máximas e a simulação “90 HD Auto dV” tende a subestimar no período compreendido entre 2000 a 2007 e superestimar entre 2008 e 2014. Em relação à previsão do dia de ocorrência da maior vazão, a simulação baseada no MDE de 500 metros de resolução nitidamente tem o melhor ajuste, conforme observado em todas as estações anteriormente analisadas e por Siqueira et al. (2017).

A cota de inundação, equivalente a 1700 cm (CPRM, 2021), só foi observada em 2014 no período estudado. A simulação “90 HD Auto dV” apresenta quatro falsos positivos, nos anos de 2008, 2011, 2012 e 2013, enquanto a simulação “500 HD auto dV” acerta o único ano em que ela ocorreu.

**Figura 18 - Comparação entre simulações 90 HD Auto dV, 500 HD Auto dV e cotas observadas para Porto Velho (15400000)**



**Nota:** Figura 18 (a) ilustra a diferença entre as cotas simuladas e observadas, Figura 18 (b), a diferença entre as cotas máximas e Figura 18 (c), a diferença entre os dias de ocorrência dos picos das cheias simulados e observados

Em todas as localidades analisadas as vazões foram melhor representadas pelo método hidrodinâmico inercial local (PONTES et al., 2017) em comparação com o método Muskingum-Cunge, adotado na versão original do modelo (COLLISCHONN et al., 2001). Não houve um consenso de qual Modelo Digital de Elevação, produto Bare-Earth 500 m (O'LOUGHLIN et al., 2016) ou HidroSHETS 90 m (LEHNER et al., 2008), é o mais adequado para extrair as características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Madeira.

As simulações baseadas no Bare-Earth, apesar de possuírem melhores valores para as métricas de correlação de Pearson e Nash-Sutcliffe, mostrou atenuações de vazão excessivas para as bacias hidrográficas dos rios Mamoré e Beni. Por outro lado, as simulações baseadas no HidroSHETS 90 m, apesar de terem apresentados picos de vazão acentuados e grande antecipação na ocorrência da vazão máxima anual, apresentaram melhores métricas de erro percentual de volume em Porto Velho e melhor acertabilidade na magnitude de cheias fora da média.

## **2.4 Considerações Finais**

Este artigo avaliou a capacidade do Modelo de Grandes Bacias (MGB) em simular cheias para as localidades de Príncipe da Beira, Guajará Mirim e Porto Velho, utilizando valores de calibração já disponibilizados por outro trabalho científico (SIQUEIRA et al., 2018), porém com diferentes fontes de precipitação, características fisiográficas da bacia e período de simulação, onde, mesmo sem haver uma calibração manual para os novos dados de entrada, as vazões simuladas acompanharam a tendência geral das vazões observadas.

Foi demonstrado que o referido modelo possui capacidade de representar vazões da área de estudo mediante refinamento nos parâmetros calibráveis do solo, bem como contribuir para compreensão da dinâmica da bacia hidrográfica do rio Madeira e para fornecer informações que auxiliem na minimização dos efeitos de eventos extremos de cheia.

As métricas de desempenho apresentaram uma evolução progressiva quando divididas a cada cinco anos, indicando que há a possibilidade de ocorrência de mudança de tendência nos parâmetros do solo, evolução dos mecanismos de estimativa de precipitação via satélite ou que



a bacia hidrográfica do rio Madeira necessita de um tempo maior que 5, 10 ou 15 anos de simulação para estabelecimento adequado das condições hidrológicas iniciais da bacia.

Em trabalhos futuros, para melhorar a aderência entre os hidrogramas simulados e observados, é recomendável a calibração manual dos parâmetros do solo e que seja verificada a utilização de modelos bidimensionais de propagação de vazão que possam representar a complexidade de grandes áreas alagáveis, como a região de Llanos de Moxos.

### **Referências**

ADAMY, A. Dinâmica fluvial do rio Madeira. *In*: SILVA, R. G. da C. (Org.). **Porto Velho: cultura, natureza e território**. Porto Velho: Temática; Edufro, 2016, p. 133-160.

ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia amazônica**. 2018. 90f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19642>. Acesso em: 05 out. 2021.

ALVES, L. G. S.; SILVA, D. D.; VAUCHEL, P.; FRAIZY, P.; FILIZOLA, N. P. Variable backwater and channel roughness: effects on Solimões River discharge. **Comptes Rendus. Géoscience**, [s.l.], v. 1, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5802/crgeos.35>.

BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 387, p. 33-45, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>.

BECK, H. E.; DIJK, A. I. J. M. van; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; ROO, A. de. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 21, p. 589-615, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.

BERBERAN-SANTOS, M. N.; BODUNOV, E. N.; POGLIANI, L. On the barometric formula. **Am. J. Phys.**, [s.l.], v. 65, n. 5, p. 404-412, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.18555>.

BOURREL, L.; PHILLIPS, L.; MOREAU, S. The dynamics of floods in the Bolivian Amazon basin. **Hydrol. Processes**, [s.l.], v. 23, p. 3161-3167, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.v23:22>.

BRASIL. Controladoria Geral da União. **Relatório de Fiscalização nº 201408699 – Diagnóstico situacional dos efeitos da cheia do Rio Madeira em Porto Velho, Rondônia**. Brasília, DF: 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Boletim Semanal de Monitoramento das Cheias na Bacia do Rio Madeira – Informe nº17**. [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2019. Disponível em: [https://www.cprm.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php#](https://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php#). Acesso em: 28 nov. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Boletim de Monitoramento Hidrológico da Bacia do Rio Madeira – Boletim nº 03/2021**. [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2021. Disponível em: [https://www.cprm.gov.br/sace/boletins/Madeira/20210219\\_18-20210219%20-%20180021.pdf](https://www.cprm.gov.br/sace/boletins/Madeira/20210219_18-20210219%20-%20180021.pdf). Acesso em: 03 ago. 2021.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270f. Tese (Doutorado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2500>. Acesso em: 05 out. 2021.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **RBRH**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 27-39, jul./set. 2003. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n3.p27-39>.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrolog. Sci. J.**, [s.l.], v. 52, p. 878-895, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A. S. **Manual de Referência Teórica do MGB. HGE, IPH**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020.

CORRÊA, A. C. S.; DALL'IGNA, L. G.; SILVA, M. J. G.; JORDÃO, A. A. Rio Madeira: a cheia histórica de 2013/2014. *In*: SILVA, R. G. da C. (Org.). **Porto Velho: cultura, natureza e território**. Porto Velho: Temática; Edufro, 2016, p. 119-132.

CORREA, S. W.; PAIVA, R. C. D.; ESPINOZA, J. C.; COLLISCHONN, W. Multi-decadal hydrological retrospective: case study of Amazon floods and droughts. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 549, p. 667-684, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>.

DUAN, Q. Y.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1029/91wr02985>.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; FRAPPART, F.; LAVADO, W.; SANTINI, W.; GUYOT, J. L. The major floods in the Amazonas river and tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970–2012 period: a focus on the 2012 flood. **Journal of Hydrometeorology**, [s.l.], v. 14, p. 1000-1008, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0100.1>.

ESPINOZA, J. C.; MARENGO, J. A.; RONCHAIL, J.; MOLINA, J.; NORIEGA, L.; GUYOT, J. L. The extreme 2014 flood in South-Western Amazon basin: the role of tropical-subtropical

South Atlantic SST gradient. **Environ. Res. Lett.**, [s.l.], v. 9, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>.

ESPINOZA, J. C.; CHAVEZ, S.; RONCHAIL, J.; JUNQUAS, C.; TAKAHASHI, K.; LAVADO, W. Rainfall hotspots over the south tropical Andes: spatial distribution, rain intensity, and the relations with circulação atmosférica em grande escala. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 51, p. 3459-3475, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>.

ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O.; RUSCICA, R.; CONDOM, T.; WONGCHUIG-CORREA, S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. **J. Hydrol. Reg. Stud.**, [s.l.], v. 26, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>.

ESPINOZA, J. C.; GARREAUD, R.; POVEDA, G.; ARIAS, P. A.; MOLINA-CARPIO, J.; MASIOKAS, M.; VIALE, M.; SCAFF, L. Hydroclimate of the Andes part I: main climatic features. **Front. Earth Sci.**, 20 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064>.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica. **RBRH**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21, 2015, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/304991815\\_UM\\_MAPA\\_DE\\_UNIDADES\\_DE\\_RESPONSA\\_HIDROLOGICA\\_PARA\\_A\\_AMERICA\\_DO\\_SUL](https://www.researchgate.net/publication/304991815_UM_MAPA_DE_UNIDADES_DE_RESPONSA_HIDROLOGICA_PARA_A_AMERICA_DO_SUL). Acesso em: 05 out. 2021.

FILIZOLA JUNIOR, N.; LATRUBESSE, E.; FRAIZY, P.; SOUZA, R.; GUIMARÃES, V.; GUYOT, J. Was the 2009 flood the most hazardous or the largest ever recorded in the Amazon?. **Geomorphology**, [s.l.], v. 215, p. 99-105, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.028>.

FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; SIQUEIRA, V. A.; PARIS, A.; MOREIRA, D. M.; PAPA, F.; BITAR, A. A.; PARRENS, M.; AIRES, F.; GARAMBOIS, P. A. Trade-offs entre modelos hidrodinâmicos de rios regionais 1-D e 2-D. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 56, e2019WR026812, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR026812>.

FÖEGER, L. B.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M. Simulação Hidrológica com propagação inercial de vazão: estudo de caso na bacia do rio Madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337797213\\_SIMULACAO\\_HIDROLOGICA\\_COM\\_PROPAGACAO\\_INERCIAL\\_DE\\_VAZAO\\_ESTUDO\\_DE\\_CASO\\_NA\\_BACIA\\_DO\\_RIO\\_MADEIRA](https://www.researchgate.net/publication/337797213_SIMULACAO_HIDROLOGICA_COM_PROPAGACAO_INERCIAL_DE_VAZAO_ESTUDO_DE_CASO_NA_BACIA_DO_RIO_MADEIRA). Acesso em: 05 out. 2021.

GERMANO, A. O.; CASTILHO, A.; CANDIDO, M.; REIS, F. Cheia de 2014 na bacia do rio Madeira. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21, 2015, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: 2015. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15049>. Acesso em: 05 out. 2021.

GUYOT, J. L. **Hydrogéochimie dès fluves de l'Amazonie Bolivienne**. 1993. 262f. Tese (Doctorat d'État Spécialité Géologie) – Institut Français de Recherche Scientifique Pour Le Développement en Coopération. Paris, France, 1993. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/32975494\\_Hydrogeochimie\\_des\\_Fleuves\\_de\\_l'Amazonie\\_Bolivienne](https://www.researchgate.net/publication/32975494_Hydrogeochimie_des_Fleuves_de_l'Amazonie_Bolivienne). Acesso em: 05 out. 2021.

GUYOT, J. L.; FILIZOLA, N.; QUINTANILLA, J.; CORTEZ, J. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. *In*: WALLING, D. E. (Ed.). **Erosion and sediment yield: global and regional perspectives**. Oxfordshire, UK: IAHS Publication, 1996, p. 55-63. Disponível em: <https://iahs.info/uploads/dms/10422.55-63-236-Guyot.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

JUNK, W. J. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. *In*: JUNK, W. J. (Ed.). **The central Amazon floodplain: ecological studies (analysis and synthesis) - vol 126**. Berlin, Alemanha: Springer, 1997, p. 03-20. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-03416-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03416-3_1).

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. **Eos, Transactions, AGU**, [s.l.], v. 89, n. 10, p. 93-94, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **Int. J. Climatol.**, [s.l.], v. 36, p. 1033-1050, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; SOARES, W. R.; ALVES, L. M.; NOBRE, C. A. Extreme climatic events in the Amazon basin. **Theor. Appl. Climatol.**, [s.l.], v. 107, p. 73-85, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0465-1>.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos Hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, p. 35-47, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18316/268>.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, [s.l.], v. 21, p. 1-25, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr021001>.

O'LOUGHLIN, F. E.; PAIVA, R. C. D.; DURAND, M.; ALSDORF, D. E.; BATES, P. D. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sens. Environ.**, [s.l.], v. 182, p. 49-59, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.018>.

OVANDO, A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; MARTINEZ, J. M.; SIQUEIRA-JUNIOR, J. L.; PINTO, G. L. N.; PASSY, P.; VAUCHEL, P.; NORIEGA, L.; VON RANDOW, C. Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands. **J. Hydrol. Regul. Stud.**, [s.l.], v. 5, p. 293-308, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.004>.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 406, p. 170-181, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrol. Processes**, [s.l.], v. 27, p. 333-346, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8425>.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 49, p. 1226–1243, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 11, p. 1633-1644, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **RBRH**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, S. A.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P.; SORRIBAS, M.; COLLISCHONN, W. MGB model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 94, p. 1-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**. New York, EUA: McGraw-Hill, 1993, Chapter 5.

RIBEIRO NETO, A. **Simulação Hidrológica na Amazônia**: Rio Madeira. 2006. 178f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/doutorado/2006-2/860-alfredo-ribeiro-neto-doutorado/file>. Acesso em: 05 out. 2021.

RONCHAIL, J.; BOURREL, L.; COCHONNEAU, G.; VAUCHEL, P.; PHILLIPS, L.; CASTRO, A.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E. Inundations in the Mamoré basin (South-Western Amazon - Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 302, p. 223-238, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.005>.



ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES., L. G. G.; VILA, DANIEL A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, [s.l.], v. 25, p. 885-894, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies inundáveis sob vegetação densa. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18, 2017, Santos. **Anais...** Santos, SP: 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/papers/avaliacao-do-bare-earth-srtm-para-simulacao-hidrodinamica-de-rios-com-planicies-inundaveis-sob-vegetacao-densa?lang=pt-br>. Acesso: 05 out. 2021.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 22, p. 4815-4842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>.

SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos). Séries Históricas de Estações. **Portal HidroWeb**, 2021. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 16 mai. 2021.

SOUZA, V. A. D.; MOREIRA, D. M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; RUDKE, A. P. Extreme rainfall events in Amazonia: the Madeira river basin. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 18, apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316>.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 175, p. 339-382, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3).

TUCCI, C. E. M. Fundamentos do escoamento não-permanente. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2007, p. 373-389.

VAUCHEL, P. Estudo da cheia de 2014 na bacia do rio Madeira. **Institut de Recherche pour Développement**, abr. 2014.

YAMAZAKI, D.; KANAE, S.; KIM, H.; OKI, T. A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 47, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010WR009726>.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 204, p. 83-97, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00107-8).

### **3 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE EXCEL PARA CALIBRAÇÃO DO MGB: ESTUDO DE CASO NO RIO MADEIRA**

#### **Resumo**

O Modelo de Grandes Bacias – MGB vem sendo aplicado na região amazônica em diversos trabalhos, neste é apresentado para o usuário do MGB uma ferramenta alternativa ao plugin do software QuantumGIS para calibração manual do modelo, utilizando-se de uma pasta de trabalho do software Microsoft Excel, dotada de planilhas, sub-rotinas em Visual Basic for Applications (VBA), métricas de desempenho e gráficos, voltados para a avaliação de desempenho de simulações no período de cheias, tendo sido utilizada a bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho como área de estudo, devido ao seu ciclo anual de cheias trazer a possibilidade de alagação em núcleos populacionais ribeirinhos do Brasil e da Bolívia, bem como isolamento de vias de acesso terrestre à municípios do estado de Rondônia e ao estado do Acre. Constatou-se que referida pasta de trabalho do Excel agiliza o processo de calibração manual, dispensa utilização de shapes no processo de calibração, possibilita o mapeamento de diferentes períodos de simulação e diferentes eficiências, possibilita a separação do período de “aquecimento” das condições hidrológicas da bacia do período de avaliação da eficiência, possibilita o backup automático de parâmetros do solo e vazões simuladas de inúmeras rodadas de simulação, possibilita que o usuário aplique uma lógica de calibração em diversos arquivos de parâmetros do solo de forma sequencial e possibilita a simulação sequencial de várias configurações de solo.

#### **Abstract**

The Great Watershed Model - MGB has been applied in the Amazon region in several works, in this an alternative tool to the QuantumGIS software plugin is presented to the MGB user for manual calibration of the model, using a Microsoft software workbook. Excel, equipped with spreadsheets, subroutines in Visual Basic for Applications (VBA), performance metrics and graphs, aimed at evaluating the performance of simulations during the flood period, using the Madeira river watershed upstream of the city of Porto Velho as a study area, due to its annual cycle of floods, it brings the possibility of flooding in riverside population centers in Brazil and Bolivia, as well as isolation of land access roads to municipalities in the state of Rondônia and



the state of Acre. It was found that this Excel workbook speeds up the manual calibration process, eliminates the use of shapes in the calibration process, allows the mapping of different simulation periods and different efficiencies, allows the separation of the "warm up" period from the hydrological conditions of the basin of the efficiency evaluation period, allows the automatic backup of soil parameters and simulated flows from numerous simulation runs, allows the user to apply a calibration logic in several soil parameter files in a sequential way and allows the sequential simulation of various soil configurations.

### **3.1 Introdução**

O ciclo anual de cheias do rio Madeira traz a possibilidade de alagação em núcleos populacionais ribeirinhos do Brasil e da Bolívia, bem como isolamento de vias de acesso terrestre à municípios do estado de Rondônia e ao estado do Acre, podendo acarretar em diversos danos socioeconômicos, conforme ocorreu na cheia histórica de 2014 (CGU, 2014; CORRÊA et al., 2016; OVANDO et al., 2016).

A internacionalidade da bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho ocasiona diferentes políticas de disponibilização de dados fluviométricos, gerando déficit de monitoramento de vazões em tempo real e/ou disponibilização defasada em plataformas digitais. Essa configuração restringe que modelos estatísticos de propagação de ondas de cheia baseados em estações a montante (TUCCI, 2005a) sejam aplicáveis no rio Madeira apenas a partir de quando o rio Mamoré e Beni (afluentes do rio Madeira) entram em território brasileiro, algo que permite uma previsibilidade de 1 a 3 dias de antecedência para a cidade de Porto Velho (CORRÊA et al., 2016).

Por outro lado, existem dados de precipitação estimada por satélite, que cobrem todo globo terrestre, indicando que um modelo hidrológico tipo chuva-vazão possa ser adequado para fornecer previsões de vazão com maior antecedência para a região (TUCCI, 2005b). Dentre as opções de modelos, destaca-se o Modelo de Grandes Bacias – MGB (COLLISCHONN, 2001), que vem sendo aplicado na região amazônica em diversos trabalhos (RIBEIRO NETO, 2006; GETIRANA et al., 2010; PAIVA et al., 2012; PAIVA et al., 2013; CORREA et al. 2017; SIQUEIRA et al., 2017; SIQUEIRA et al; 2018; FÖEGER et al. 2019; FLAISCHMANN et al. 2020).

Desde sua versão original, o MGB utiliza a linguagem de programação em Fortran, sendo que nesta última década houve o acoplamento com Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), por meio dos softwares MapWindow GIS e Quantum GIS (FAN & COLLISCHONN, 2014; SIQUEIRA et al., 2016; PONTES et al., 2017; ALVES et al., 2020). Em sua versão mais atual são utilizadas ferramentas (“plugin”) acopladas ao software Quantum GIS, sendo elas o IPH-Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016) e o MGB 4.6, onde todo o pré-processamento é feito no primeiro plugin, que realiza a discretização da bacia hidrográfica e extração de características topográficas e de uso do solo, sendo o segundo plugin o responsável por ativar o executável em Fortran, responsável pelo cálculo hidrológico/hidrodinâmico. Esta última etapa também consegue ser realizada de forma paralela, por exemplo, através de rotinas em Visual Basic for Application (VBA) do software Microsoft Excel.

O software Microsoft Excel, por sua vez, está caracterizado como um dos mais importantes aplicativos para uso em microcomputadores, sendo o líder de mercado entre as planilhas eletrônicas desde os anos 90 até os dias atuais, onde em 2005 detinha de 80 a 90% do seu nicho de mercado, tornando comum o seu uso por profissionais das áreas de engenharias e exatas, bem como tornando ferramentas desenvolvidas em Excel acessíveis à grande número de pessoas (SILVA & SANTOS, 2015; VALENTE, 2017; OLIVEIRA, 2019) e atrativas para utilização em trabalhos científicos de diversas áreas (MEYER, 2009; BROWN, 2014; STOLF, 2014; VALENTE, 2017; RATHOD, 2018).

O produto associado à esta dissertação de mestrado, intitulado “Manual de Utilização de Planilhas em Excel Acopladas ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)”, presente no Apêndice A, apresenta para o usuário do MGB uma ferramenta alternativa ao plugin do QGIS para calibração manual do modelo, utilizando-se de uma pasta de trabalho do Excel, dotada de planilhas, sub-rotinas em VBA, métricas de desempenho e gráficos, voltados para a avaliação de desempenho de simulações no período de cheias.

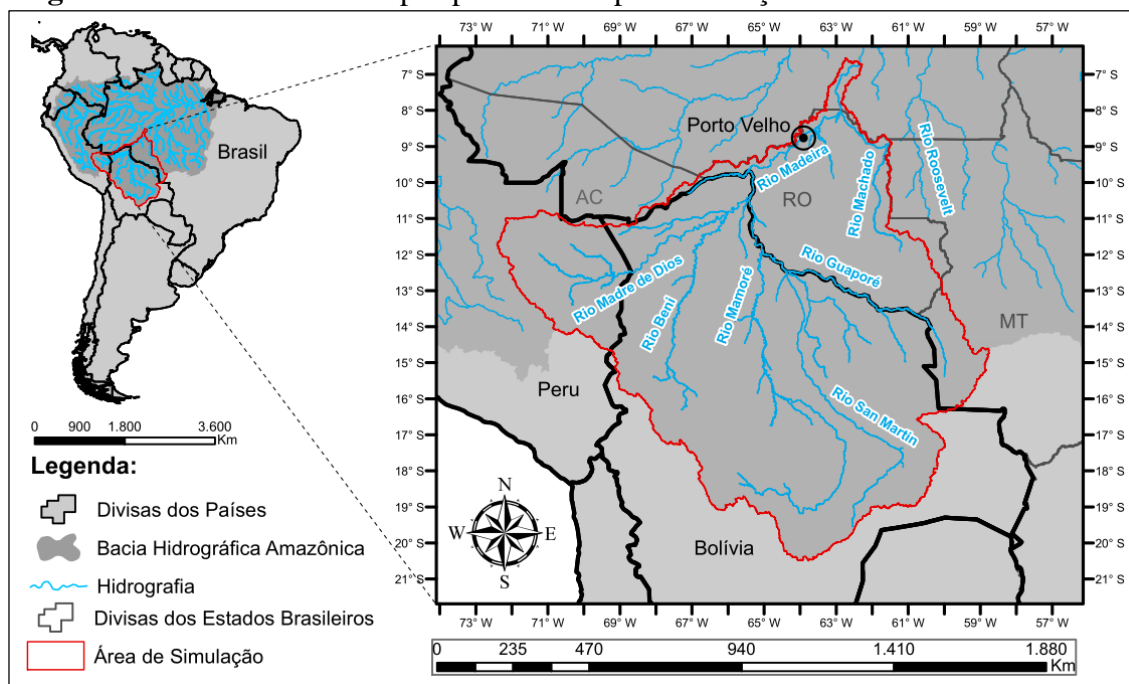
Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a calibração manual do Modelo de Grandes Bacias (MGB) para a bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho por meio da pasta de trabalho desenvolvida no Excel, descrita no “Manual de Utilização de Planilhas em Excel Acopladas ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)”.

## 3.2 Material e Métodos

### 3.2.1 Área de estudos

Utilizou-se a bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho como área de estudo para a aplicação da pasta de trabalho do Excel na calibração manual das variáveis do solo do MGB. Essa área de estudo está compreendida na base de dados descrita pelo Apêndice A deste trabalho, adotada como área simulada, que abrange a bacia hidrográfica do rio Madeira desde suas nascentes andinas até a confluência com o rio Machado (Figura 19).

**Figura 19** – Área com dados pré-processados para utilização do MGB no Rio Madeira



Assim como descrito no Capítulo 2 deste trabalho e ilustrado pela Figura 19, essa maior dimensão da área simulada em relação à área estudada (região em que as vazões simuladas para o exutório terão métricas de desempenho aferidas) é feita para se garantir uma diferença de altitude do fundo do canal principal do rio de aproximadamente 20 metros entre o exutório da área estudada e o exutório da área simulada, propiciando que resultados de vazões simuladas para a cidade de Porto Velho não sejam influenciados por distorções na declividade da linha da água, algo interveniente no modo de propagação hidrodinâmico das vazões (PAIVA et al., 2011; PONTES et al., 2017).

### 3.2.2 Modelo de Grandes Bacias

O Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA et al. 2011; FAN & COLLISCHONN, 2014; PONTES et al., 2017), é um modelo hidrológico/hidrodinâmico, classificado como precipitação-vazão, conceitual e distribuído, onde em sua versão original dividia a área de estudo em células quadradas de cerca de 10 x 10 km, mas que com o advento das ferramentas SIG passou a discretizar a bacia hidrográfica em áreas irregulares, denominada de minibacias (TUCCI, 2005c; GETIRANA et al., 2010; FAN & COLLISCHONN, 2014), que podem ser delimitadas considerando-se a confluência entre dois trechos de rio ou considerando-se tamanhos fixos dos cursos d'água, este último método sendo mais adequado quando se deseja utilizar uma propagação hidrodinâmica (PONTES et al., 2015; PONTES et al., 2017; COLLISCHONN et al. 2020).

Atualmente o MGB possui um acoplamento classificado como próximo (ou rígido) ao software Quantum GIS (FAN & COLLISCHONN, 2014), sendo representado pelos plugins IPH- Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016) e o MGB versão 4.6, o primeiro voltado para o pré-processamento e o segundo voltado para os cálculos hidrológicos/hidrodinâmicos.

Os dados básicos de entrada para o IPH-Hydro Tools são um Modelo Digital de Elevação (MDE), podendo ser trabalhado junto com um modelo de direção de fluxo de mesma resolução (SIQUEIRA et al., 2018), e um mapa com Unidades de Resposta Hidrológica (URH) no formato “raster”, que possua no máximo nove tipos de unidades (ALVES et al., 2020). Esses dados são processados, obtendo-se arquivos com informações tabulares que relacionam as minibacias com suas características fisiográficas.

Ainda no pré-processamento essas minibacias podem ser agrupadas para fins de se obter as mesmas calibrações de parâmetros do solo. Esse agrupamento tipicamente é feito em formato de sub-bacias, que consideram as minibacias a montante de estações fluviométricas que serão utilizadas na calibração (ALVES et al., 2020), mas também podem ser divididas por outros critérios, como por exemplo litologia e geologia, conforme adotado por Siqueira et al. (2018).

No plugin do MGB, além dos arquivos gerados na etapa anterior, são requeridos parâmetros médios mensais atrelados à vegetação e cobertura do solo (albedo, índice de área foliar, altura da vegetação e resistência superficial) que são relacionados a cada URH, bem como parâmetros mensais climatológicos: temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), insolação (horas/dia) e velocidade do vento (m/s). Esses dados são utilizados para os cálculos dos volumes de chuva interceptados e evapotranspiração. Ainda como entrada, são requeridos dados de precipitação interpolados para os centros geométricos de cada minibacia, bem como os parâmetros do solo associados a cada URH de cada minibacia, sendo estes últimos os parâmetros que serão efetivamente calibrados.

Estes parâmetros calibráveis são descritos na “janela” de parâmetros do solo do plugin do MGB, bem como por Collischonn et al. (2020). A nível de URH's pertencentes às minibacias, são sete parâmetros:

- **Wm:** Presente nas equações de escoamento superficial, subsuperficial e de base, citadas no item anterior, representa a profundidade do solo e sua capacidade de armazenamento máximo de água, sendo inversamente proporcional à geração de vazão superficial;
- **b:** Presente na fórmula do modelo ARNO (TODINI, 1996), é diretamente proporcional a geração de escoamento superficial, sendo associado à magnitude e frequência de picos de vazão de curta duração no hidrograma;
- **Kint:** Presente na equação do escoamento subsuperficial (RAWLS et al., 1993), é diretamente proporcional a geração desse escoamento. No hidrograma sua variação tem efeito mais perceptível em vazões intermediárias;
- **XL:** Presente na equação do escoamento subsuperficial, controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária, sendo inversamente proporcional à geração desse escoamento;

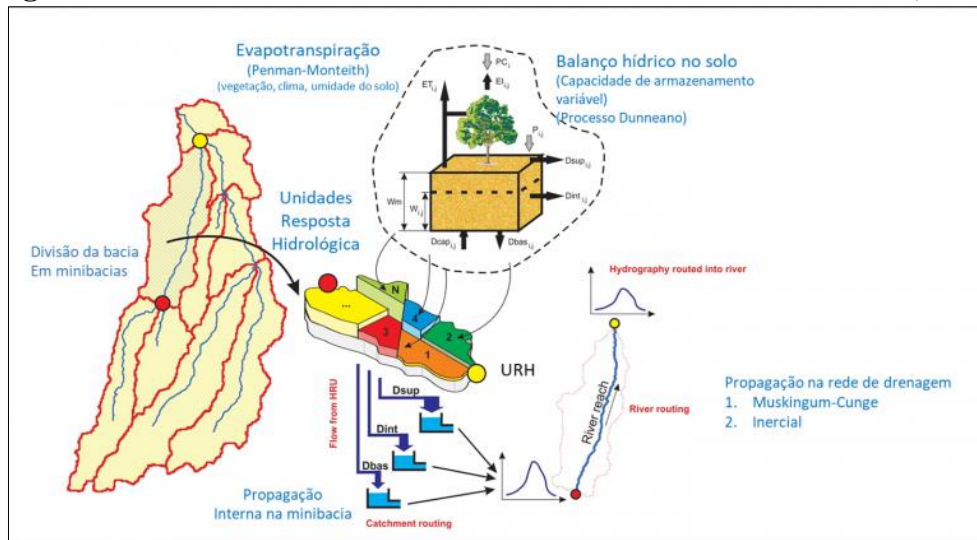
- Wz: Presente na equação do escoamento subsuperficial e escoamento de base, representa a porcentagem de Wm abaixo da qual não há geração de escoamento, sendo inversamente proporcional a geração de vazão;
- Kbas: Presente na equação do escoamento de base, é análoga à condutividade hidráulica saturada da lei de Darcy, sendo diretamente proporcional a este tipo de escoamento. No hidrograma, seu efeito mais perceptível é a regulação da magnitude de vazões mínimas;
- CAP: Fração que representa o fluxo máximo da água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo (ascensão capilar). Usualmente nulo, este parâmetro é utilizado apenas em aplicações muito específicas.

Saindo das URH's e passando para o patamar da minibacia, tem-se três parâmetros calibráveis:

- Cs: Parâmetro que multiplica o tempo de concentração na fórmula do retardo da vazão do reservatório superficial. No hidrograma seu efeito mais perceptível é antecipar ou adiar os picos de vazão;
- Ci: Parâmetro que multiplica o tempo de concentração na fórmula do retardo da vazão do reservatório intermediário. Sua variação tem efeito perceptível na dilatação ou contração do hidrograma em vazões intermediárias;
- Cb: Presente na fórmula do retardo da vazão do reservatório subterrâneo, está associado à taxa de recessão do hidrograma.

Os valores de vazão observados nos postos fluviométricos podem ser adicionados à simulação apenas para serem comparados com os valores simulados, indicando o hidrograma objetivo a ser encontrado, ou essas vazões observadas podem entrar nas etapas de cálculo do modelo, interferindo no resultado da simulação (COLLISCHONN, 2001; SIQUEIRA et al., 2018). A Figura 20 ilustra e resume o funcionamento do MGB.

**Figura 20 - Resumo do Funcionamento do Modelo de Grandes Bacias (MGB)**



Fonte: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>

### 3.2.3 Base de Dados

A base de dados descrita pelo Apêndice A consiste nos arquivos de entrada do modelo MGB prontos para serem utilizados nas simulações, dispensando-se toda a etapa de pré-processamento com os plugins IPH-Hydro Tools e coleta de dados com o MGB 4.6 descritos pelo item anterior 3.2.2 e por Alves et al. (2020). Essa base de dados disponibiliza arquivos baseados em Modelos Digitais de Elevação (MDE's) de resoluções de 90 metros (LEHNER et al., 2008) e de 500 metros (SIQUEIRA et al., 2018).

Os valores de precipitação dessa base de dados foram extraídos do produto de reanálise climática global ERA 5 (HERSBACH et al., 2020), vazões observadas da plataforma HidroWeb (SNIRH, 2021), URH's do produto disponibilizado por Fan et al. (2015), parâmetros climatológicos mensais do produto CRU (NEW et al., 2002) e parâmetros da superfície do solo, agrupamento de minibacias e sugestão inicial das variáveis calibráveis de solo do produto *South America Simulated River Discharge Dataset* (SIQUEIRA et al., 2018).

Nas simulações deste capítulo foi utilizado o pacote de dados pré-processados para o rio Madeira baseado no MDE com 500 metros de resolução e disponível em:

[https://drive.google.com/drive/folders/1P\\_IEXrgp6quBayI2t7vBvhrVUyYK2Fi5?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1P_IEXrgp6quBayI2t7vBvhrVUyYK2Fi5?usp=sharing)

### 3.2.4 Aplicação no Excel

Assim como a base de dados citada no item anterior (3.2.3), a pasta de trabalho do Excel desenvolvida para a calibração do MGB também é um dos produtos disponibilizados pelo Apêndice A deste trabalho, dotada de sub-rotinas em Visual Basic for Application (VBA) e das seguintes planilhas: Resumo, Vazoes\_Observadas, Vazoes, Cotas, Solo, Simulacao\_Sequencial, Graficos e Maximas\_Anuais. Essa pasta de trabalho está disponível no seguinte endereço eletrônico:

<https://drive.google.com/drive/folders/1PRigiCJXagxlGuDelCqyDrRhVc1OAnXr?usp=sharing>

g

O fluxo de utilização da referida pasta de trabalho consiste primeiramente no preenchimento que antecede as simulações, sendo eles:

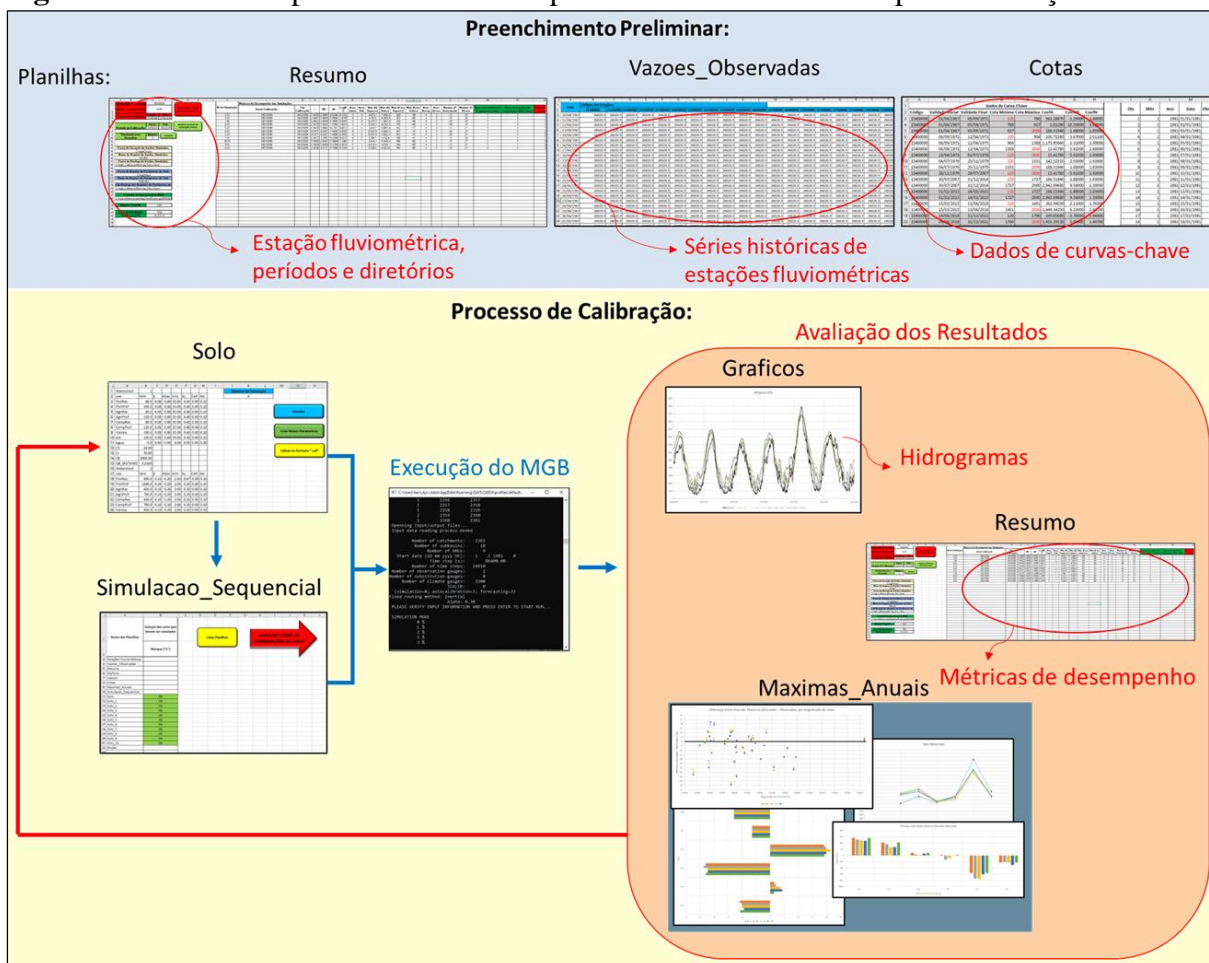
- a) Planilha “Resumo”: Onde deve haver a definição da estação fluviométrica que será utilizada na avaliação da eficiência do modelo, definição do período de simulação e calibração/validação, bem como definição dos diretórios que guardarão os arquivos de entrada e saída das simulações. Neste trabalho foi adotada a estação fluviométrica de Porto Velho (Código ANA 15400000), período de simulação entre 01 de janeiro de 1981 e 31 de dezembro de 2020 e período de calibração entre 01 de janeiro de 2010 e 31 de dezembro de 2015;
- b) Planilha “Vazoes\_Observadas”: Onde devem ser inseridas as séries históricas completas de vazões diárias de possíveis estações fluviométricas que sejam utilizadas na área de estudo;
- c) Planilha “Cotas”: Onde devem ser cadastradas as curvas-chave das estações de interesse;

Após o preenchimento preliminar, pode-se dar início as simulações através da planilha “Solo”, no caso de simulações individuais, ou através da planilha “Simulacao\_Sequencial”, caso o usuário queira simular várias configurações de solo de forma sequencial. Após as simulações os resultados podem ser visualizados em conjunto nas planilhas “Graficos” e



“Maximas\_Anuais”, bem como as métricas estatísticas de desempenho na planilha “Resumo”. O fluxo de calibração é resumido na Figura 21.

**Figura 21** – Fluxo de procedimentos com pasta de trabalho do Excel para calibração do MBG



A planilha “Vazoes” apresenta de forma detalhada as vazões observadas e de todas as simulações para cada dia do período simulado, tendo o seu preenchimento automático, servindo apenas como base para a geração dos gráficos, normalmente não sendo visualizada pelo usuário no fluxo de calibração. Maiores detalhes sobre o funcionamento desta pasta de trabalho podem ser encontrados no Apêndice A, referente ao “Manual de Utilização de Planilhas em Excel Acopladas ao Modelo de Grandes Bacias”.

### 3.2.5 Avaliação da calibração do rio Madeira

A partir da sugestão inicial das variáveis calibráveis do solo, oriundas do trabalho de Siqueira et al. (2018), foram realizadas 100 rodadas de simulações para o período compreendido entre 1981 e 2020, conforme base de dados descrita no item 3.2.3, e avaliado o desempenho do modelo no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2015 (6 anos), conseqüentemente os 29 anos compreendidos entre 1981 e 2009 foram utilizados como período de aquecimento das condições hidrológicas iniciais do modelo. As simulações foram realizadas de forma sequencial em grupos de 10 combinações diferentes de variáveis das URH's em 10 grupos de calibração da área estudada, selecionando-se os 3 melhores ajustes de cada rodada e derivando-se novos testes a partir deles.

A avaliação das simulações foi baseada nas métricas de desempenho fornecidas pela pasta de trabalho do Excel descrita no item 3.2.4. Também foram utilizados gráficos disponibilizados pela referida pasta de trabalho para a avaliação visual da aderência dos hidrogramas e valores máximas anuais simulados com os observados. As Tabelas 6 e 7 resumem, respectivamente, as métricas de desempenho e gráficos utilizados na avaliação.

**Tabela 6 – Métricas de desempenho**

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
r	Correlação de Pearson
NS	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
dV	Diferença percentual de volume
LogNS	Coefficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões
Anos Super	Anos dentro do período calibrado em que a vazão máxima foi superestimada
Anos Sub	Anos dentro do período calibrado em que a vazão máxima foi subestimada
Máx dQ Superest	Máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada
Máx dQ Subest	Máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada
Máx dCota Superest	Em centímetros, máxima diferença entre cotas de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada
Máx dCota Subest	Em centímetros, máxima diferença entre cotas de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada
Anos Antecip	Anos dentro do período calibrado em que o dia de ocorrência da vazão máxima foi antecipado pela simulação
Anos Atraso	Anos dentro do período calibrado em que o dia de ocorrência da vazão máxima foi atrasado pela simulação

Máximo dT Antecipado	Máxima diferença em dias em que o pico da cheia foi antecipado
Máximo dT Atraso	Máxima diferença em dias em que o pico da cheia foi atrasado
Anos acerto Cheia	Anos dentro do período calibrado em que a simulação acertou no prognóstico de que o rio atingiria a cota de inundação
Anos acerto Não-Cheia	Anos dentro do período calibrado em que a simulação acertou no prognóstico de que o rio não atingiria a cota de inundação
Falsos Positivos Cheia	Anos dentro do período calibrado em que a simulação indicou de forma equivocada que o rio atingiria a cota de inundação
Falsos Negativos Cheia	Anos dentro do período calibrado em que a simulação indicou de forma equivocada que o rio não atingiria a cota de inundação

**Tabela 7 – Gráficos para avaliação visual de desempenho**

ID	Descrição
1	Hidrograma das vazões observadas e simuladas
2	Vazões máximas anuais observadas e simuladas
3	Diferença entre vazões máximas anuais simuladas e observadas por simulação
4	Diferença entre Vazões Máximas (Simulada – observada) vs Magnitude da Cheia
5	Cotas máximas anuais observadas e simuladas (cm)
6	Diferença entre cotas máximas anuais simuladas e observadas (cm)
7	Antecipação ou Adiamento do Pico da Cheia (Dia Simulado - Dia observado)
8	Diferença entre Dias de Ocorrência das Máximas vs Magnitude da Cheia

### 3.3 Resultados e discussões

#### 3.3.1 Avaliação da calibração do rio Madeira

Foram realizadas em média 2 rodadas de 10 simulações por dia, onde ao final de 5 dias obteve-se as 100 simulações previstas no item 3.2.5. Os resultados apresentados referentes a última rodada sequencial estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10, estando grifados em verde os melhores valores encontrados para cada métrica de desempenho no período compreendido entre janeiro de 2010 e dezembro de 2015 (6 anos) e em amarelo os segundo melhores.

A Tabela 8 contém os valores encontrados para a correlação de Pearson ( $r$ ), bem como as métricas de desempenho fornecidas pela calibração tradicional do MGB, através do plugin do

QGIS, sendo elas o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões (LogNS) e diferença percentual de volume (dV). As Tabelas 9 e 10 contêm as métricas de desempenho específicas para avaliar o ajuste do modelo para a época da cheia, através de estatísticas relacionadas a valores máximos anuais.

**Tabela 8** – Resultados da última rodada de simulações para correlação de Pearson (r), Nash-Sutcliffe (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões (LogNS) e diferença percentual de volume (dV)

ID da Simulação	Métricas de Desempenho das Simulações					
	Início Calibração	Fim Calibração	r	NS	dV	LogNS
0	01/01/2010	31/12/2015	0,9417	0,8691	7,4000	0,8585
1	01/01/2010	31/12/2015	0,9442	0,8839	4,7800	0,8685
2	01/01/2010	31/12/2015	0,9459	0,8883	4,5200	0,8762
3	01/01/2010	31/12/2015	0,9467	0,8845	5,9400	0,8791
4	01/01/2010	31/12/2015	0,9417	0,8691	7,4000	0,8585
5	01/01/2010	31/12/2015	0,9449	0,8802	6,2100	0,8672
6	01/01/2010	31/12/2015	0,9470	0,8832	7,3700	0,8471
7	01/01/2010	31/12/2015	0,9477	0,8113	19,4900	0,6875
8	01/01/2010	31/12/2015	0,9438	0,5721	37,0100	0,3386
9	01/01/2010	31/12/2015	0,9329	0,6459	31,4700	0,4978
10	01/01/2010	31/12/2015	0,9350	0,6467	31,6800	0,4961

**Legenda:** Grifados em verde = melhor valor e grifados em amarelo = segundo melhor valor; ID 0 = Sugestão inicial (SIQUEIRA et al. 2018).

**Tabela 9** – Resultados da última rodada de simulações para desempenho do modelo em relação a valores máximos anuais (Parte 1)

ID da Simulação	Métricas de Desempenho das Simulações							
	Início Calibração	Fim Calibração	Anos Super	Anos Sub	Máx dQ Superest	Máx dQ Subest	Máx dCota Superest	Máx dCota Subest
0	01/01/2010	31/12/2015	4	2	5.628,9	-5.602,2	147	-74
1	01/01/2010	31/12/2015	3	3	5.076,7	-7.367,9	133	-98
2	01/01/2010	31/12/2015	3	3	4.873,1	-7.480,4	128	-99
3	01/01/2010	31/12/2015	4	2	4.701,6	-6.068,4	123	-80
4	01/01/2010	31/12/2015	4	2	5.628,9	-5.602,2	147	-74
5	01/01/2010	31/12/2015	2	4	5.415,1	-5.867,9	142	-77
6	01/01/2010	31/12/2015	3	3	5.084,7	-6.062,1	133	-80
7	01/01/2010	31/12/2015	4	2	5.198,7	-6.112,4	136	-81
8	01/01/2010	31/12/2015	5	1	8.130,8	-4.923,8	192	-65

9	01/01/2010	31/12/2015	5	1	8.239,4	-4.931,1	194	-65
10	01/01/2010	31/12/2015	5	1	8.444,1	-4.946,6	196	-65

**Legenda:** Grifados em verde = melhor valor e grifados em amarelo = segundo melhor valor; ID 0 = Sugestão inicial (SIQUEIRA et al. 2018); Anos Super = Anos dentro do período calibrado em que a vazão máxima foi superestimada; Anos Sub = Anos dentro do período calibrado em que a vazão máxima foi subestimada; Máx dQ Superest = Máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada; Máx dQ Subest = Máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada; Máx dCota Superest = Em centímetros, máxima diferença entre cotas de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada; Máx dCota Subest = Em centímetros, máxima diferença entre cotas de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada.

**Tabela 10** – Resultados da última rodada de simulações para desempenho do modelo em relação a valores máximos anuais (Parte 2)

ID	Métricas de Desempenho das Simulações									
	Início Calibração	Fim Calibração	Anos Antecip	Anos Atraso	Máximo dT Antecipado	Máximo dT Atraso	Anos acerto Cheia	Anos acerto Não-Cheia	Falsos Positivos Cheia	Falsos Negativos Cheia
0	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-32	27	1	2	2	1
1	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-33	28	1	3	1	1
2	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	30	1	3	1	1
3	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	28	1	3	1	1
4	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-32	27	1	2	2	1
5	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	27	1	3	1	1
6	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-28	31	1	3	1	1
7	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	28	1	3	1	1
8	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	27	2	1	3	0
9	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	27	2	1	3	0
10	01/01/2010	31/12/2015	4	2	-31	27	2	1	3	0

**Legenda:** Grifados em verde = melhor valor e grifados em amarelo = segundo melhor valor; ID 0 = Sugestão inicial (SIQUEIRA et al. 2018); Anos Antecip = Anos dentro do período calibrado em que o dia de ocorrência da vazão máxima foi antecipado pela simulação; Anos Atraso = Anos dentro do período calibrado em que o dia de ocorrência da vazão máxima foi atrasado pela simulação; Máximo dT Antecipado = Máxima diferença em dias em que o pico da cheia foi antecipado; Máximo dT Atraso = Máxima diferença em dias em que o pico da cheia foi atrasado; Anos com acerto do Prognóstico Cheia = Anos dentro do período calibrado em que a simulação acertou no prognóstico de que o rio atingiria a cota de inundação; Anos com acerto do Prognóstico Não-Cheia = Anos dentro do período calibrado em que a simulação acertou no prognóstico de que o rio não atingiria a cota de inundação; Falsos Positivos para Cheia = Anos dentro do período calibrado em que a simulação indicou de forma equivocada que o rio atingiria a cota de inundação; Falsos Negativos para Cheia = Anos dentro do período calibrado em que a simulação indicou de forma equivocada que o rio não atingiria a cota de inundação.

Considerando-se a Tabela 8 e a avaliação de eficiência para períodos de vazões altas, o coeficiente proposto por Nash & Sutcliffe (1970) é o que apresenta maior representatividade (COLLISCHONN, 2001; GUILHON & ROCHA, 2007; RITTER & MUÑOZ-CARPENA,

2013), sendo o valor máximo igual a “1”, considerado o ajuste perfeito, valores acima de 0,9 considerados excelentes e valores entre 0,8 e 0,9 considerados bons (RITTER & MUÑOZ-CARPENA, 2013).

Dentre as simulações apresentadas na Tabela 8, destaca-se a com número de identificação “2”, tendo sido elencada como a de melhor desempenho no coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), obtendo-se um valor de 0,8883, e diferença percentual de volume (dV), obtendo-se um valor de 4,52%, bem como a segunda melhor em desempenho para o Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões (LogNS), obtendo-se um valor de 0,8762. Para a correlação de Pearson (r), a simulação “2” obteve um valor igual a 0,9459, não tendo sido uma das melhores, mas também obtendo valores bem próximos a 1 (ideal) e distanciando-se apenas 0,0018 pontos da simulação com melhor desempenho neste coeficiente (ID 7).

Em relação às variáveis do solo sugeridas inicialmente (SIQUEIRA et al., 2018), referente ao ID 0, a simulação de ID 2 obteve uma melhoria de 0,0192 pontos no coeficiente de Nash-Sutcliffe, 0,0177 pontos no LogNS, 0,0042 pontos na correlação de Pearson e redução de 2,88% no erro de volume.

Considerando-se a Tabela 9, a simulação de ID 2 continuou despontando no quesito de equilíbrio entre anos com superestimativa e subestimativa da vazão máxima anual, apresentando um percentual de 50% para cada lado, bem como apresentou o segundo menor erro no quesito de máxima diferença entre vazões de pico de cheia (simulada – observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada (Máx dQ Superest), representando um erro máximo de 1,28 cm a mais na cota máxima anual atingida. Por outro lado, no quesito de máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada (Máx dQ Subest), a simulação de ID 2 obteve o maior erro, porém algo que representou um erro máximo de apenas 99 cm a menos na cota máxima anual atingida.

De acordo com a Tabela 10, todas as simulações tenderam a antecipar as datas de ocorrência do pico máximo anual das cheias, onde foram antecipadas as datas dos picos em 4 (Anos Antecip) dos 6 anos avaliados. Dentre as simulações, a média da máxima diferença de dias em

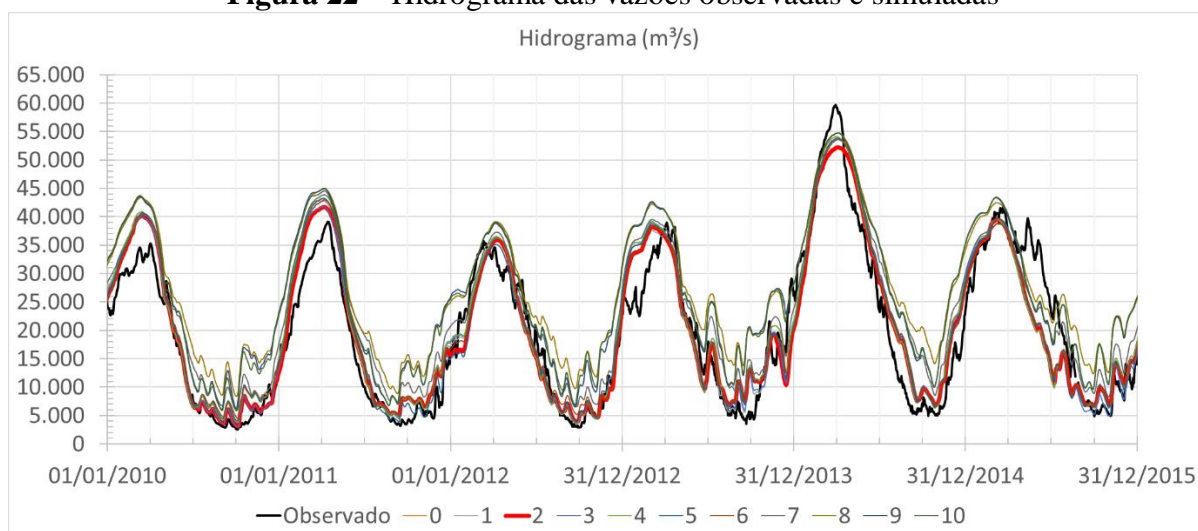
que o pico da cheia foi antecipado (Máximo dT Antecipado) foi de 31 dias, com máximo de 33 e mínimo de 28, por sua vez, a média da máxima diferença de dias em que o pico da cheia foi atrasado (Máximo dT Atraso) foi de 28, com máximo de 31 e mínimo de 27. A simulação ID 2 apresentou um “Máximo dT Antecipado” de 31 dias e um “Máximo dT Atraso” de 30 dias.

Ainda de acordo com a Tabela 10, comparando-se a cota máxima atingida nos anos avaliados (2010 a 2015) com a cota de inundação (17 metros) para a cidade de Porto Velho (SANTOS et al., 2021), as melhores simulações foram aquelas que apresentaram acerto em 4 dos 6 anos avaliados para o prognóstico positivo ou negativo de cheia acima da cota de 17 metros, a simulação de ID 2 está entre elas.

Além das métricas de desempenho mostradas nas Tabelas 8, 9 e 10, a pasta de trabalho do Excel desenvolvida para a calibração do MGB também disponibiliza gráficos de preenchimento automático que ajudam o usuário na avaliação das simulações, permitindo a visualização de todas as simulações feitas.

A Figura 22 mostra os hidrogramas, observado e simulados, de todas as simulações da última rodada realizada neste estudo de caso, estando destacada em preto as vazões observadas e em vermelho as vazões da simulação que obteve o melhor ajuste (ID 2). Além das funcionalidades já existentes na formatação dos gráficos do Excel, este gráfico da Figura 22 possui códigos em VBA e botões na planilha associados a ele que permitem a atualização e reestabelecimento das configurações de visualização iniciais, ampliações rápidas de regiões do gráfico para visualização mais detalhada das vazões, filtro de simulações que devem aparecer no gráfico e ampliação do período de calibração para visualização de outras datas dentro do período simulado, neste estudo por exemplo foi utilizado o período de simulação entre 01/01/1981 a 31/12/2020, mas está sendo calibrado/avaliado apenas o período compreendido entre 01/01/2010 e 31/12/2015 (maiores detalhes disponíveis no apêndice A).

**Figura 22 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas**

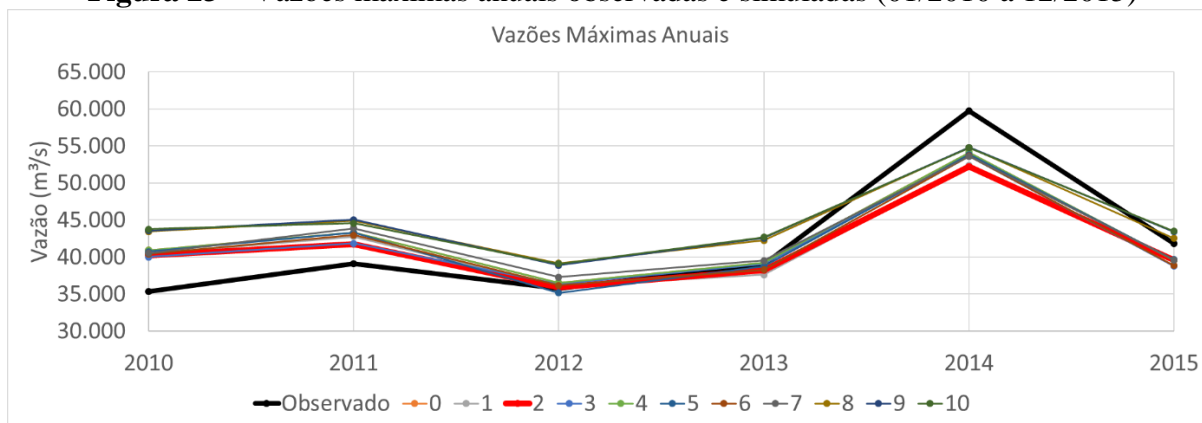


Também pertencente à pasta de trabalho do Excel para calibração do MGB, o gráfico da Figura 23 apresenta as vazões máximas anuais observadas e simuladas para o período avaliado e a Figura 24 apresenta as magnitudes das diferenças entre as máximas anuais simuladas e máximas anuais observadas (Simulado – Observado), possibilitando uma análise visual de como está o equilíbrio entre subestimativas e superestimativas. Pela Figura 24, é perceptível que a simulação ID 2 é a que tem valores girando mais próximo do eixo do “0” e que dentre os 6 anos do período calibrado há uma tendência de superestimativa nos 3 primeiros e subestimativa nos 3 últimos.

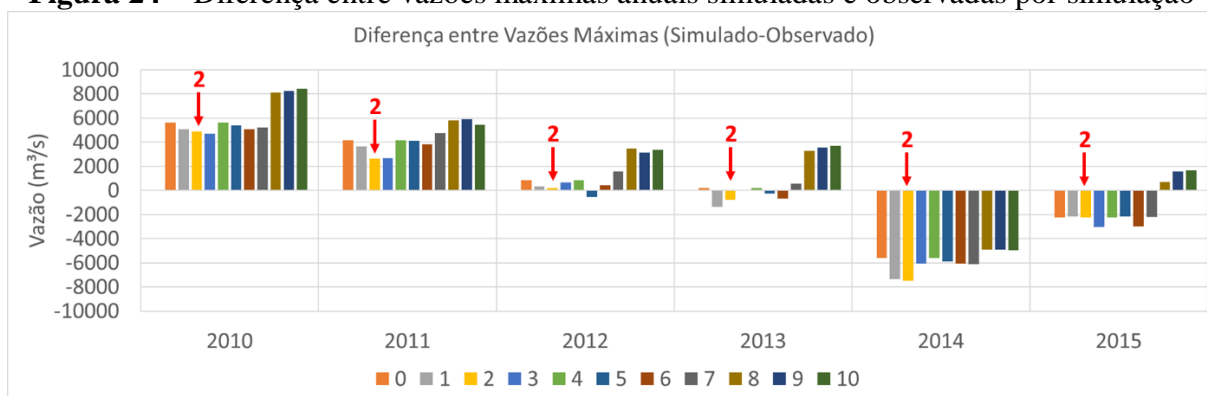
O gráfico presente na Figura 24, fornece uma visão geral de subestimativas e superestimativas de vazões, porém não permite a análise visual da distribuição dessas diferenças de acordo com a magnitude das cheias ocorridas no período avaliado. A Figura 25 apresenta o resultado da Figura 24 estratificado por magnitudes de cheias, onde no eixo “X” estão valores crescentes de vazão, representando as máximas anuais em (m³/s) e no eixo “Y” valores da diferença entre vazões simuladas e observadas, também em (m³/s). A partir do gráfico é possível identificar se há tendências de vazões serem superestimadas (valores acima do eixo 0 da horizontal) ou subestimadas (valores abaixo do eixo 0 da horizontal), bem como em qual faixa de magnitudes das cheias isso ocorre.



**Figura 23** – Vazões máximas anuais observadas e simuladas (01/2010 a 12/2015)

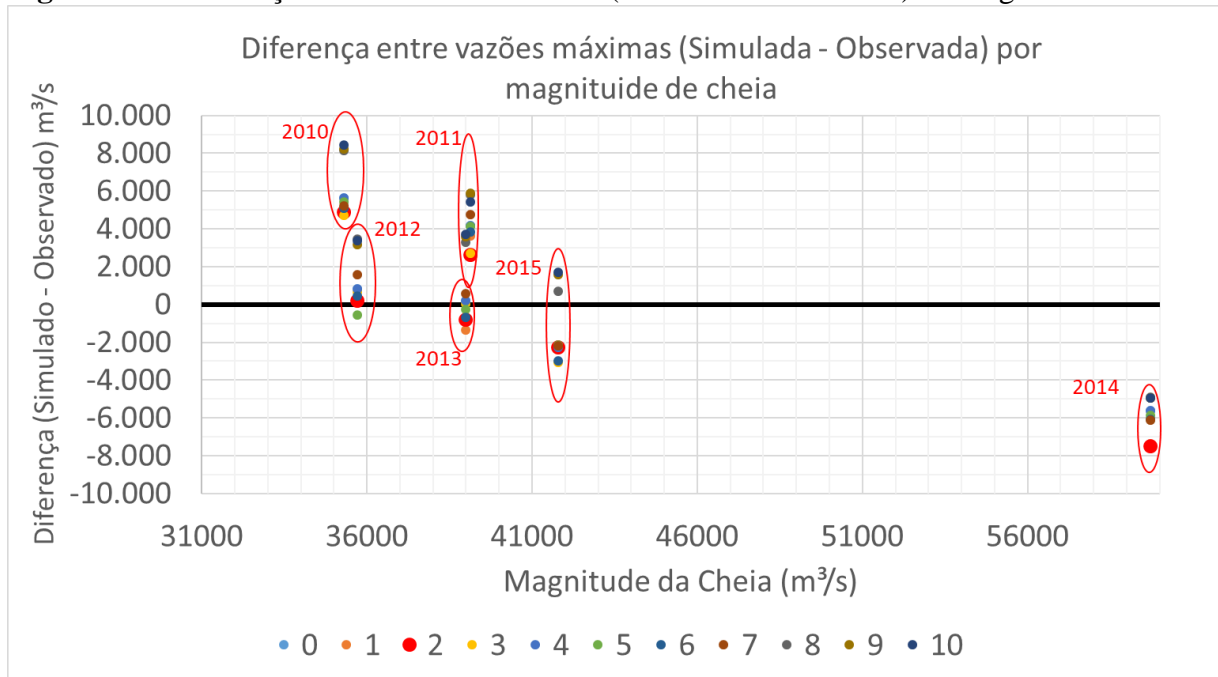


**Figura 24** – Diferença entre vazões máximas anuais simuladas e observadas por simulação



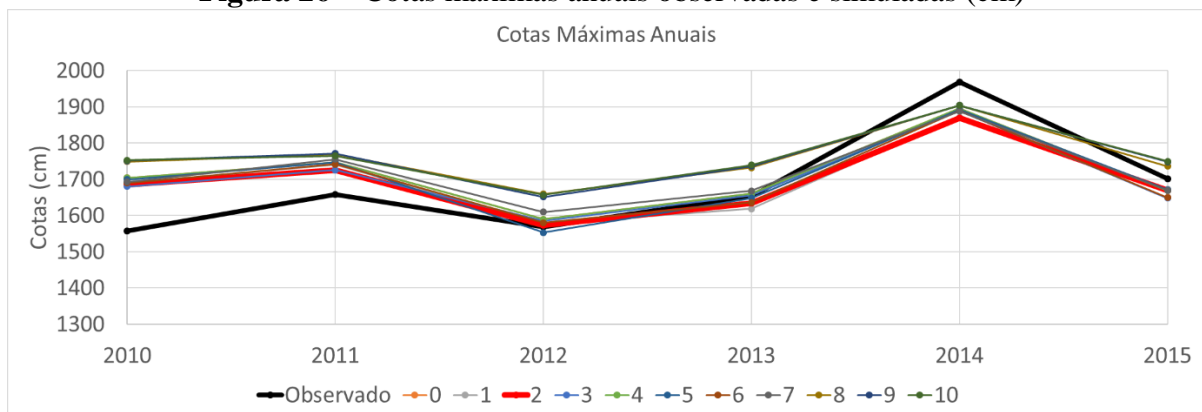
Pela Figura 25, na qual foram utilizados dados de 2010 até 2015, percebe-se que cheias com magnitude de até 38 mil  $m^3/s$  possuem uma tendência de serem superestimadas pelas simulações e acima de 41 mil  $m^3/s$  subestimadas, porém essa percepção não deve ser conclusiva, tendo em vista a pequeno período de tempo que está sendo analisado e que a cheia que ultrapassou os 59 mil  $m^3/s$  (2014) foi anômala, estando em desacordo com qualquer calibração de modelos que tentem representar o comportamento normal de um rio.

**Figura 25** – Diferença entre Vazões Máximas (Simulada – observada) vs Magnitude da Cheia

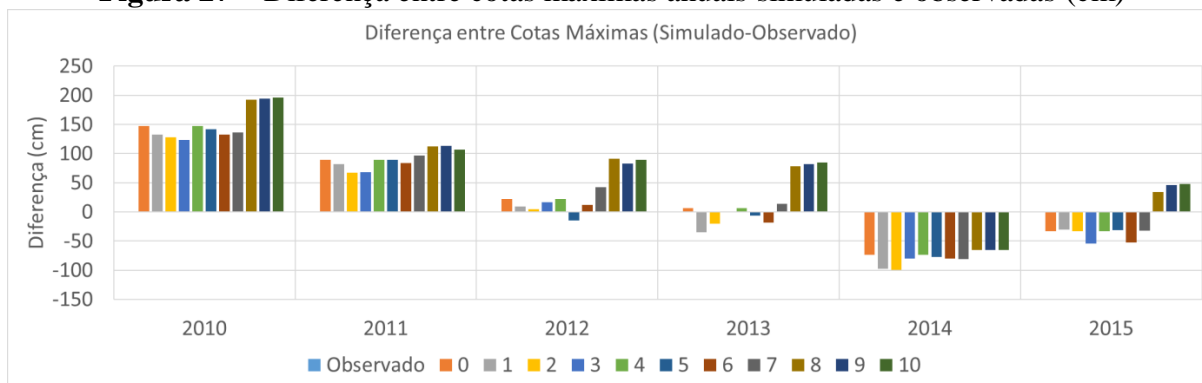


Por sua vez, as Figuras 26 e 27, apresentam respectivamente as mesmas informações das Figuras 23 e 24, porém em termos de cota, pois dependendo do formato da calha do rio e da magnitude da cheia máxima, tem-se um impacto diferente em termos de cota (cm) que o rio atinge. Pela Figura 27 é perceptível que a simulação de ID 2 teve erros abaixo dos 50 cm para a estimativa do pico das cheias em 3 dos 6 anos simulados e abaixo de 1 metro de erro em 5 dos 6 anos simulados.

**Figura 26** – Cotas máximas anuais observadas e simuladas (cm)

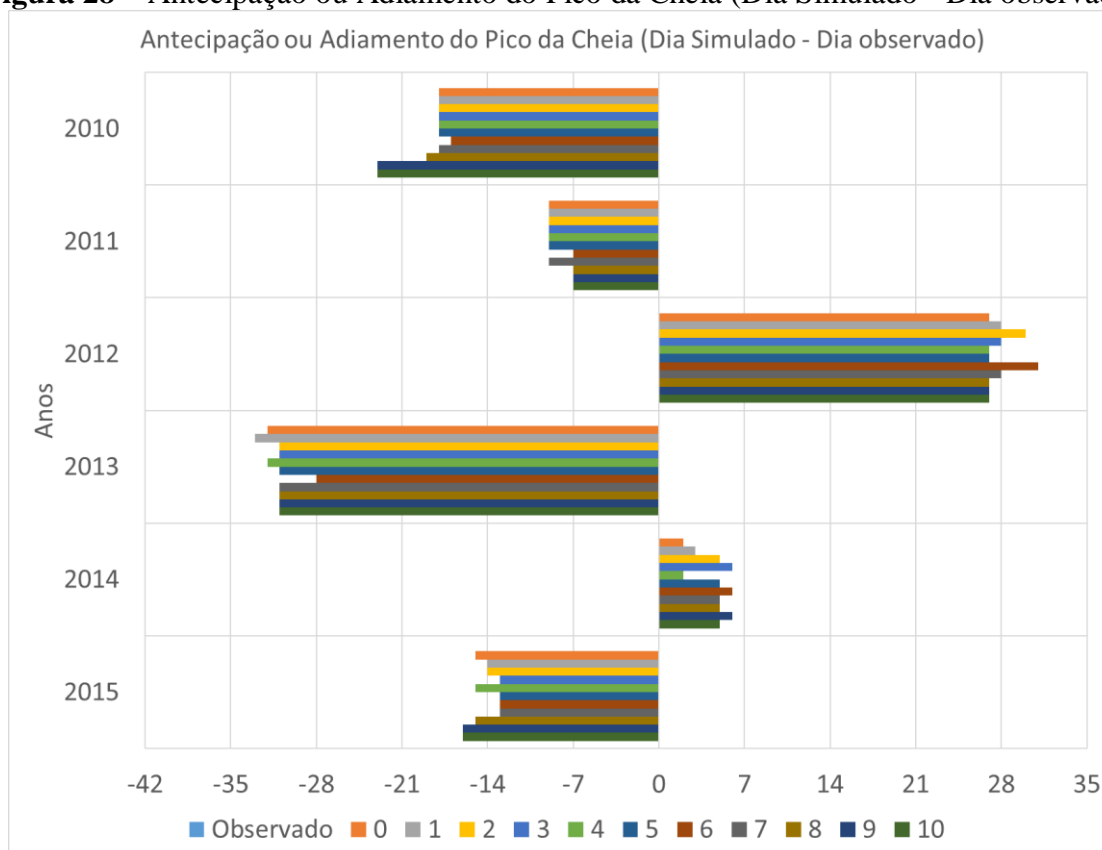


**Figura 27 – Diferença entre cotas máximas anuais simuladas e observadas (cm)**



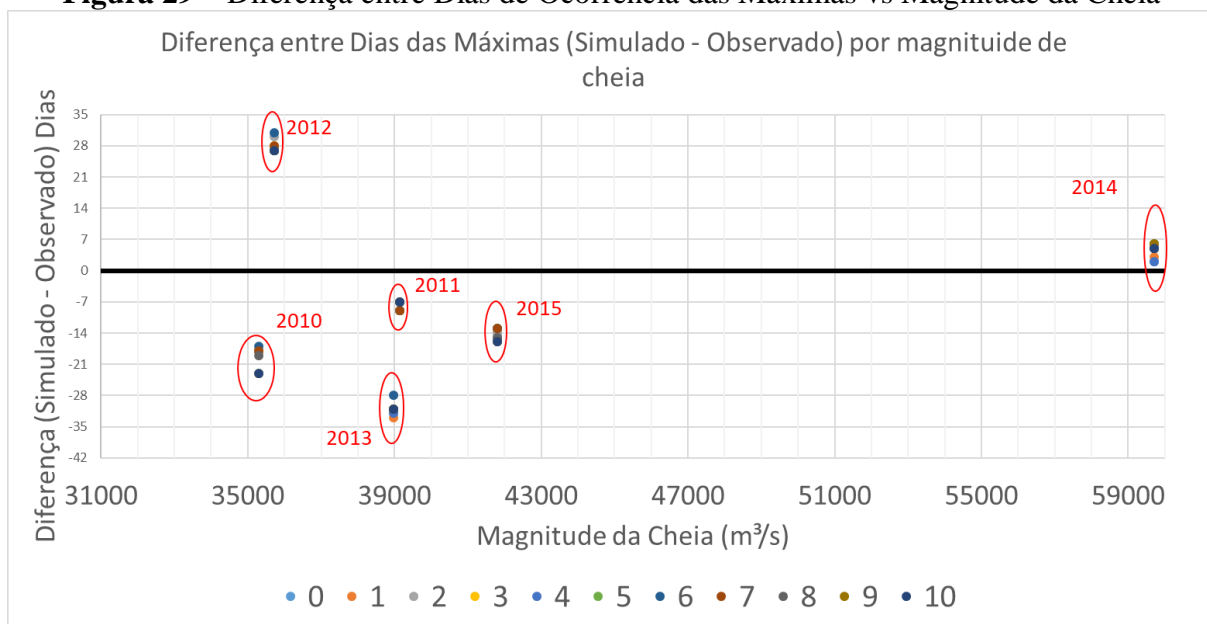
A Figura 28 permite uma análise visual de como está o equilíbrio entre picos de cheia antecipados e retardados pelas simulações, expresso em dias, onde valores negativos indicam antecipação do pico das cheias pelas simulações e valores positivos indicam atrasos dos picos das cheias pelas simulações. A Figura 29 identifica esses dias de antecipação ou atraso extratificados por magnitude da cheia ocorrida.

**Figura 28 – Antecipação ou Adiamento do Pico da Cheia (Dia Simulado - Dia observado)**



Conforme previamente indicado pelas métricas de desempenho da Tabela 10, as simulações obtiveram resultados bem semelhantes em relação a quantidades de dias de antecipação ou atraso na ocorrência dos picos anuais de cheia, com uma tendência para antecipação no período entre 2010 e 2015, porém com intercalação entre os anos em que todas as simulações anteciparam e/ou atrasaram a previsão do pico anual. Pela Figura 29, percebe-se que não há padrão que indique que no período simulado haja diferentes tipos de comportamento entre cheias de menor ou maior magnitude, bem como, comparando-se com a Figura 25, não há um padrão de que cheias superestimadas tendam a antecipar picos de cheia ou vice e versa.

**Figura 29** – Diferença entre Dias de Ocorrência das Máximas vs Magnitude da Cheia



Considerando-se os resultados das calibrações apresentados nesta seção, há uma melhora em relação às variáveis calibráveis do solo obtidas pela calibração de Siqueira et al. (2018), mas vale ressaltar que no trabalho citado, foram utilizadas precipitações oriundas do produto MSWEP v1.1 (BECK et al., 2017) e que foi adotado o período de calibração entre 1992 e 2009.

A Tabela 11 relaciona alguns resultados de trabalhos que utilizaram a estação de Porto Velho para avaliar o desempenho de simulações de vazões do rio Madeira com o MGB, na qual, são relacionados os períodos de calibração, fonte de dados pluviométricos e métricas de desempenho encontradas. São identificados valores bem próximos entre os trabalhos para os

valores de coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ), Nash-Sutcliffe (NS), erro percentual de volume ( $dV$ ) e coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões (LogNS).

**Tabela 11** – Relação de desempenho de ajustes de outros trabalhos com o MGB na bacia hidrográfica do rio Madeira

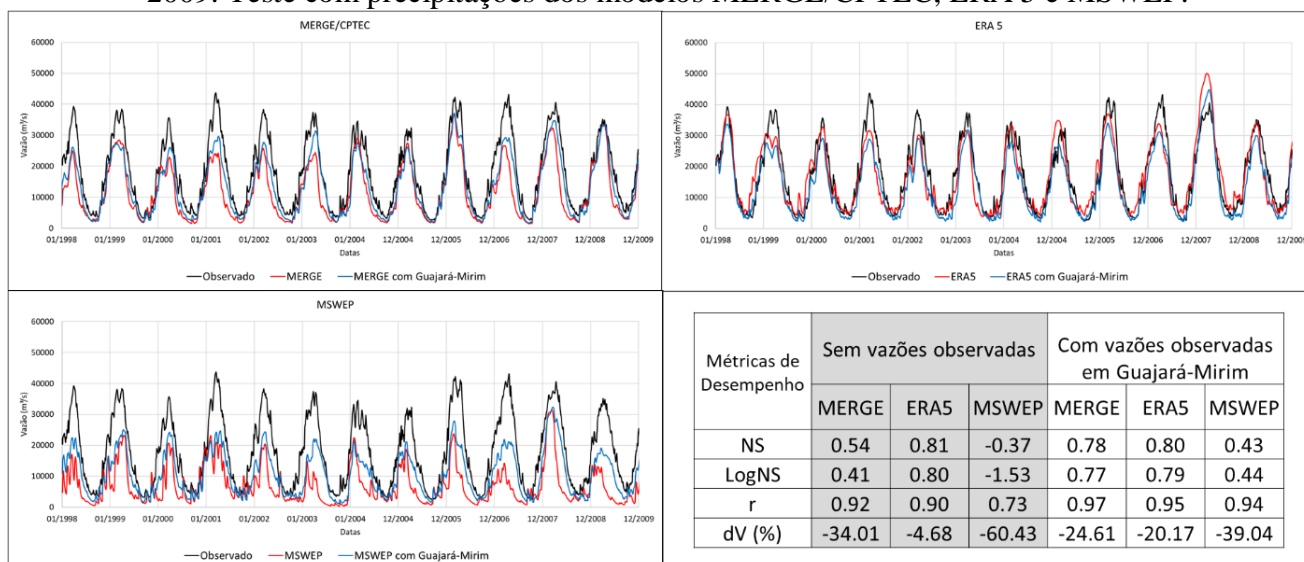
Referência	Período de Calibração	Fonte da Precipitação	$r$	NS	$dV$ (%)	LogNS
RIBEIRO NETO, 2006	1987-1990	Estações pluviométricas da ANA na área brasileira e produto de reanálise NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996) nas áreas da Bolívia e do Perú.	-	0,88	-5,68	0,86
PAIVA et al., 2013	1999-2009	TRMM, algoritmo 3B42 (HUFFMAN et al., 2007)	-	0,8 a 1	-5 a 5	-
BUARQUE, 2015	1998-2005	TRMM, algoritmo 3B42 (HUFFMAN et al., 2007)	-	0,89	0,24	0,89
SIQUEIRA et al., 2018	1992-2009	MSWEP v1.1 (BECK et al., 2017)	0,8 a 1	0,8 a 1	-	-
Presente dissertação (Capítulo 2)	2010-2014	MERGE/CPTEC (ROZANTE et al., 2010)	0,89	0,89	-0,23	-
Presente Artigo (Capítulo 3)	2010-2015	ERA 5 (HERSBACH et al., 2020)	0,95	0,89	4,52	0,88

Conforme resultados obtidos no Capítulo 2, as métricas de desempenho dos modelos variam com o período de calibração, como também variam com a fonte de dados de precipitação. Segundo Correa et al. (2017) o desempenho de conjunto de dados de precipitação estimados por satélite ou combinados com estações pluviométricas diferem dependendo de fatores como localização, tamanho da área de captação, topografia e clima. No caso de regiões sob influência do Sistema de Monções da América do Sul (SAMS), como é o caso da bacia do rio Madeira, estudos concluem que é comum modelos subestimarem precipitações em épocas chuvosas e superestimarem em épocas secas, principalmente na região dos Andes (ESPINOZA et al., 2015; CORREA et al., 2017; ESPINOZA et al., 2019).

Outro fator interveniente nos resultados dos modelos é a inserção, ou não, de vazões observadas em estações fluviométricas a montante do local avaliado em substituição às vazões simuladas, algo que o MGB permite, conforme indicado pelo Apêndice A, mas que não está explícito se foi utilizado este artifício nos trabalhos exemplificados na Tabela 11.

Em testes com a pasta de trabalho do Excel desenvolvida para a calibração do MGB, utilizando-se os mesmos dados de entrada descritos na metodologia deste artigo, porém modificando-se o período de calibração para janeiro de 1998 a dezembro de 2009, verificou-se o efeito da adição de vazões observadas na estação fluviométrica de Guajará-Mirim (15250000 – Localizada após a confluência do rio Guaporé com o Mamoré, conforme Figura 19) no resultado da calibração para a estação fluviométrica de Porto Velho (15400000), para as precipitações disponibilizadas pelos produtos MERGE/CPTEC (ROZANTE et al., 2010), ERA 5 (HERSBACH et al., 2020) e MSWEP v2.2 (BECK et al., 2019). Pela Figura 30 é perceptível que este procedimento apresentou melhoras significativas na eficiência do MGB quando utilizados os produtos MERGE e MSWEP, porém não teve efeitos significativos no produto ERA 5.

**Figura 30** – Desempenho do MGB para Porto Velho quando adicionada a vazão observada na estação fluviométrica de Guajará-Mirim nos cálculos do modelo. Período de avaliação 1998 a 2009. Teste com precipitações dos modelos MERGE/CPTEC, ERA 5 e MSWEP.



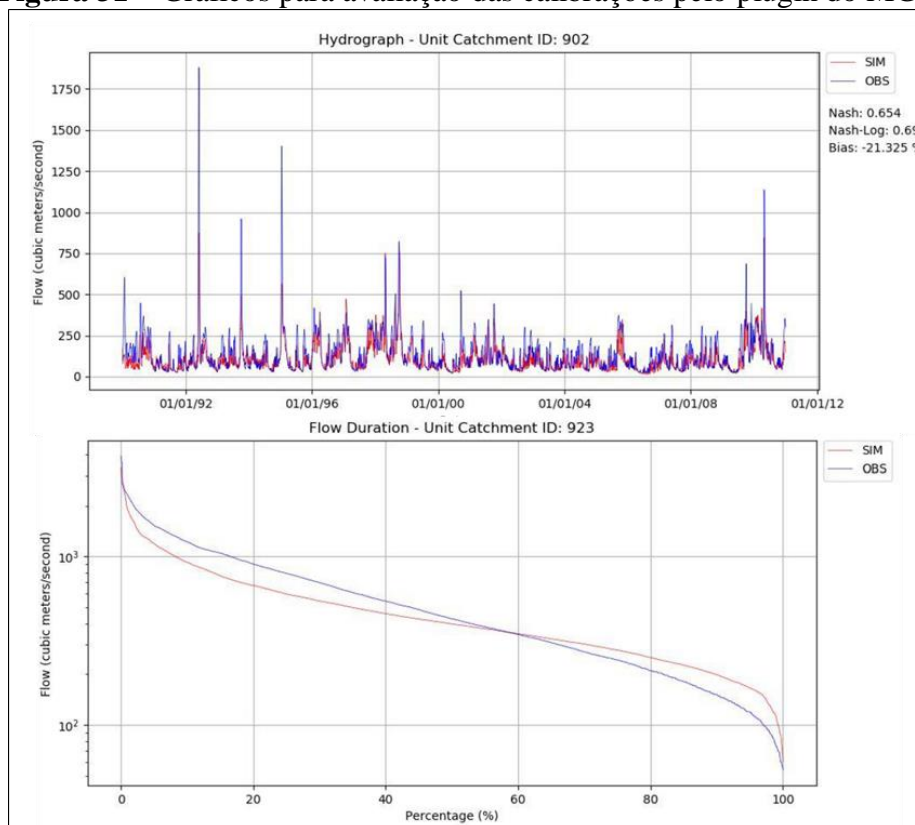
**Legenda:** r = Correlação de Pearson, NS = Nash-Sutcliffe, LogNS = Coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões e dV = Diferença percentual de volume. **Fonte:** Estimativas de precipitação: MERGE/CPTEC (ROZANTE et al., 2010), ERA 5 (HERSBACH et al., 2020) e MSWEP v2.2 (BECK et al., 2019). Vazões Observadas: Hidroweb (SNIRH, 2022).

### 3.3.2 Comparação entre plataformas de calibração

A calibração manual dos parâmetros do solo pelo plugin do MGB 4.5 ou 4.6 no Quantum GIS, consiste nos seguintes passos (ALVES et al., 2020):

- a) Na janela “Soil Parameters” carregar o arquivo com a descrição das URH’s (extensão “.hrc”) e com as Minibacias (extensão “.gtp”), alterar os valores das variáveis em cada grupo de calibração e salvar os parâmetros do solo;
- b) Caso o usuário deseje salvar novos parâmetros do solo, sem substituir o criado anteriormente, ele terá que salvar os novos parâmetros com outro nome. Então deverá criar um novo projeto na janela “Create/Edit Simulation Project” em que deverá informar o caminho dos arquivos com dados climatológicos (“.cln” ou “.cli”), minibacias (“.gtp”), relação cota vs área (“.flp”), URH’s (“.hrc”), parâmetros fixos da superfície do solo (“.fix”), vazões observadas (“.qob”), precipitação (“pbi”);
- c) Após esse procedimento, na janela “Simulation”, o usuário deverá escolher para quais minibacias ele quer que esteja disponível hidrogramas e deverá então iniciar a simulação. Após a simulação o usuário deverá ir no shape com as minibacias, que deverá estar carregado no QGIS, e visualizar o hidrograma e a curva de permanência das vazões simuladas e observadas (Figura 31). Os procedimentos descritos nas alíneas a, b e c devem-se repetir até que o usuário encontre uma calibração satisfatória.

**Figura 31** – Gráficos para avaliação das calibrações pelo plugin do MGB



**Fonte:** Adaptado de Alves et al. 2020

Respeitando-se os procedimentos preliminares exigidos por cada ferramenta de calibração, a Figura 32 demonstra a sequência de procedimentos repetitivos durante a calibração dos parâmetros do solo, tanto para a opção do modo tradicional pelo plugin do MGB, quanto para a opção de utilização da pasta de trabalho do Excel.

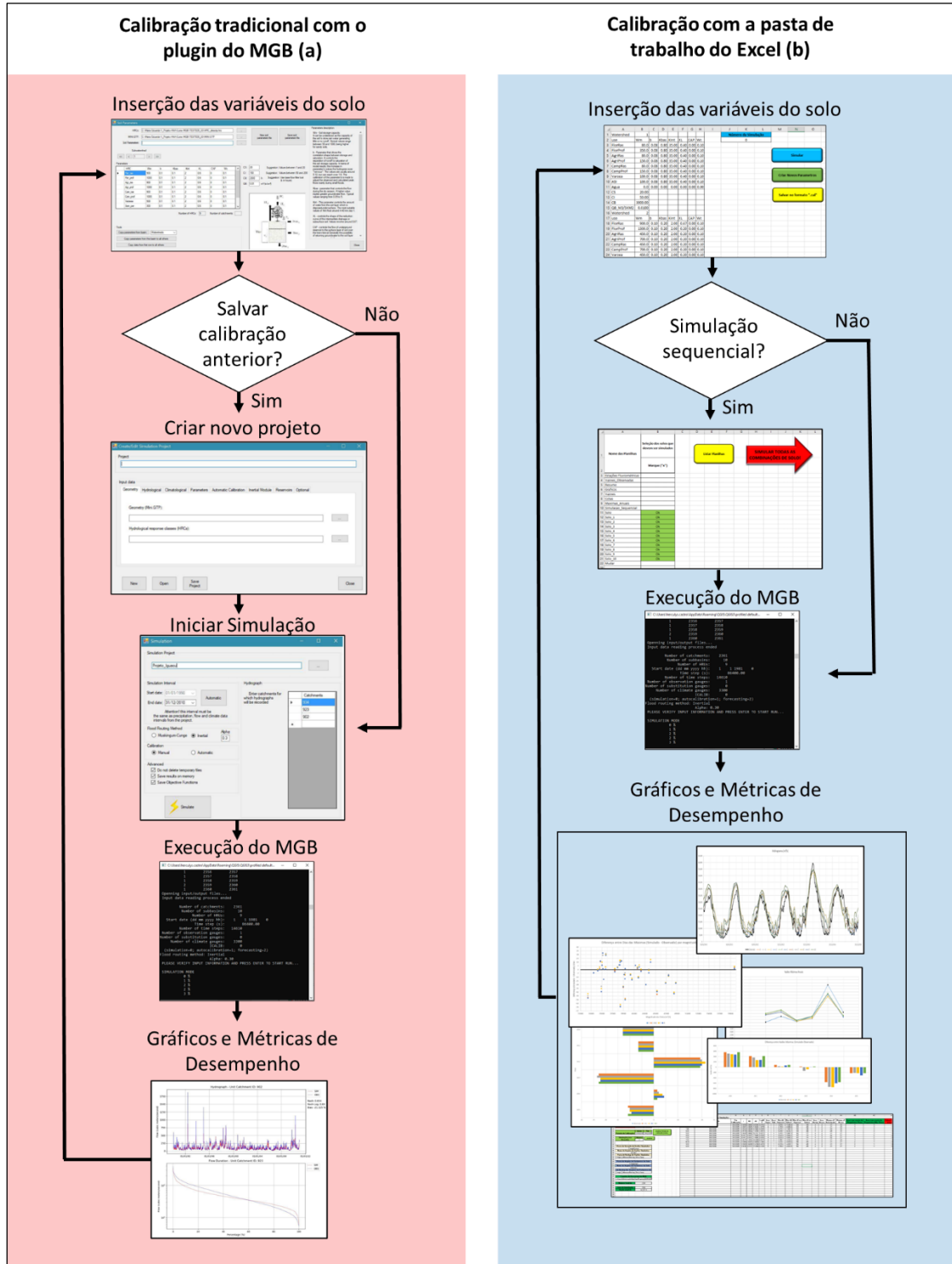
É perceptível uma maior praticidade da planilha de Excel em realizar diversas simulações, devido ao salvamento automático dos parâmetros calibráveis do solo e resultados obtidos em simulações anteriores (algo que no modo tradicional exige a criação de um novo projeto e carregamento de arquivos), bem como devido à possibilidade da realização de simulações sequenciais de várias configurações de solo, possibilitando variar os parâmetros do solo de acordo com uma lógica de calibração e possibilitando uma visualização posterior dos resultados em uma única vez.



Quanto aos gráficos disponibilizados para avaliar as simulações, a pasta de trabalho do Excel fornece um “dashboard” (Figuras de 22 a 29) voltado para a avaliação do período de cheias, bem mais completo que o plugin do QGIS (Figura 31), além de apresentar os gráficos de todas as simulações realizadas, permitindo ao usuário avaliar visualmente se novas mudanças nas variáveis do solo melhoraram ou pioraram os ajustes. Por outro lado, caso o usuário deseje trabalhar com disponibilidade hídrica ou regionalização de vazão, por exemplo, é interessante que seja implementada uma sub-rotina que permita a visualização de gráficos de curvas de permanência de minibacias de interesse. Esse gráfico pode ser facilmente implementado por sub-rotinas exemplificadas no Apêndice A.

Assim como os gráficos, a pasta de trabalho do Excel também possui um número maior de métricas de desempenho, relacionadas nas Tabelas 8, 9 e 10, enquanto o plugin do MGB oferece apenas as métricas do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões (LogNS) e diferença percentual de volume (dV). Ademais, a pasta de trabalho do Excel guarda o histórico de desempenho de simulações anteriores (permitindo a classificação por ferramentas nativas do Excel), permite o mapeamento de diferentes períodos de calibração (avaliação de desempenho) dentro do período simulado, separação dos anos de aquecimento do modelo para que não entrem no cálculo do desempenho e possui uma interface pronta para que qualquer usuário com conhecimentos mínimos de funções do Excel consiga criar suas próprias métricas de desempenho.

**Figura 32** – Comparativo entre o passo-a-passo de calibração do MGB utilizando o plugin do QGIS e a pasta de trabalho do Excel desenvolvida na presente pesquisa



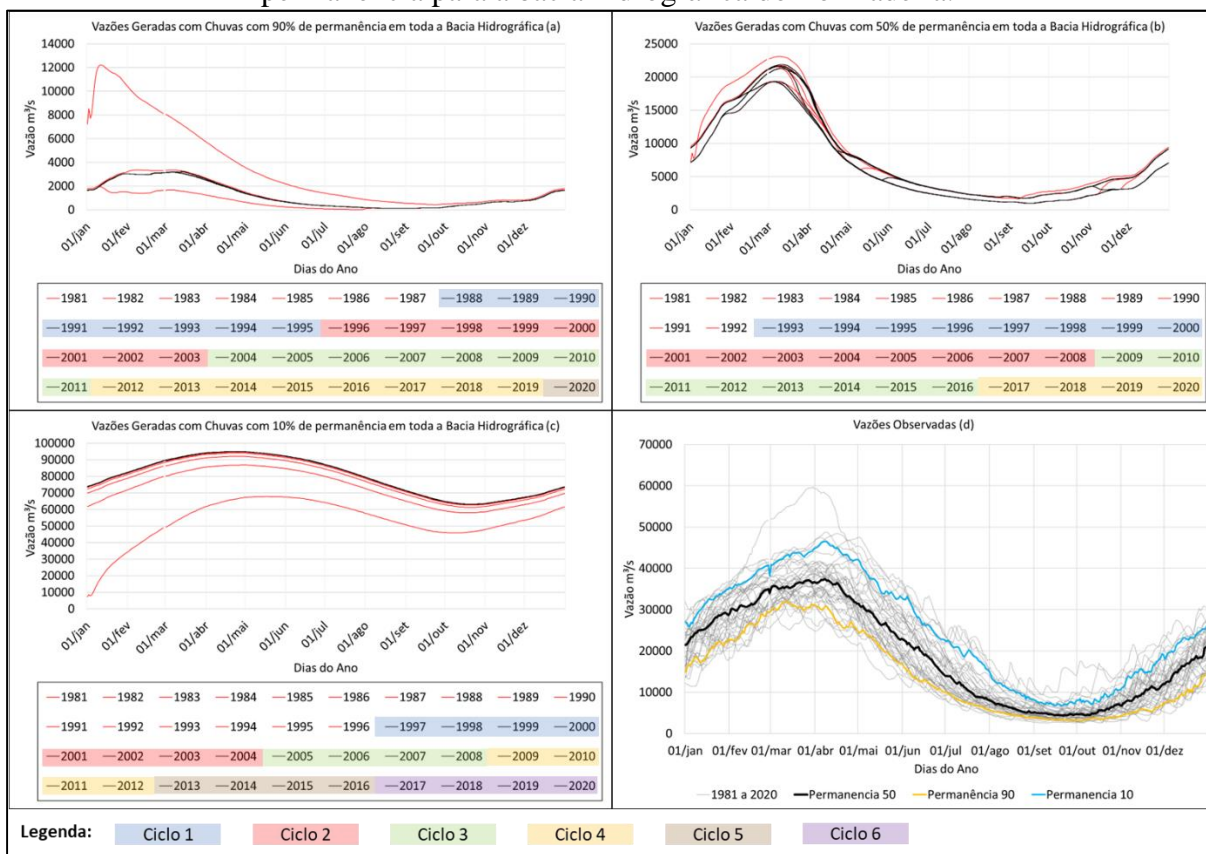
A possibilidade de indicação do período de calibração ou validação dentro de um período maior de simulação, conforme sugerido pela pasta de trabalho do Excel, têm a sua importância

evidencia por estudos como o de Ribeiro Neto (2006), que simulou a bacia hidrográfica do rio Madeira com a primeira versão do MGB (COLLISCHONN, 2001), ou como o de Siqueira et al. (2018), que simulou toda a América do Sul com versões mais recentes (PONTES et al., 2017), onde em ambos foi relatado o descarte dos dois primeiros anos de calibração para o aquecimento do modelo.

Para bacias hidrográficas grandes, como a do rio Madeira, talvez esse tempo de aquecimento seja ainda maior que dois anos para o efetivo estabelecimento das condições hidrológicas iniciais da bacia, conforme sugerido pela melhora progressiva das métricas de desempenho no Capítulo 2. Segundo Alcântara (2018) não há consenso na literatura sobre os critérios de avaliação do período de aquecimento ou método definitivo.

Através de uma experiência feita com a mesma base de dados do rio Madeira utilizada na metodologia deste artigo e uma das sub-rotinas em VBA descritas no Apêndice A deste trabalho, foram calculadas as chuvas com permanência de 90, 50 e 10% do tempo para cada minibacia da área estudada e para cada dia do ano, gerando, por permanência, 366 valores de precipitação por minibacia, que foram repetidos em seu dia correspondente em todos os anos no período de 1981 a 2020. Essas precipitações foram simuladas na bacia hidrográfica do rio Madeira, onde foram gerados dados de vazão, apresentados na Figura 33.

**Figura 33** – Vazões geradas por simulações com o MGB com chuvas de 90, 50 e 10% de permanência para a bacia hidrográfica do rio Madeira.



Conforme ilustrado na Figura 33, mesmo sendo utilizados dados de precipitação iguais para cada dia do ano para cada minibacia, os hidrogramas demoraram vários anos para apresentarem comportamentos interanuais iguais ou cíclicos, a simulação com a chuva calculada para a permanência de 90% (Figura 33 (a)) só atingiu a estabilidade após 7 anos de simulação (1981 a 1987), a partir de onde passou a ter um comportamento cíclico a cada 8 anos; a simulação com a chuva calculada para 50% de permanência (Figura 33 (b)) só atingiu a estabilidade após 12 anos (1981 a 1992), a partir da onde também passou a ter um comportamento cíclico a cada 8 anos e a simulação com a chuva calculada para a permanência de 10% (Figura 33 (c)) só atingiu a estabilidade após 16 anos de simulação (1981 a 1996), a partir de onde passou a ter um comportamento cíclico a cada 4 anos, devido à perturbação causada pelo dia 29 de fevereiro nos anos bissextos.

Com esses resultados, pode-se inferir, de forma não conclusiva, que uma bacia hidrográfica com as características da do rio Madeira tenha um tempo de estabelecimento das condições hidrológicas iniciais entre 7 e 16 anos de simulação, uma vez que com a simulação com dados de precipitação iguais para cada dia do ano, durante vários anos, é verificado este período para que as vazões comecem a apresentar estabilidade ou comportamento cíclico.

### **3.4 Considerações Finais**

Este trabalho realizou a calibração manual do Modelo de Grandes Bacias (MGB) para a bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho, obtendo resultados satisfatórios quando comparados com outros trabalhos científicos que utilizaram as vazões da estação fluviométrica de Porto Velho como referência para métricas de desempenho.

Como ferramenta, utilizou-se uma pasta de trabalho do Excel, dotada de planilhas e sub-rotinas em Visual Basic for Application (VBA) que permitem a realização de simulações com o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH).

A referida pasta de trabalho do Excel permite maior agilidade no processo de calibração manual, dispensa utilização de shapes no processo de calibração, possibilita o mapeamento de diferentes períodos de simulação e diferentes eficiências, possibilita a separação do período de “aquecimento” das condições hidrológicas da bacia do período de avaliação da eficiência, possibilita o backup automático de parâmetros do solo e vazões simuladas de inúmeras rodadas de simulação (inclusive com apresentação no mesmo gráfico), possibilita que o usuário aplique uma lógica de calibração em diversos arquivos de parâmetros do solo de forma sequencial e possibilita a simulação sequencial de várias configurações de solo.

Em termos de viabilidade de experimentos e inovações, esta ferramenta do Excel traz um caminho intermediário entre as inúmeras possibilidades de modificações diretas no código fonte do MGB e o “engessamento” da utilização tradicional do plugin do MGB no QGIS, fomentando-se que profissionais e estudantes que estejam envolvidos com soluções para a gestão de recursos hídricos e que desejem utilizar e potencializar o Modelo de Grandes Bacias (MGB), utilizem as funções, ferramentas e facilidades do Excel para gerar produtos mais específicos para suas necessidades.

## Referências

ALVES, M. E.; MEYER, A. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico.** HGE, IPH. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020.

ALCÂNTARA, G. M. **Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica rural.** 2018. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2018.

BECK, H. E.; DIJK, A. I. J. M. van; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; ROO, A. de. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 21, p. 589-615, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.

BECK, H. E.; WOOD, E. F.; PAN, M.; FISHER, C. K.; MIRALLES, D. M.; VAN DIJK, A. I. J. M.; MCVICAR, T. R.; ADLER, R. F. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, p. 473-500, 2019.

BRASIL. Controladoria Geral da União. **Relatório de Fiscalização nº 201408699 – Diagnóstico situacional dos efeitos da cheia do Rio Madeira em Porto Velho, Rondônia.** Brasília, DF: 2014.

BROWN, S.; HUTTON, B.; CLIFFORD, T.; COYLE, D.; GRIMA, D.; WELLS, G.; CAMERON, C. A Microsoft-Excel-based tool for running and critically appraising network meta-analyses – an overview and application of NetMetaXL. **Systematic Reviews**, v.3, p 110, 2014.

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira.** 2015. 182f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/129875/000977197.pdf?sequence=1>. Acesso em: 09 ago. 2022.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** 2001. 270f. Tese (Doutorado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2500>. Acesso em: 05 out. 2021.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrolog. Sci. J.**, [s.l.], v. 52, p. 878-895, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A.; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A. S. **Manual de Referência Teórica do MGB. HGE, IPH.** Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020.

CORRÊA, A. C. S.; DALL'IGNA, L. G.; SILVA, M. J. G.; JORDÃO, A. A. Rio Madeira: a cheia histórica de 2013/2014. *In: SILVA, R. G. da C. (Org.). Porto Velho: cultura, natureza e território.* Porto Velho: Temática; Edufro, 2016, p. 119-132.

CORREA, S. W.; PAIVA, R. C. D.; ESPINOZA, J. C.; COLLISCHONN, W. Multi-decadal hydrological retrospective: case study of Amazon floods and droughts. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 549, p. 667-684, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>.

ESPINOZA, J. C.; CHAVEZ, S.; RONCHAIL, J.; JUNQUAS, C.; TAKAHASHI, K.; LAVADO, W. Rainfall hotspots over the south tropical Andes: spatial distribution, rain intensity, and the relations with circulação atmosférica em grande escala. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 51, p. 3459-3475, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>.

ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O.; RUSCICA, R.; CONDOM, T.; WONGCHUIG-CORREA, S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. **J. Hydrol. Reg. Stud.**, [s.l.], v. 26, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica. **RBRH**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 21, 2015, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/304991815\\_UM\\_MAPA\\_DE\\_UNIDADES\\_DE\\_RESPONSA\\_HIDROLOGICA\\_PARA\\_A\\_AMERICA\\_DO\\_SUL](https://www.researchgate.net/publication/304991815_UM_MAPA_DE_UNIDADES_DE_RESPONSA_HIDROLOGICA_PARA_A_AMERICA_DO_SUL). Acesso em: 05 out. 2021.

FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; SIQUEIRA, V. A.; PARIS, A.; MOREIRA, D. M.; PAPA, F.; BITAR, A. A.; PARRENS, M.; AIRES, F.; GARAMBOIS, P. A. Trade-offs entre modelos hidrodinâmicos de rios regionais 1-D e 2-D. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 56, e2019WR026812, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR026812>.

FÖEGER, L. B.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M. Simulação Hidrológica com propagação inercial de vazão: estudo de caso na bacia do rio Madeira. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337797213\\_SIMULACAO\\_HIDROLOGICA\\_COM\\_PROPAGACAO\\_INERCIAL\\_DE\\_VAZAO\\_ESTUDO\\_DE\\_CASO\\_NA\\_BACIA\\_DO\\_RIO\\_MADEIRA](https://www.researchgate.net/publication/337797213_SIMULACAO_HIDROLOGICA_COM_PROPAGACAO_INERCIAL_DE_VAZAO_ESTUDO_DE_CASO_NA_BACIA_DO_RIO_MADEIRA). Acesso em: 05 out. 2021.

GETIRANA, A.C.V.; BONNET, M.P.; ROTUNNO FILHO, O.C; COLLISCHONN, W.; GUYOT, J. L.; SEYLER, F.; MANSUR, W.J. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 3219-3236, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7747>.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 13-20, 2007.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P. et al. The ERA5 global reanalysis. **Q J R Meteorol Soc**, v. 146, p. 1999-2049, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D.; GU, G.; NELKIN, E.; BOWMAN, K.; HONG, Y.; STOCKER, E.; WOFF, D. The TRMM multisatellite precipitation analysis: Quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, p. 38-55, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM560.1>.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R. The NCEP/NCAR 40 – Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, p. 437-471, 1996.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. **Eos, Transactions, AGU**, [s.l.], v. 89, n. 10, p. 93-94, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>.

MEYER, D. Z.; AVERY, L. M. Excel as a qualitative data analysis tool. **Field Methods**, v. 21, p 91-112, 2009. DOI: 10.1177/1525822X08323985.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p 282-290, 1970.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, [s.l.], v. 21, p. 1-25, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr021001>.

OLIVEIRA, J. I. **O uso de planilhas eletrônicas e da computação em nuvem na gestão de vagas em creche**. 2019. 64f. Dissertação (Especialização em Informática Instrumental para Professores da Educação Básica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

OVANDO, A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; MARTINEZ, J. M.; SIQUEIRA-JUNIOR, J. L.; PINTO, G. L. N.; PASSY, P.; VAUCHEL, P.; NORIEGA, L.; VON RANDOW, C. Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands. **J. Hydrol. Regul. Stud.**, [s.l.], v. 5, p. 293-308, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.004>.



PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 406, p. 170-181, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrol. Processes**, [s.l.], v. 27, p. 333-346, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8425>.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 49, p. 1226–1243, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **RBRH**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, S. A.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P.; SORRIBAS, M.; COLLISCHONN, W. MGB model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 94, p. 1-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.

RATHOD, T.; SINGH, V.; SRIVASTAVA, S. K.; WESLEY, C. J.; ALAM, M. A. Rainfall prediction using co-active neuro fuzzy inference system for umargaon watershed Nagpur India. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, p. 658-662, 2018.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. *In*: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**. New York, EUA: McGraw-Hill, 1993, Chapter 5.

RIBEIRO NETO, A. **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. 2006. 178f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufRJ.br/pt/documents2/doutorado/2006-2/860-alfredo-ribeiro-neto-doutorado/file>. Acesso em: 05 out. 2021.

RITTER, A.; MUÑOZ-CARPENA, R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 33-45, 2013.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, DANIEL A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, [s.l.], v. 25, p. 885-894, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.

SANTOS, M. S.; CASTRO, H. P.; MATOS, A. J. S. **Relatório de atividades Departamento de Hidrologia**: Sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Madeira – Relatório anual de operação 2021. [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22534>. Acesso em: 02 ago. 2022.

SILVA, F. T.; SANTOS, C. R. O. A. Soluções em planilhas eletrônicas para aplicações no ambiente corporativo. **Caderno PAIC**, v.16, p. 669-682, 2015.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies inundáveis sob vegetação densa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18, 2017, Santos. **Anais...** Santos, SP: 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/papers/avaliacao-do-bare-earth-srtm-para-simulacao-hidrodinamica-de-rios-com-planicies-inundaveis-sob-vegetacao-densa?lang=pt-br>. Acesso: 05 out. 2021.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 22, p. 4815-4842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>.

SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos). Séries Históricas de Estações. **Portal HidroWeb**, 2021. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 16 mai. 2021.

SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos). Séries Históricas de Estações. **Portal HidroWeb**, 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 09 ago. 2022.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F. S.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto Stolf – Programa computacional de dados em Excel-VBA. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.38, p. 774-782, 2014.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 175, p. 339-382, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3).

TUCCI, C. E. M. Previsão em tempo real. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2005 (a), p. 379-414.

TUCCI, C. E. M. Modelos precipitação-vazão. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2005 (b), p. 233-317.

TUCCI, C. E. M. Modelos e simulação. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2005 (c), p. 17-37.

VALENTE, C. N. **Programação em Excel para estatística: Modelo linear e extensões**. 2017. 113f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada à Economia e Gestão) – Universidade de Lisboa. Lisboa, 2017.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho forneceu ferramentas para auxiliar na gestão de risco em eventos extremos de cheia no rio Madeira através da caracterização da bacia hidrográfica do rio Madeira a montante da cidade de Porto Velho e realização de calibração manual do Modelo de Grandes Bacias (MGB) para a região, por meio de pasta de trabalho desenvolvida no Excel.

Foram apresentadas aplicações de planilhas do Excel e códigos em Visual Basic for Applications (VBA) voltados para a avaliação de desempenho de simulações no período de cheias e para potencialização de diferentes usos do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), demonstrando benefícios da utilização dos códigos e planilhas, disponibilizados como produto para profissionais envolvidos com a gestão de recursos hídricos e apresentando caminhos e ferramentas para novos possíveis estudos voltados tanto para a gestão de risco em eventos extremos, como para disponibilidade hídrica.

Como consequência do estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Madeira, está sendo disponibilizado como produto um pacote de dados pré-processados para a bacia hidrográfica do rio Madeira desde suas nascentes andinas até a confluência com o rio Machado, que pode ser utilizado tanto no modo tradicional do MGB, através do QGIS, quanto no modo alternativo, com as planilhas do Excel.

Para a simulação de cheias em tempo atual, a exemplo do trabalho realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através do Sistema de Alerta Hidrológico do rio Madeira, os códigos em VBA descritos no produto “Manual de Utilização de Planilhas em Excel Acopladas ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)” permitem que dados de chuvas estimadas por satélite e previstas por modelos meteorológicos possam ser utilizados nas simulações com o MGB, sendo necessária a criação de outras rotinas computacionais, escritas em softwares e linguagens de programação que suportem dados no formato NetCDF e Grib2, a exemplo de Python, R ou Matlab, que colem esses dados dos servidores dos centros de previsão meteorológica e interpole a precipitação diária para as coordenadas de cada centróide de cada minibacia e/ou que transformem esses dados em arquivos que possuam formatos legíveis pelo VBA, como por exemplo “.txt” ou “.csv”.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia amazônica.** 2018. 90f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19642>. Acesso em: 05 out. 2021.
- ALVES, M. E.; MEYER, A. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico.** HGE, IPH. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. D.O.U. 9.1.1997. Brasília, DF: 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm). Acesso em: 06 out. 2021.
- BRASIL. Controladoria Geral da União. **Relatório de Fiscalização nº 201408699 – Diagnóstico situacional dos efeitos da cheia do Rio Madeira em Porto Velho, Rondônia.** Brasília, DF: 2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Serviço Geológico do Brasil – CPRM e os ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Sistemas de alerta hidrológico.** Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2020. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21778>. Acesso em: 06 out. 2021.
- BROWN, S.; HUTTON, B.; CLIFFORD, T.; COYLE, D.; GRIMA, D.; WELLS, G.; CAMERON, C. A Microsoft-Excel-based tool for running and critically appraising network meta-analyses – an overview and application of NetMetaXL. **Systematic Reviews**, v.3, p 110, 2014.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** 2001. 270f. Tese (Doutorado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2500>. Acesso em: 05 out. 2021.
- CORRÊA, A. C. S.; DALL'IGNA, L. G.; SILVA, M. J. G.; JORDÃO, A. A. Rio Madeira: a cheia histórica de 2013/2014. *In*: SILVA, R. G. da C. (Org.). **Porto Velho: cultura, natureza e território.** Porto Velho: Temática; Edufro, 2016, p. 119-132.
- CORREA, S. W.; PAIVA, R. C. D.; ESPINOZA, J. C.; COLLISCHONN, W. Multi-decadal hydrological retrospective: case study of Amazon floods and droughts. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 549, p. 667-684, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>.

ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O.; RUSCICA, R.; CONDOM, T.; WONGCHUIG-CORREA, S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. **J. Hydrol. Reg. Stud.**, [s.l.], v. 26, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>.

FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; SIQUEIRA, V. A.; PARIS, A.; MOREIRA, D. M.; PAPA, F.; BITAR, A. A.; PARRENS, M.; AIRES, F.; GARAMBOIS, P. A. Trade-offs entre modelos hidrodinâmicos de rios regionais 1-D e 2-D. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 56, e2019WR026812, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR026812>.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica. **RBRH**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>.

GETIRANA, A.C.V.; BONNET, M.P.; ROTUNNO FILHO, O.C; COLLISCHONN, W.; GUYOT, J. L.; SEYLER, F.; MANSUR, W.J. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 3219-3236, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7747>.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **Int. J. Climatol.**, [s.l.], v. 36, p. 1033-1050, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos Hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, p. 35-47, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18316/268>.

MEYER, D. Z.; AVERY, L. M. Excel as a qualitative data analysis tool. **Field Methods**, v. 21, p 91-112, 2009. DOI: 10.1177/1525822X08323985.

OLIVEIRA, J. I. **O uso de planilhas eletrônicas e da computação em nuvem na gestão de vagas em creche**. 2019. 64f. Dissertação (Especialização em Informática Instrumental para Professores da Educação Básica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

OVANDO, A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; MARTINEZ, J. M.; SIQUEIRA-JUNIOR, J. L.; PINTO, G. L. N.; PASSY, P.; VAUCHEL, P.; NORIEGA, L.; VON RANDOW, C. Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands. **J. Hydrol. Regul. Stud.**, [s.l.], v. 5, p. 293-308, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.004>.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrol. Processes**, [s.l.], v. 27, p. 333-346, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8425>.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic

modeling of the Amazon River basin. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 49, p. 1226–1243, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, S. A.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P.; SORRIBAS, M.; COLLISCHONN, W. MGB model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 94, p. 1-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.

RATHOD, T.; SINGH, V.; SRIVASTAVA, S. K.; WESLEY, C. J.; ALAM, M. A. Rainfall prediction using co-active neuro fuzzy inference system for umargaon watershed Nagpur India. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, p 658-662, 2018.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. *In*: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**. New York, EUA: McGraw-Hill, 1993, Chapter 5.

RIBEIRO NETO, A. **Simulação Hidrológica na Amazônia**: Rio Madeira. 2006. 178f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/doutorado/2006-2/860-alfredo-ribeiro-neto-doutorado/file>. Acesso em: 05 out. 2021.

SANTOS, M. S.; CASTRO, H. P.; MATOS, A. J. S. **Relatório de atividades Departamento de Hidrologia** : sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Madeira : relatório anual de operação 2021; realização Divisão de Hidrologia Aplicada. – Brasília : CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22534>. Acesso em: 20 out. 2022.

SILVA, F. T.; SANTOS, C. R. O. A. Soluções em planilhas eletrônicas para aplicações no ambiente corporativo. **Caderno PAIC**, v.16, p. 669-682, 2015.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies inundáveis sob vegetação densa. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18, 2017, Santos. **Anais...** Santos, SP: 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/papers/avaliacao-do-bare-earth-srtm-para-simulacao-hidrodinamica-de-rios-com-planicies-inundaveis-sob-vegetacao-densa?lang=pt-br>. Acesso: 05 out. 2021.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 22, p. 4815-4842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F. S.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto Stolf – Programa computacional de dados em Excel-VBA. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.38, p. 774-782, 2014.

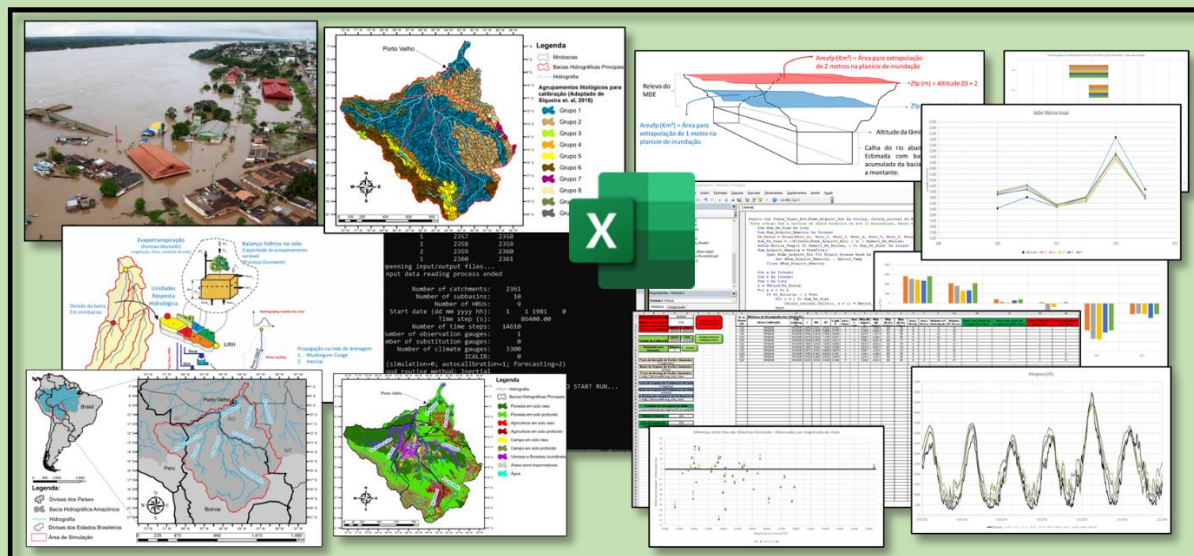
SOUZA, V. A. D.; MOREIRA, D. M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; RUDKE, A. P. Extreme rainfall events in Amazonia: the Madeira river basin. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 18, apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316>.

VALENTE, C. N. **Programação em Excel para estatística: Modelo linear e extensões**. 2017. 113f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada à Economia e Gestão) – Universidade de Lisboa. Lisboa, 2017.



**APÊNDICE A – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DE PLANILAS EM  
EXCEL ACOPLADAS AO MODELO DE GRANDES BACIAS  
(MGB-IPH)**

# MANUAL DE UTILIZAÇÃO DE PLANILHAS EM EXCEL ACOPLADAS AO MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB-IPH)



**Autor:**  
**Hérculys Pessoa e Castro**  
**Co-autor:**  
**Nara Luísa Reis de Andrade**

**Ji-Paraná**  
**2022**

# **MANUAL DE UTILIZAÇÃO DE PLANILHAS EM EXCEL ACOPLADAS AO MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB-IPH)**

**Autor:**

**Hérculys Pessoa e Castro**

**Co-autor:**

**Nara Luísa Reis de Andrade**

Produto apresentada ao PROFÁGUA – Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Nara Luísa Reis de Andrade

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015. Ao *campus* Ji-Paraná da Fundação Universidade Federal de Rondônia.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MODELO DE GRANDES BACIAS .....</b>	<b>1</b>
2.1	BREVE DESCRIÇÃO TEÓRICA .....	2
2.2	VARIÁVEIS DE ENTRADA E CALIBRAÇÃO .....	5
<b>3</b>	<b>ARQUIVOS DE IMPUT .....</b>	<b>8</b>
3.1	MINI.GTP .....	8
3.2	COTA_AREA.FLP.....	10
3.3	CHUVABIN.PBI.....	11
3.4	ALBIAF.FIX .....	11
3.5	PARUSO.CAL .....	12
3.6	QOBS.QOB E QSUBST.QSB .....	13
3.7	MEDIAS.CLI.....	14
3.8	INFOMGB.SIM .....	14
<b>4</b>	<b>PACOTE DE DADOS PARA O RIO MADEIRA .....</b>	<b>17</b>
4.1	UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA .....	19
4.2	MINIBACIAS .....	20
4.2.1	<i>Resolução de 90 metros.....</i>	<i>20</i>
4.2.2	<i>Resolução de 500 metros.....</i>	<i>21</i>
4.2.3	<i>Divisão em grupos para calibração .....</i>	<i>22</i>
4.3	PRECIPITAÇÃO.....	23
4.4	VAZÕES OBSERVADAS .....	23
4.5	PARÂMETROS CLIMATOLÓGICOS .....	24
4.6	PARÂMETROS DA SUPERFÍCIE E DO SOLO.....	24
<b>5</b>	<b>FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS .....</b>	<b>25</b>
5.1	FUNÇÕES.....	26
5.1.1	<i>Nash_S.....</i>	<i>27</i>
5.1.2	<i>Nash_Log.....</i>	<i>29</i>
5.1.3	<i>Correl_P.....</i>	<i>30</i>
5.1.4	<i>dVPercet .....</i>	<i>31</i>
5.1.5	<i>Trans_Cota_Vaz.....</i>	<i>31</i>
5.1.6	<i>Trans_Vaz_Cota.....</i>	<i>33</i>
5.1.7	<i>MaximoEmIntervalo.....</i>	<i>33</i>
5.1.8	<i>MaximoEmIntervalo_2 .....</i>	<i>35</i>
5.1.9	<i>MinimoEmIntervalo_2.....</i>	<i>35</i>
5.1.10	<i>ProcvAle .....</i>	<i>35</i>
5.1.11	<i>ProcvSes .....</i>	<i>36</i>
5.2	SUB-ROTINAS.....	37
5.2.1	<i>MGB_Bin_to_Exel.....</i>	<i>37</i>
5.2.2	<i>Trans_Vazao_Bin.....</i>	<i>40</i>
5.2.3	<i>Exel_to_MGB_pbi.....</i>	<i>41</i>
5.2.4	<i>Gerar_Permanencia.....</i>	<i>42</i>
5.2.5	<i>Inserir_datas.....</i>	<i>44</i>
5.2.6	<i>anos_serie_data .....</i>	<i>45</i>
5.2.7	<i>Executar o MGB pelo Excel .....</i>	<i>45</i>
5.3	PASTAS DE TRABALHO.....	47
5.3.1	<i>Transforma_MINI .....</i>	<i>47</i>
5.3.2	<i>Transforma_COTA_AREA_FLP .....</i>	<i>49</i>
5.3.3	<i>Transforma_Solo.....</i>	<i>50</i>

<b>6</b>	<b>PASTA DE TRABALHO DE CALIBRAÇÃO DO MGB .....</b>	<b>51</b>
6.1	RESUMO.....	54
6.1.1	<i>Setor 1 – Estação fluviométrica e datas.....</i>	<i>55</i>
6.1.2	<i>Setor 2 – Cadastro de diretórios .....</i>	<i>57</i>
6.1.3	<i>Setor 3 – Desempenho das simulações .....</i>	<i>59</i>
6.2	VAZOES_OBSERVADAS.....	62
6.3	VAZÕES .....	62
6.4	COTAS .....	63
6.5	SOLO .....	64
6.6	SIMULACAO_SEQUENCIAL .....	66
6.7	GRÁFICOS .....	67
6.8	MAXIMAS_ANUAIS.....	69
6.8.1	<i>Vazões máximas .....</i>	<i>70</i>
6.8.2	<i>Diferença entre vazões máximas .....</i>	<i>70</i>
6.8.3	<i>Cotas máximas .....</i>	<i>71</i>
6.8.4	<i>Diferença entre cotas máximas .....</i>	<i>71</i>
6.8.5	<i>Dias máximos.....</i>	<i>72</i>
6.8.6	<i>Diferença entre dias máximos.....</i>	<i>72</i>
6.8.7	<i>Diferença entre Vazões Máximas vs Magnitude da Cheia.....</i>	<i>73</i>
6.8.8	<i>Diferença entre Dias de Ocorrência das Máximas vs Magnitude da Cheia .....</i>	<i>74</i>
6.9	INFORMAÇÕES ADICIONAIS.....	75
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE A: FUNÇÕES.....</b>	<b>84</b>
<b>1</b>	<b>NASH_S.....</b>	<b>84</b>
<b>2</b>	<b>NASH_LOG .....</b>	<b>84</b>
<b>3</b>	<b>CORREL_P.....</b>	<b>85</b>
<b>4</b>	<b>DVPERCET .....</b>	<b>86</b>
<b>5</b>	<b>TRANS_COTA_VAZ.....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>TRANS_VAZ_COTA.....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>MAXIMOEMINTERVALO .....</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>MAXIMOEMINTERVALO_2 .....</b>	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>MINIMOEMINTERVALO_2.....</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>PROCVALE.....</b>	<b>89</b>
<b>11</b>	<b>PROCVSES .....</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE B: SUB-ROTINAS .....</b>	<b>91</b>
<b>1</b>	<b>MGB_BIN_TO_EXEL.....</b>	<b>91</b>
<b>2</b>	<b>TRANS_VAZAO_BIN .....</b>	<b>91</b>
<b>3</b>	<b>EXEL_TO_MGB_PBI .....</b>	<b>92</b>
<b>4</b>	<b>GERAR_PERMANENCIA.....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>INSERIR_DATAS.....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>ANOS_SERIE_DATA.....</b>	<b>93</b>

# 1 APRESENTAÇÃO

Este manual visa apresentar funcionalidades de códigos em Visual Basic for Application (VBA) e planilhas do software Microsoft Excel para manipulação de dados de entrada, calibração e resultados no Modelo de Grandes Bacias – MGB (COLLISCHONN, 2001; PONTES et al., 2017), testados para as versões 4.5 e 4.6.

Também são disponibilizados pacotes de dados pré-processados para a bacia hidrográfica do rio Madeira desde suas nascentes andinas até a confluência com o rio Machado, possibilitando sua aplicação em mais de 90% do estado de Rondônia, excetuando-se a região que drena para o rio Roosevelt.

Os pacotes de dados, funções, sub-rotinas e pastas de trabalho (arquivos com planilhas) aqui apresentados poderão vir a ser utilizados por estudantes e profissionais envolvidos com a gestão de recursos hídricos, que tenham desde conhecimentos básicos à conhecimentos avançados no Excel e que tenham interesse de testar o MGB e/ou incorporar funcionalidades mais específicas para suas respectivas necessidades.

Os arquivos e códigos aqui apresentados correspondem a produto vinculado a dissertação intitulada “Modelagem Matemática de Vazões do Rio Madeira para Gestão de Risco em Eventos de Cheia: aplicações do MGB-IPH acoplado a ferramenta alternativa”, no âmbito do programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015, *campus* Ji-Paraná da Fundação Universidade Federal de Rondônia.

## 2 MODELO DE GRANDES BACIAS

O Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA et al. 2011; FAN & COLLISCHONN, 2014; PONTES et al., 2017), é um modelo hidrológico/hidrodinâmico conceitual e distribuído. Como tal, utiliza bases físicas, onde são inseridas equações que representam o transporte da água em seus

diversos meios e discretiza a bacia hidrográfica em unidades menores, para considerar a variabilidade das suas características na área de estudo (MARINHO FILHO et al., 2012).

Desde sua versão original o MGB utiliza a linguagem de programação em Fortran, sendo que nesta última década houve o acoplamento com Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), através dos softwares MapWindow GIS e Quantum GIS (FAN & COLLISCHONN, 2014; SIQUEIRA et al., 2016; PONTES et al., 2017; ALVES et al., 2020). A discretização da bacia hidrográfica deixou de ser feita em células quadradas de igual tamanho e passou a ser dividida em áreas de drenagem de pequenos cursos d'água, então denominados de “minibacias”, que podem ser delimitadas considerando-se a confluência entre dois trechos de rio ou considerando-se tamanhos fixos dos cursos d'água.

Além dessas modificações, o acoplamento com SIG's trouxe interfaces com o usuário de formulários para entrada dos dados, simulação e visualização dos resultados, sem que haja a necessidade de entendimento do código fonte do MGB ou dos arquivos primários utilizados pelo código.

## **2.1 Breve descrição teórica**

A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), é delimitada a bacia hidrográfica para um determinado exutório. Essa bacia é dividida em “minibacias”, que por sua vez é subdividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH's), que são regiões de comportamento hidrológico similar, normalmente obtidos pela combinação de mapas de tipos de solo com o uso e cobertura vegetal (FAN & COLLISCHONN, 2014; FAN et al. 2015).

A partir de uma precipitação interpolada para o centroide de cada minibacia, para cada URH dentro delas, é calculada a interceptação, baseada no Índice de Área Foliar (IAF) e evapotranspiração baseada na equação de Penman-Monteith. O balanço de água no solo é calculado considerando uma camada vertical homogênea, onde a separação do escoamento superficial, subsuperficial e de base está ligado com a espessura total da camada de solo e a altura da zona saturada no tempo anterior, denominado de “bucket model” (COLLISCHONN, 2001; SIQUEIRA et al., 2018; COLLISCHONN et al. 2020).



Ainda a nível de URH, a parcela do escoamento superficial é calculada com base no modelo ARNO (TODINI, 1996) e o subsuperficial é calculado pela equação de condutividade hidráulica insaturada, que utiliza uma função não linear baseada na equação de Brooks-Corey, descrita por Rawls et al. (1993). Já o escoamento de base utiliza uma equação linear baseado na diferença entre o armazenamento máximo e o armazenamento de água no solo, multiplicado por uma taxa de percolação de águas subterrâneas em solo saturado (COLLISCHONN, 2001; SIQUEIRA et al., 2018).

Os escoamentos superficiais, subsuperficiais e de base, gerados pelo balanço hídrico em cada URH, passam para o patamar de minibacia, onde irão compor o volume dos “reservatórios lineares” que irão atenuar as vazões de cada escoamento antes de chegar ao canal principal do rio, baseados em um parâmetro de tempo de retardo (COLLISCHONN, 2001).

As minibacias estão ligadas pela rede de drenagem, onde cada uma escoam para uma de suas vizinhas. A propagação do escoamento recebido de montante para jusante é calculado dentro de cada minibacia, que possuem, atreladas às mesmas, dados de comprimento, declividade, coeficiente de rugosidade, largura e profundidade do canal, bem como a relação cota e área de inundação, que propiciam a utilização das equações da conservação de massa (Eq. 1) e quantidade de movimento (Eq. 2), também denominadas de equações de Saint Vénant (COLLISCHONN, 2001; TUCCI, 2007; PONTES et al., 2017; COLLISCHONN et al., 2020).

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = q \quad \text{Eq. 1}$$

$$\underbrace{\frac{\delta Q}{\delta t}}_{\text{inércia}} + \underbrace{\frac{\delta(Q^2/A)}{\delta x}}_{\text{pressão}} + \underbrace{gA \frac{\delta h}{\delta x}}_{\text{gravidade}} = \underbrace{gAS_0}_{\text{gravidade}} - \underbrace{gAS_f}_{\text{atrito}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde Q é a vazão; A é a área da seção transversal ao escoamento; x é a distância no sentido longitudinal; t é o tempo; q é a vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento do

trecho;  $h$  é a profundidade do rio,  $S_0$  é a declividade do fundo do rio;  $S_f$  representa a declividade da linha de energia e  $g$  a aceleração da gravidade.

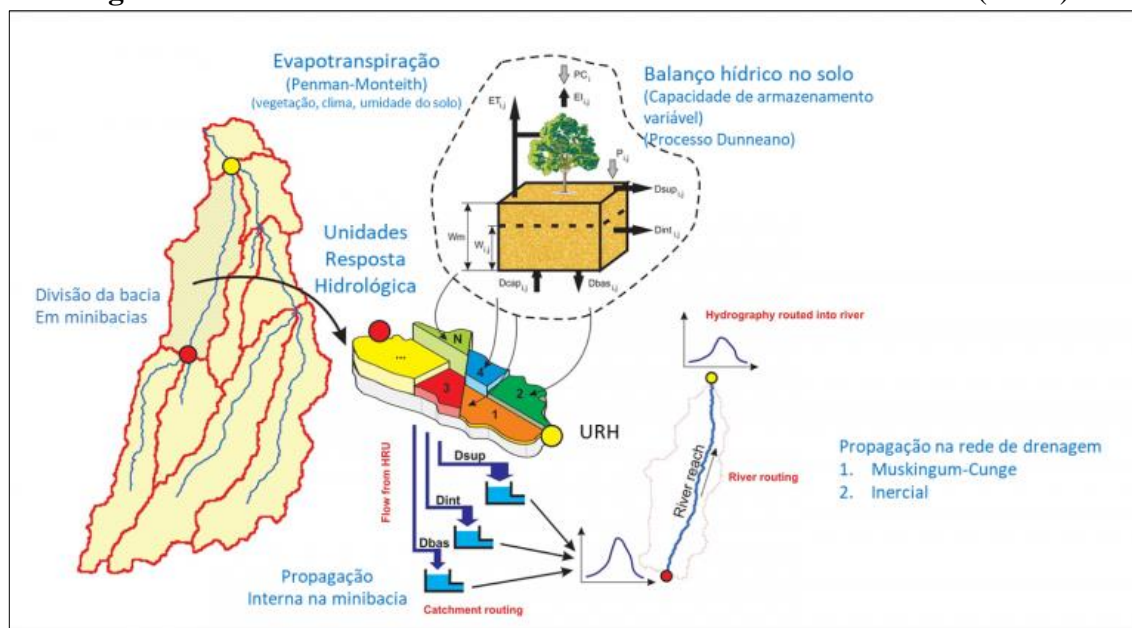
As equações de Saint Vénant representam o escoamento superficial, não-permanente, gradualmente variado e unidimensional (1-D), tendo em vista que despreza a variação de velocidade nas direções transversal e vertical (TUCCI, 2007), considerando-se, portanto, que o espalhamento na planície de inundação ocorre em tempo único e que o nível de água na planície é igual ao nível do canal principal (PAIVA et al. 2011; PAIVA et al. 2012). Na equação da quantidade de movimento os dois primeiros termos representam a inércia, respectivamente, local e convectiva, e o terceiro representa o diferencial de pressões hidrostáticas atuantes nos limites do volume de controle. Os dois termos da direita representam respectivamente a gravidade, proporcional à declividade do fundo do canal, e o atrito com o fundo e as margens do rio, proporcional à declividade da linha de energia (TUCCI, 2007; MOUSSA, 2004 apud ALVES, 2018).

O MGB versão 4.5 ou 4.6, utilizado neste trabalho, permite simular a propagação de vazões por dois métodos:

- Método Muskingum-Cunge (COLLISCHONN et al., 2007), que despreza os termos inerciais e de pressão da equação da quantidade de movimento, não permitindo a simulação de níveis e áreas inundadas; ou
- Método denominado de “modelo inercial local” (BATES et al. 2010; PONTES et al., 2017; SIQUEIRA et al. 2018), que é um método hidrodinâmico que despreza apenas o termo da inércia convectiva da equação da quantidade de movimento, que em comparação com o método hidrodinâmico completo unidimensional (PAIVA et al., 2011; PAIVA et al, 2012; PAIVA et al., 2013) apresentou resultados semelhantes e maior celeridade computacional (PONTES et al., 2017; FÖEGER et al. 2019).

A Figura 1 ilustra um resumo do funcionamento do modelo e dos processos descritos nesta seção.

**Figura 1** - Resumo do Funcionamento do Modelo de Grandes Bacias (MGB)



Fonte: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>

## 2.2 Variáveis de entrada e calibração

O IPH- Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016) e o MGB versão 4.5/4.6 consistem em ferramentas (“plugin”) acopladas ao software Quantum GIS, onde todo o pré-processamento é feito no primeiro plugin, sendo o segundo o responsável por todo cálculo hidrológico descrito no item 2.1 (ALVES et al., 2020).

Os dados básicos de entrada para o IPH-Hydro Tools são um Modelo Digital de Elevação (MDE), podendo ser trabalhado junto com um modelo de direção de fluxo de mesma resolução (SIQUEIRA et al., 2018), e um mapa com URH’s no formato “raster”, que possua no máximo nove tipos de unidades (ALVES et al., 2020). Esses dados são processados, obtendo-se arquivos com informações tabulares que relacionam as minibacias com suas características fisiográficas.

Ainda no pré-processamento essas minibacias podem ser agrupadas para fins de se obter as mesmas calibrações de parâmetros do solo. Esse agrupamento tipicamente é feito em formato de sub-bacias, que consideram as minibacias a montante de estações fluviométricas que serão utilizadas na calibração (ALVES et al., 2020), mas também podem ser divididas por outros critérios, como por exemplo litologia e geologia, conforme adotado por Siqueira et al. (2018).

No plugin do MGB, além dos arquivos gerados na etapa anterior, são requeridos parâmetros médios mensais atrelados à vegetação e cobertura do solo (albedo, índice de área foliar, altura da vegetação e resistência superficial) que são relacionados a cada URH, bem como parâmetros mensais climatológicos: temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), insolação (horas/dia) e velocidade do vento (m/s). Esses dados são utilizados para os cálculos dos volumes de chuva interceptados e evapotranspiração. Ainda como entrada, são requeridos dados de precipitação interpolados para os centros geométricos de cada minibacia, bem como os parâmetros do solo associados a cada URH de cada minibacia, sendo estes últimos os parâmetros que serão efetivamente calibrados.

Estes parâmetros calibráveis são descritos na “janela” de parâmetros do solo do plugin do MGB, bem como por Collischonn et al. (2020). A nível de URH's pertencentes às minibacias, são sete parâmetros:

- Wm: Presente nas equações de escoamento superficial, subsuperficial e de base, citadas no item anterior, representa a profundidade do solo e sua capacidade de armazenamento máximo de água, sendo inversamente proporcional à geração de vazão superficial;
- b: Presente na fórmula do modelo ARNO (TODINI, 1996), é diretamente proporcional a geração de escoamento superficial, sendo associado à magnitude e frequência de picos de vazão de curta duração no hidrograma;
- Kint: Presente na equação do escoamento subsuperficial (RAWLS et al., 1993), é diretamente proporcional a geração desse escoamento. No hidrograma sua variação tem efeito mais perceptível em vazões intermediárias;
- XL: Presente na equação do escoamento subsuperficial, controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária, sendo inversamente proporcional à geração desse escoamento;

- Wz: Presente na equação do escoamento subsuperficial e escoamento de base, representa a porcentagem de Wm abaixo da qual não há geração de escoamento, sendo inversamente proporcional a geração de vazão;
- Kbas: Presente na equação do escoamento de base, é análoga à condutividade hidráulica saturada da lei de Darcy, sendo diretamente proporcional a este tipo de escoamento. No hidrograma, seu efeito mais perceptível é a regulação da magnitude de vazões mínimas;
- CAP: Fração que representa o fluxo máximo da água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo (ascensão capilar). Usualmente nulo, este parâmetro é utilizado apenas em aplicações muito específicas.

Saindo das URH's e passando para o patamar da minibacia, tem-se três parâmetros calibráveis:

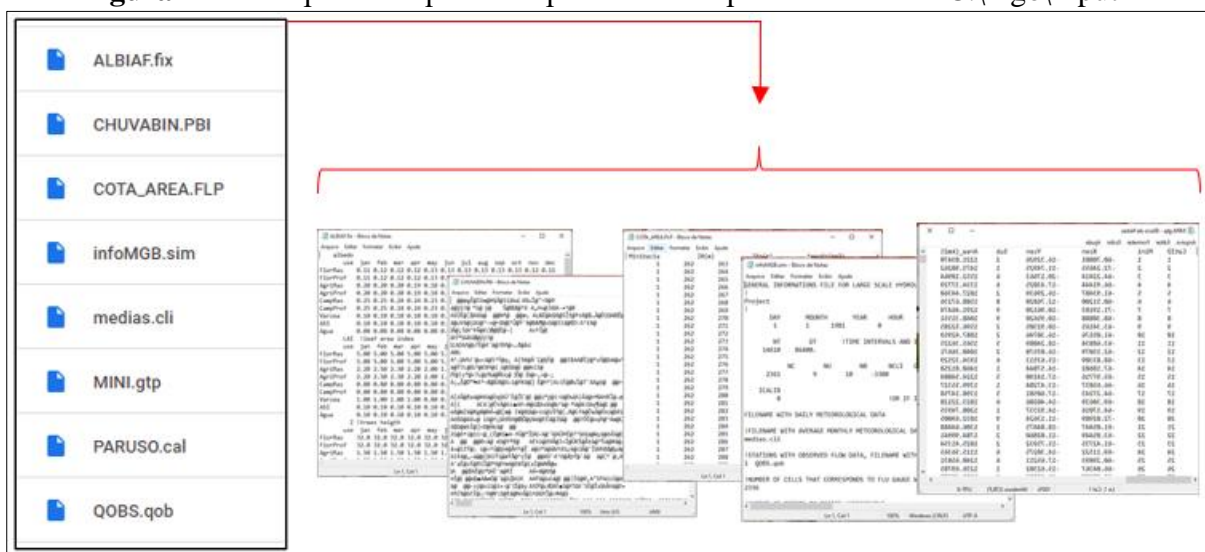
- Cs: Parâmetro que multiplica o tempo de concentração na fórmula do retardo da vazão do reservatório superficial. No hidrograma seu efeito mais perceptível é antecipar ou adiar os picos de vazão;
- Ci: Parâmetro que multiplica o tempo de concentração na fórmula do retardo da vazão do reservatório intermediário. Sua variação tem efeito perceptível na dilatação ou contração do hidrograma em vazões intermediárias;
- Cb: Presente na fórmula do retardo da vazão do reservatório subterrâneo, está associado à taxa de recessão do hidrograma.

Os valores de vazão observados nos postos fluviométricos podem ser adicionados à simulação apenas para serem comparados com os valores simulados, indicando o hidrograma objetivo a ser encontrado, ou podem entrar nas etapas de cálculo do modelo (COLLISCHONN, 2001; FAN et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2018).

### 3 ARQUIVOS DE IMPUT

Independentemente da versão do MGB, os dados de entrada que devem ser lidos pelo código em Fortran devem estar presentes no diretório “C:\mgb\Input” (Figura 2), também devendo existir um diretório vazio “C:\mgb\Output”. O plugin do MGB no QGIS ao rodar a simulação apenas transfere e renomeia os arquivos criados pelo usuário para esse diretório e chama o executável em Fortran, algo que pode ser feito por outros softwares, como por exemplo o Excel. Nos itens a seguir são descritos os 08 (oito) arquivos necessários para rodar o modelo utilizando códigos paralelos ao plugin do QGIS.

Figura 2 – Exemplo de arquivos disponibilizados para o diretório “C:\mgb\Input”



#### 3.1 Mini.gtp

Arquivo tabular que contém as características fisiográficas da bacia hidrográfica, sendo o produto final da etapa de geoprocessamento do IPH- Hydro Tools, juntamente com o arquivo da área de inundação por cota, descrito no item 3.2. O arquivo “MINI.gtp” pode ser lido como arquivo texto, sendo compatível com softwares tipo Bloco de Notas, podendo ser editado, devendo-se respeitar a tabulação por espaços. Sua estrutura é baseada em 26 colunas, ilustrada na Figura 3 e descrita na Tabela 1.

**Figura 3 – Exemplo de arquivo MINI.gtp**

**Tabela 1 – Descrição das colunas do arquivo MINI.gtp**

Coluna	Nome	Descrição
1	CatID	Código do shapefile da minibacia gerado pelo IPH- Hydro Tools (não possui importância para a etapa de cálculo do MGB)
2	Mini	Número de referência da minibacia
3 e 4	Xcen e Ycen	Longitude e Latitude, respectivamente, do centroide da minibacia
5	Sub	Subgrupo de calibração na qual a minibacia está inserida
6	Area_(km <sup>2</sup> )	Área da minibacia
7	AreaM_(km <sup>2</sup> )	Área acumulada a montante da minibacia de referência
8 e 9	Ltr_(km) e Str_(m/km)	Comprimento e declividade, respectivamente, do trecho de rio que atravessa a minibacia
10 e 11	Lrl_(km) e Srl_(m/km)	Comprimento e declividade, respectivamente, do afluente mais longo da minibacia de referência
12	MiniJus	Número da minibacia localizada imediatamente a jusante, e que, portanto, receberá a vazão
13	Ordem	Ordem do curso d'água que cruza a minibacia
14	Hdr	Utilizado em versões anteriores do MGB. Indica o tipo de propagação que será aplicada dentro da minibacia de referência (0 = propagação Muskingum-Cunge e 1= propagação hidrodinâmica).
15 e 16	Width e Depth	Respectivamente largura e profundidade da calha do rio no trecho dentro da minibacia. Calha abaixo da superfície do MDE, aproximada à um formato retangular, baseada em equações exponenciais que relacionam a área total de drenagem a montante da minibacia com a largura e a profundidade da calha do rio.
17	NMAN	Coefficiente de rugosidade de Manning aplicado no trecho de rio
18 a 26	BLC_01 a BLC_09	Porcentagem da área da minibacia em que existe cada uma das Unidades de Resposta Hidrológica (URH), variando de 1 até, no máximo, 9.

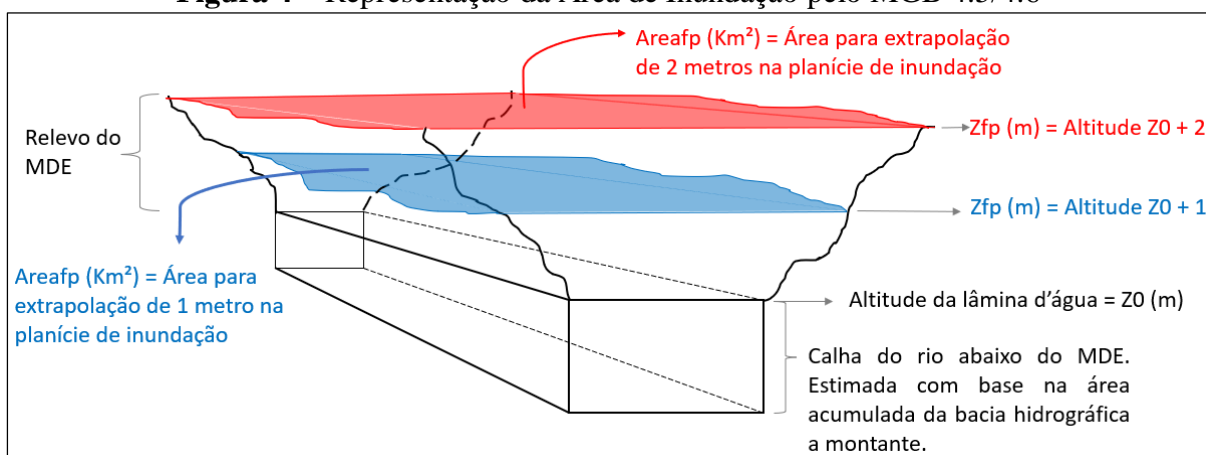
Fonte: Adaptado de Medeiros et al. (2019) e Alves et al. (2020)

### 3.2 Cota\_area.flp

Necessário para a simulação com propagação hidrodinâmica de vazões, descrita no item 2.1, representa a área inundada a cada metro acima da cota da lâmina d'água identificada pelo MDE, denominada de Z0, conforme ilustrado na Figura 4.

O arquivo "COTA\_AREA.FLP" pode ser lido como arquivo texto. Conforme Figura 5, sua estrutura é baseada em quatro colunas: Minibacias – onde é identificado o número da minibacia correspondente; Z0 – cota da lâmina d'água da minibacia em metros; Zfp – valores de cota que somam de 1 a 100 metros acima da cota Z0 e Areafp – área inundada em km<sup>2</sup> para cada cota Zfp.

**Figura 4 – Representação da Área de Inundação pelo MGB 4.5/4.6**



Fonte: Elaborado pelo Autor

**Figura 5 – Exemplo de arquivo COTA\_AREA.FLP**

COTA\_AREA.FLP - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Minibacia	Z0(m)	Zfp(m)	Areafp(km2)
1	262	263	20.46
1	262	264	24.18
1	262	265	27.28
1	262	266	31.41
1	262	267	36.58
1	262	268	38.65
1	262	269	44.43
1	262	270	49.19



### 3.3 Chuvabin.pbi

Representa a precipitação em milímetros que ocorre no centroide de cada minibacia para cada dia de simulação. O arquivo “CHUVABIN.pbi” é gravado em formato binário com dados de precipitação registrado como números reais de ponto flutuante de precisão simples, onde um dado de precipitação corresponde à 32 bits (4 bytes), podendo ser lido em uma matriz com número de colunas equivalente ao número de dias de simulação, onde o preenchimento deve ser feito de forma sequencial, obtendo-se o número de linhas equivalente ao número de minibacias.

### 3.4 Albiaf.fix

Representa os parâmetros fixos de cada URH ligados ao tipo de cobertura do solo, normalmente não calibráveis, por serem obtidos na literatura. Esses parâmetros são Coeficiente de Reflexão de Superfície (Albedo), Índice de Área Foliar, Altura da Vegetação e Resistência Superficial. O arquivo “ALBIAF.fix” pode ser lido como arquivo texto, sendo compatível com softwares tipo Bloco de Notas. Sua estrutura é baseada no título do parâmetro, seguida da listagem de URH's e valores médios mensais, conforme mostra a Figura 6. O arquivo pode ser editado no plugin do MGB do QGIS ou diretamente no Bloco de Notas, devendo-se respeitar a tabulação por espaços.

Figura 6 – Exemplo de arquivo ALBIAF.fix

```
ALBIAF.fix - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
albedo
use jan feb mar apr may jun jul aug sep oct nov dec
FlorRas 0.11 0.12 0.12 0.12 0.13 0.13 0.13 0.13 0.13 0.13 0.13 0.12 0.11
FlorProf 0.11 0.12 0.12 0.12 0.13 0.13 0.13 0.13 0.13 0.13 0.13 0.12 0.11
AgriRas 0.20 0.20 0.20 0.19 0.18 0.18 0.17 0.17 0.17 0.17 0.18 0.18 0.19
AgriProf 0.20 0.20 0.20 0.19 0.18 0.18 0.17 0.17 0.17 0.17 0.18 0.18 0.19
CampRas 0.25 0.25 0.24 0.24 0.23 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.23 0.23 0.24
CampProf 0.25 0.25 0.24 0.24 0.23 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.23 0.23 0.24
Varzea 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10
ASI 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10 0.10
Agua 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08
LAI !leaf area index
use jan feb mar apr may jun jul aug sep ouc nov dec
FlorRas 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00
```

### 3.5 Paruso.cal

Representa os parâmetros normalmente calibrados de cada URH, ligados às características do solo. Conforme descrito no item 2.2, são sete parâmetros específicos para cada URH dentro de cada grupo de minibacias (Wm, b, Kint, XL, Wz, Kbas, CAP) e três parâmetros específicos a nível da minibacia inteira dentro de determinado grupo (Cs, Ci e Cb).

O arquivo “PARUSO.cal” pode ser lido e editado como arquivo texto. Sua estrutura é baseada no número do grupo, denominado de Watershed 1, 2, 3 e etc., seguido da listagem de URH’s e valores para cada parâmetro, conforme mostra a Figura 7.

**Figura 7** – Exemplo de arquivo PARUSO.cal

Watershed 1							
use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	200.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
FlorProf	350.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
AgriRas	200.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
AgriProf	150.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
CampRas	200.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
CampProf	150.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
Varzea	100.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
ASI	100.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	30.00						
CI	50.00						
CB	3000.00						
QB_M3/SKM2	0.0100						
Watershed 2							
use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	900.0	0.08	0.20	2.00	0.67	0.00	0.10
FlorProf	1300.0	0.08	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10
AgriRas	450.0	0.08	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10
AgriProf	700.0	0.08	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10
CampRas	450.0	0.08	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10
CampProf	700.0	0.08	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10
Varzea	450.0	0.08	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10

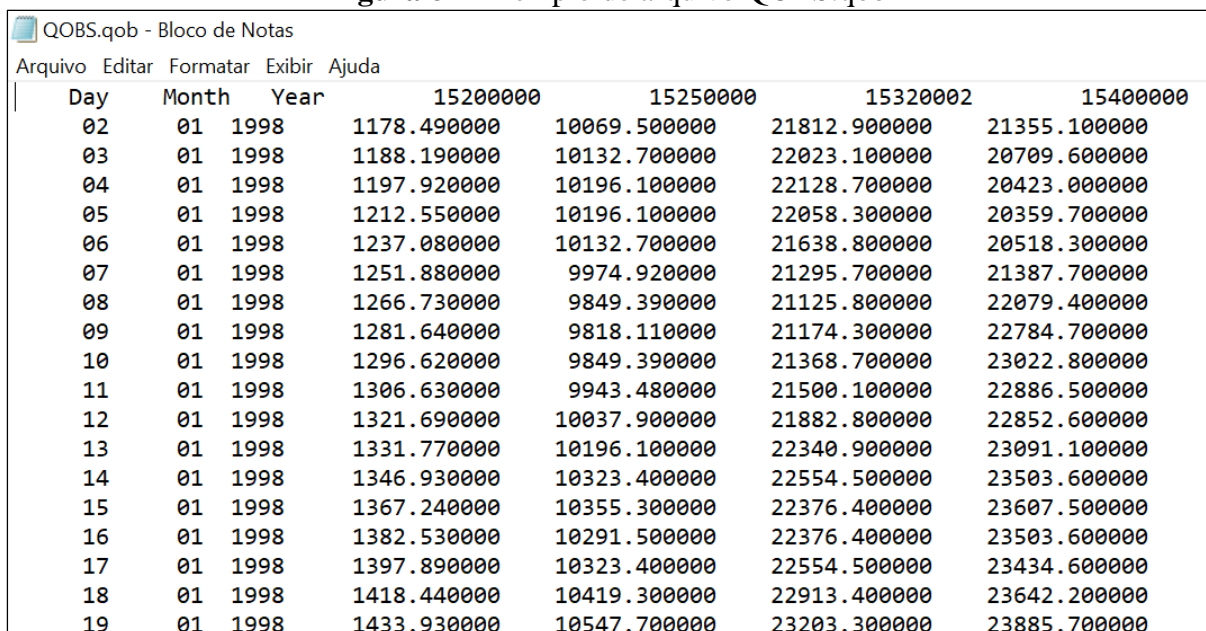
### 3.6 Qobs.qob e Qsubst.qsb

O arquivo “QOBS.qob” possui as vazões observadas de postos fluviométricos na bacia hidrográfica de estudo. Essas vazões são inseridas apenas para comparar o resultado das simulações com dados observados, sem participarem do cálculo hidrológico/hidrodinâmico do modelo. Apesar de não interferirem no resultado das simulações, sua existência é obrigatória para a medida de eficiência do modelo, sendo requerido pelo código fonte do MGB antes de iniciar a simulação.

O arquivo “QSUBST.qsb” possui a mesma estrutura do arquivo “QOBS.qob”, porém sua existência não é obrigatória para executar o código fonte. Nele são inseridas as vazões observadas que deverão entrar no cálculo hidrodinâmico do modelo, em substituição às vazões simuladas, corrigindo as vazões propagadas da minibacia que contém a estação fluviométrica. Esse artifício normalmente elimina erros de estimativa chuva-vazão e hidrodinâmicos de sub-bacias a montante do ponto de substituição das vazões.

Ambos os arquivos podem ser lidos e editados como texto, respeitando-se a tabulação por espaços e a sequência de dia, mês, ano e vazão em m<sup>3</sup>/s para as respectivas estações fluviométricas, conforme ilustra a Figura 8.

**Figura 8** – Exemplo de arquivo QOBS.qob



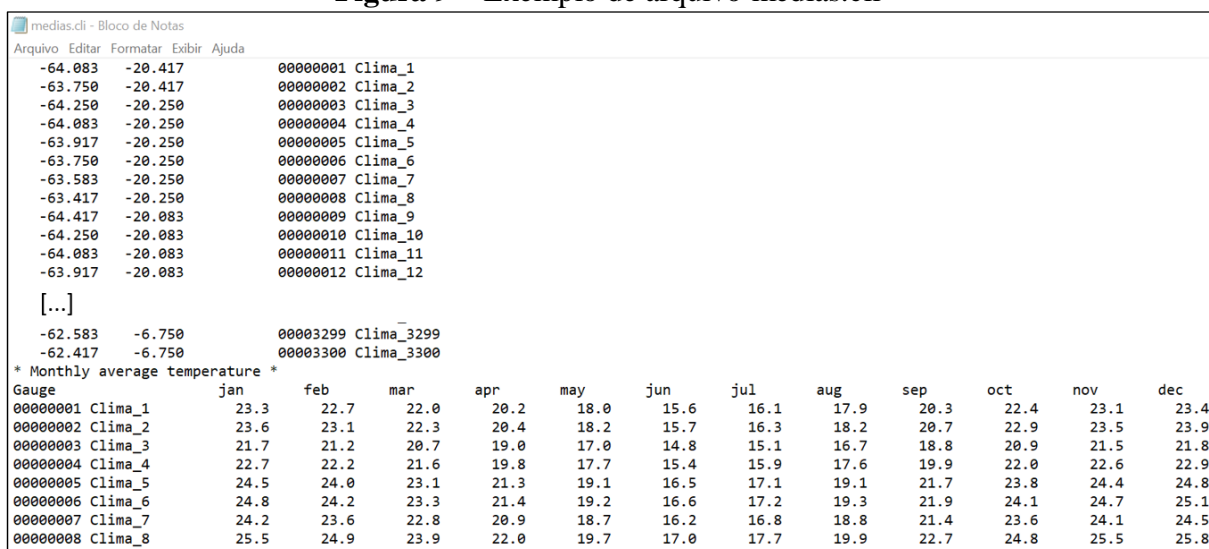
Day	Month	Year	15200000	15250000	15320002	15400000
02	01	1998	1178.490000	10069.500000	21812.900000	21355.100000
03	01	1998	1188.190000	10132.700000	22023.100000	20709.600000
04	01	1998	1197.920000	10196.100000	22128.700000	20423.000000
05	01	1998	1212.550000	10196.100000	22058.300000	20359.700000
06	01	1998	1237.080000	10132.700000	21638.800000	20518.300000
07	01	1998	1251.880000	9974.920000	21295.700000	21387.700000
08	01	1998	1266.730000	9849.390000	21125.800000	22079.400000
09	01	1998	1281.640000	9818.110000	21174.300000	22784.700000
10	01	1998	1296.620000	9849.390000	21368.700000	23022.800000
11	01	1998	1306.630000	9943.480000	21500.100000	22886.500000
12	01	1998	1321.690000	10037.900000	21882.800000	22852.600000
13	01	1998	1331.770000	10196.100000	22340.900000	23091.100000
14	01	1998	1346.930000	10323.400000	22554.500000	23503.600000
15	01	1998	1367.240000	10355.300000	22376.400000	23607.500000
16	01	1998	1382.530000	10291.500000	22376.400000	23503.600000
17	01	1998	1397.890000	10323.400000	22554.500000	23434.600000
18	01	1998	1418.440000	10419.300000	22913.400000	23642.200000
19	01	1998	1433.930000	10547.700000	23203.300000	23885.700000

### 3.7 Médias.cli

Contém informações de médias mensais de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), percentual de insolação (horas/dia), velocidade do vento (m/s) e pressão atmosférica (kPa), de postos de observação climatológica reais ou estimativas em pontos de grade, sendo utilizados para cálculo da evapotranspiração, de acordo com o método do vizinho mais próximo para cada minibacia.

O arquivo “medias.cli” pode ser lido como arquivo texto, sendo compatível com softwares tipo Bloco de Notas. Sua estrutura é composta pelo cadastro das longitudes, latitude, código e nome da estação climatológica, seguida abaixo dos dados médios mensais das variáveis supracitadas para cada posto. A Figura 9 demonstra essa estrutura.

Figura 9 – Exemplo de arquivo medias.cli



```
medias.cli - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
-64.083 -20.417 00000001 Clima_1
-63.750 -20.417 00000002 Clima_2
-64.250 -20.250 00000003 Clima_3
-64.083 -20.250 00000004 Clima_4
-63.917 -20.250 00000005 Clima_5
-63.750 -20.250 00000006 Clima_6
-63.583 -20.250 00000007 Clima_7
-63.417 -20.250 00000008 Clima_8
-64.417 -20.083 00000009 Clima_9
-64.250 -20.083 00000010 Clima_10
-64.083 -20.083 00000011 Clima_11
-63.917 -20.083 00000012 Clima_12

[...]

-62.583 -6.750 00003299 Clima_3299
-62.417 -6.750 00003300 Clima_3300

* Monthly average temperature *
Gauge      jan      feb      mar      apr      may      jun      jul      aug      sep      oct      nov      dec
00000001 Clima_1  23.3    22.7    22.0    20.2    18.0    15.6    16.1    17.9    20.3    22.4    23.1    23.4
00000002 Clima_2  23.6    23.1    22.3    20.4    18.2    15.7    16.3    18.2    20.7    22.9    23.5    23.9
00000003 Clima_3  21.7    21.2    20.7    19.0    17.0    14.8    15.1    16.7    18.8    20.9    21.5    21.8
00000004 Clima_4  22.7    22.2    21.6    19.8    17.7    15.4    15.9    17.6    19.9    22.0    22.6    22.9
00000005 Clima_5  24.5    24.0    23.1    21.3    19.1    16.5    17.1    19.1    21.7    23.8    24.4    24.8
00000006 Clima_6  24.8    24.2    23.3    21.4    19.2    16.6    17.2    19.3    21.9    24.1    24.7    25.1
00000007 Clima_7  24.2    23.6    22.8    20.9    18.7    16.2    16.8    18.8    21.4    23.6    24.1    24.5
00000008 Clima_8  25.5    24.9    23.9    22.0    19.7    17.0    17.7    19.9    22.7    24.8    25.5    25.8
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 3.8 InfoMGB.sim

O arquivo “infoMGB.sim” reúne as informações e configurações gerais necessárias para que o código fonte comece a simulação, bem como interliga alguns dos arquivos citados nos subitens anteriores. Assim como os demais arquivos citados, ele também pode ser aberto e editado como arquivo texto. A Figura 10 mostra uma visão geral dos dados que compõem o arquivo.

**Figura 10 – Exemplo de arquivo infoMGB.sim**

```

*infoMGB.sim - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
GENERAL INFORMATIONS FILE FOR LARGE SCALE HYDROLOGIC MODEL
!
!Project
!
!DAY      MOUNTH    YEAR      HOUR      !SIMULATION START
Linha 1  → 1          1          1981      0
!
!NT      DT      !TIME INTERVALS AND INTERVALS SIZE IN SECONDS
Linha 2  → 14610    86400.
!
!NC      NU      NB      NCLI     CRU_IND  RESERV   FLOOD ALPHA*100 !NUMBER OF CATCHMENTS, HRUs, SUB-BASINS, CLIMATE...
Linha 3  → 2361      9          10       -3300    0        0        1        30
!
!ICALIB                                     !INDICATES IF IT IS GONNA BE USED AUTOMATIC CALIBRATION (1) OR NOT (0)
Linha 4  → 0                                           !OR IF IT WILL MAKE THE FORECAST (2)
!
!FILENAME WITH DAILY METEOROLOGICAL DATA
Linha 5  →
!FILENAME WITH AVERAGE MONTHLY METEOROLOGICAL DATA
Linha 6  → medias.cli
!
!STATIONS WITH OBSERVED FLOW DATA, FILENAME WITH DATA
Linha 7  → 2 Q0B5.qob
!
!NUMBER OF CELLS THAT CORRESPONDS TO FLU GAUGE WITH DATA
Linha 8  → 2265 2336
!
!NUMBER OF POINTS TO RECORD HYDROGRAPHS
Linha 9  → 4
!
!CELLS THAT CORRESPONDS TO THOSE POINTS
Linha 10 → 2265
           2336
           2310
           2319
!
!Number of cells where calculated flow must be substituted for the one read from file and filename
Linha 11 → 1 QSUBST.qsb
!
!Cells which flow data will be substituted
Linha 12 → 2249

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme indicação pelo cabeçalho, na Linha 1 da Figura 10 devem ser inseridos o dia, mês, ano e hora do início da simulação. Na Linha 2 deve ser inserida a quantidade de dias de simulação (data final – data inicial +1) e o intervalo de tempo em segundos (um dia corresponde a 86400 segundos). Na Linha 3 devem ser inseridos, respectivamente, os seguintes dados:

- NC: Número total de minibacias;
- NU: Número de URH's;
- NB: Número de grupos de calibração;
- NCLI: Número de estações climatológicas;
- CRU\_IND: Para utilizar a base de dados climatológicos CRU (NEW et al., 2002) obtida diretamente pelo plugin do MGB, o valor deve ser igual a 1. Para utilizar qualquer base

de dados, inclusive a própria CRU (NEW et al., 2002) obtida de outra forma, o valor deve ser igual a 0;

- RESERV: Variável não testada neste trabalho. Parâmetro default = 0
- FLOOD: Indica o tipo de propagação de vazões que será aplicada (0 = propagação Muskingum-Cunge e 1= propagação hidrodinâmica);
- ALPHA\*100: Está relacionado ao intervalo de tempo (dt) da simulação inercial. Quanto maior o alpha, a simulação roda mais rápido, porém pode gerar instabilidade numérica. Em casos de instabilidade, recomenda-se baixar o valor do alpha, assim a simulação ficará mais lenta e mais estável (ALVES et al., 2020). Parâmetro default = 30.

Na Linha 4 deve ser indicado, ou não, se a simulação que será feita será referente a uma calibração automática, onde o modelo irá executar diversas rodadas de simulação para otimizar os resultados através do algoritmo MOCOM-UA (YAPO et al.,1998), conforme procedimento descrito por Medeiros et al., 2019. Em caso de calibração automática o valor adotado deve ser igual a 1, caso contrário deve ser igual a 0 ou, caso a simulação seja referente à uma previsão, o valor adotado deve ser igual a 2.

Ainda referente à Figura 10, na Linha 5 deve ser inserido o nome do arquivo que contém dados climatológicos, caso eles sejam diários. Caso eles sejam mensais, a Linha 5 deve ficar em branco. O mesmo vale para a Linha 6, onde deve ser inserido o nome do arquivo que contém os dados climatológicos mensais, conforme descrito pelo item 3.7.

A Linha 7 deve conter o número de pontos em que serão inseridas vazões observadas, apenas para fins de medida de eficiência do modelo, bem como, após dois espaços, o nome do arquivo que contém essas vazões, conforme descrito pelo item 3.6. Na Linha 8 deverão ser inseridos os números das minibacias correspondentes às estações fluviométricas existentes no arquivo QOBS.qob separados por um espaço e em ordem respectiva.

Por exemplo, na Figura 10 está sendo indicado que serão utilizadas 2 estações fluviométricas localizadas nas minibacias 2265 e 2336, que, conforme Figura 8, são correspondentes às

estações 15200000 e 15250000, respectivamente. É obrigatório que seja listada pelo menos uma minibacia para que o código fonte funcione, porém não é necessário listar todas as demais minibacias de interesse quando se utiliza códigos paralelos, como por exemplo macros acopladas às planilhas de Excel que serão mostradas mais a diante neste trabalho.

A Linha 9 deve conter o número de pontos em que se deseja ter o retorno das vazões simuladas. O número das respectivas minibacias devem ser listados em sequência a partir da Linha 10, conforme mostra a Figura 10. Estes campos devem ter pelo menos o quantitativo e minibacias inseridas nas Linha 7 e 8, podendo-se adicionar outras minibacias de interesse, mesmo que não tenham estações fluviométricas. Assim como as linhas anteriores, é obrigatório que seja listada pelo menos uma minibacia para que o código fonte funcione, porém não é necessário listar todas as demais minibacias de interesse quando se utiliza códigos paralelos ao plugin do QGis.

As Linhas 11 e 12 seguem a mesma lógica e estrutura das Linhas 7 e 8, respectivamente. A diferença é que as vazões presentes no arquivo QSUBST.qsb declarado na Linha 11 irão substituir as vazões das minibacias declaradas na Linha 12. Outra diferença é que estes dois campos não são obrigatórios, podendo a Linha 11 ter a informação “0 QSUBST.qsb” e a Linha 12 ser em branco.

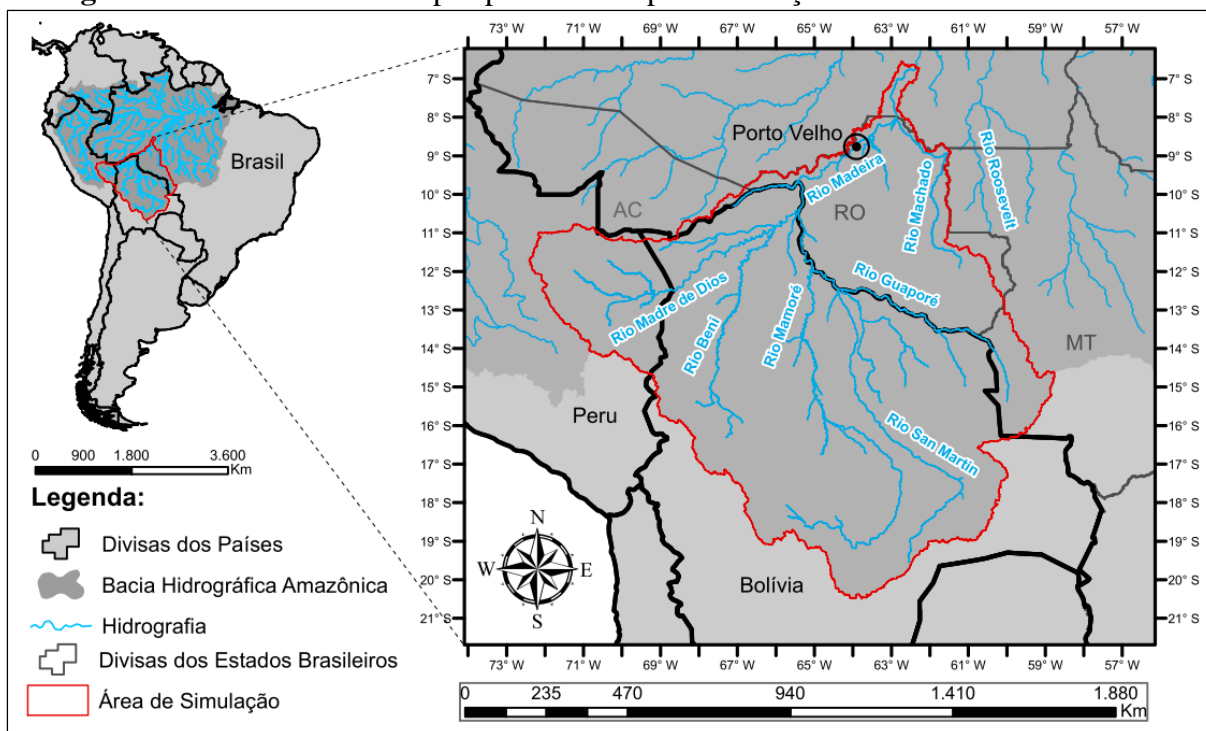
#### **4 PACOTE DE DADOS PARA O RIO MADEIRA**

O rio Madeira é o maior afluente do rio Amazonas, com cerca de 23% de sua área total de captação (SOUZA et al., 2020), tendo em sua região de transição entre os andes e planície a área com maior taxa de escoamento superficial da Bacia Hidrográfica Amazônica (ESPINOZA et al. 2020). Como um dos produtos deste manual, estão sendo disponibilizados os arquivos de entrada do modelo MGB, relacionados no Item 3, para a bacia hidrográfica do rio Madeira desde suas nascentes andinas até a confluência com o rio Machado, possibilitando sua aplicação em mais de 90% do estado de Rondônia, excetuando-se a região que drena para o rio Roosevelt, conforme mostra a Figura 11. Endereço eletrônico dos dados:

<https://drive.google.com/drive/folders/1PVSwtNom91oKnYgKjkSrc13vvk9yBv?usp=sharing>



**Figura 11** – Área com dados pré-processados para utilização do MGB no Rio Madeira



Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme descrito no Item 3, os arquivos deste pacote de dados devem ser copiados e colados diretamente no diretório “C:\mgb\Input”, devendo também ser criado um diretório em branco “C:\mgb\output” e serem utilizados os códigos em Visual Basic for Application (VBA) ou planilhas de calibração em Excel que estão apresentados nos itens 5 e 6 deste manual. Caso se deseje utilizar os arquivos de forma tradicional, através do plugin do MGB no software QGIS, descrito por Medeiros et al. (2019) e Alves et al. (2020), não é necessário utilizar o arquivo denominado de “infoMGB.sim”, descrito no item 3.8, porém é necessário utilizar o arquivo de extensão “.hrc”, também disponibilizado neste pacote de dados, com o nome “URH\_Extra.hrc”.

O referido pacote de dados é dividido em arquivos baseados em um MDE com resolução espacial de 90 metros e arquivos baseados em um MDE de 500 metros de resolução, onde, além dos dados de entrada do modelo MGB, são disponibilizados os arquivos GIS (shapefile) das minibacias e hidrografia baseados nas duas resoluções, já com a junção dos dados cadastrais de cada minibacia na tabela de atributos. Esses dados GIS permitem a identificação e integração espacial das minibacias com outros dados georreferenciados, como por exemplo, localização das estações fluviométricas, núcleos populacionais e divisas de sub-bacias de interesse para a



gestão de recursos hídricos. A seguir são descritas as metodologias e referências utilizadas para confecção dos arquivos.

#### **4.1 Unidades de Resposta Hidrológica**

Na determinação das Unidades de Resposta Hidrológica (URH's), foi utilizado o produto disponibilizado por Fan et al. (2015), onde foram combinados mapas de tipos e uso do solo para toda a América do Sul. Os tipos de solo foram obtidos para a região brasileira através de dados espaciais do Ministério do Meio Ambiente (MMA), na escala 1:1.000.000, e para o restante da América do Sul, mapas da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), na escala 1:5.000.000. Já a cobertura do solo foi obtida através de mapa com resolução espacial de 300m, elaborado pelo projeto GlobCover da Agência Espacial Européia (ESA), com dados levantados via satélite ao longo do ano de 2009.

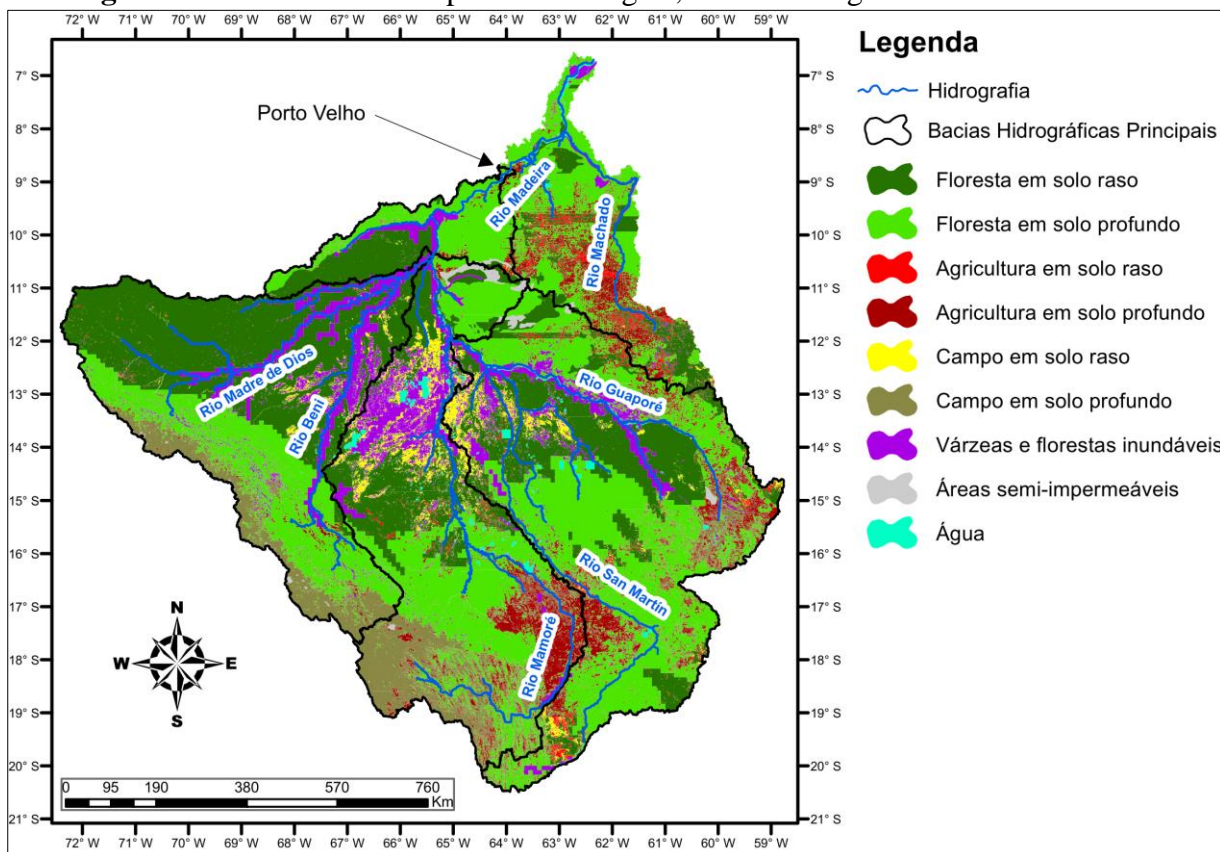
Quanto ao tipo de solo, os “latossolos”, “nitossolos”, “areias quartzarenicas”, “chernossolos”, “plintossolos”, “vertissolos”, “organossolos” e “argissolos” foram classificados como sendo de baixo potencial para geração de escoamento superficial (denominados como profundos). Os “neossolos”, “litossolos”, “luviossolos” e “cambiossolos” foram classificados como tendo elevado potencial de geração de escoamento superficial (denominados como rasos). Os “gleissolo”, “fluvissoilo”, “pantanossolo” e “espodossolos” foram classificados como solos de elevada saturação (denominados como várzea). Os afloramentos rochosos foram agrupados como áreas semi-impermeáveis (FAN et al. 2015).

Quanto à cobertura do solo, os usos foram simplificados e agrupados para aqueles que apresentam características hidrológicas semelhantes. Agricultura intensiva e pastagens foram classificadas como “agricultura”. Áreas urbanas foram classificadas como “semi-impermeáveis”. Formações abustivas, estepes e cerrado foram classificados como “campos”. Todos os tipos de floresta foram classificados como “floresta”. Manguezais, várzeas, igapós e florestas hidrófilas foram classificados como “várzeas e florestas inundáveis” (FAN et al. 2015).

A combinação da reclassificação feita por Fan et al. (2015), gerou um raster com resolução de 400 metros separando as seguintes classes: Florestas em solo raso, florestas em solo profundo,

agricultura em solo raso, agricultura em solo profundo, campo em solo raso, campo em solo profundo, várzeas e florestas inundáveis, áreas semi-impermeáveis e espelhos de água. A Figura 12 apresenta a distribuição das URH's na área contemplada pelo pacote de dados que trata o presente item.

**Figura 12 - Unidades de Resposta Hidrológica, Bacia Hidrográfica do Rio Madeira**



Fonte: Extraído do produto disponibilizado por Fan et al. (2015).

## 4.2 Minibacias

### 4.2.1 Resolução de 90 metros

Para obter as características fisiográficas da bacia e sua divisão em minibacias foi utilizada a sequência de processos do pacote IPH- Hydro Tools (ALVES et al., 2020; SIQUEIRA et al., 2016) e o MDE hidrológicamente condicionado HydroSHEDS (LEHNER et al., 2008) com resolução de 3 arcsec (aproximadamente 90 metros), bem como mapa de direção de fluxo com a mesma resolução (LEHNER et al., 2008).

Os dois mapas utilizados da base HydroSHEDS são derivados do MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), porém com tratamentos voltados para o uso hidrológico, como preenchimento de espaços vazios, filtragem de pixels, correções automáticas e manuais nos percursos dos rios e em áreas endorreicas (LEHNER et al., 2008).

Para a definição da rede de drenagem, adotou-se uma área de captação igual ou superior a 1.000 km<sup>2</sup> e divisão das sub-bacias a cada 15 km pelo critério de igual comprimento de rio, conforme sugerido por Siqueira et al. (2018) em trabalho que simulou todo o continente americano. Tendo sido obtidas 2550 minibacias para a área de estudo.

Os parâmetros que aproximam a seção transversal do rio a um formato retangular foram obtidos com base em Paiva et al. (2013), que estimou equações geomorfológicas que relacionam a área de drenagem do rio à sua largura e profundidade em relação ao nível d'água. Essas equações foram desenvolvidas para a região amazônica a partir de levantamentos de seções transversais de estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para o rio Madeira foram encontradas as relações descritas nas Equações 3 e 4. Ainda com base em Paiva et al. (2013), foi adotado o valor de 0,030 como o coeficiente de Manning para os rios da área de estudo.

$$B = 1,30 \cdot (A_d)^{0,46} \quad \text{Eq. 3}$$

$$H = 1,25 \cdot (A_d)^{0,20} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde B é a largura do rio em metros, H é a profundidade em metros e A<sub>d</sub> é a área de drenagem a montante da seção transversal em km<sup>2</sup>.

#### **4.2.2 Resolução de 500 metros**

Foi utilizado o produto intitulado de “*South America Simulated River Discharge Dataset*” fruto do trabalho de Siqueira et al. (2018), disponível no website do grupo de pesquisa HGE (Hidrologia de Grande Escala). Este produto disponibiliza uma base de dados de vazões simuladas para o continente da América do Sul no período de 01/01/1990 a 31/12/2009, como

também disponibiliza os arquivos *shapefiles* contendo as 33749 minibacias discretizadas para o continente.

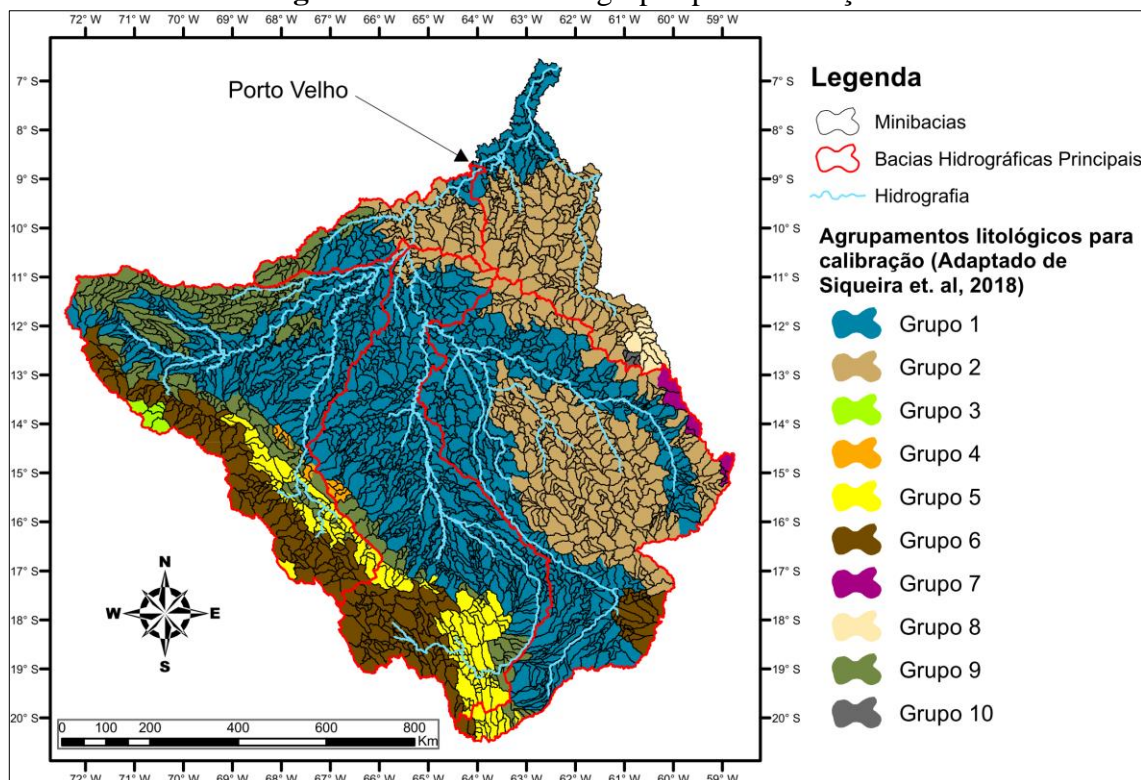
No trabalho de Siqueira et al. (2018) foram utilizados como base do processamento o MDE Bare-Earth (O'LOUGHLIN et al., 2016), baseado no produto SRTM, mas que estima a altitude com a remoção da vegetação, tendo sido feita uma remostragem de 3 para 15 arcsec (aproximadamente 500 metros). Também foi utilizado o mapa de direção de fluxo disponibilizado pelo HydroSHEDS (LEHNER et al., 2008) e o mapa de URH's descrito no item 4.1 (FAN et al., 2015).

As minibacias da área de interesse na região do rio Madeira foram separadas no software ArcGIS 10.7 e através de ferramentas e funções nativas do software Microsoft Excel 2016, onde foram separadas e sequenciadas 2361 minibacias. Os arquivos de entrada para execução do código fonte do MGB, descritos nos itens 3.1 e 3.2, foram gerados pelas planilhas descritas no item 5 deste manual.

#### **4.2.3 Divisão em grupos para calibração**

Nas duas bases de dados as minibacias foram reagrupadas conforme feito por Siqueira et al. (2018), que utilizou a litologia como critério para determinação das sub-bacias de calibração. Na região estudada as minibacias foram separadas em 10 grupos, conforme mostra a Figura 13.

**Figura 13 - Minibacias e grupos para calibração**



Fonte: Elaborado pelo autor

### **4.3 Precipitação**

Foram utilizados os dados do produto de reanálise climática global ERA 5 (HERSBACH et al., 2020), disponibilizado pelo European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) em uma grade de pontos com resolução de 30 km.

Os dados de precipitação no formato binário foram gerados através de interpolação pelo método de ponderação do inverso da distância ao quadrado para cada centroide das minibacias descritas no item 4.2. Foram calculadas chuvas em mm/dia para o período compreendido entre 01 de janeiro de 1981 e 31 de dezembro de 2020, equivalente a 14610 dias.

### **4.4 Vazões observadas**

Conforme descrito no item 3.6, para o adequado funcionamento do código fonte do MGB, é necessário a existência de pelo menos uma série de vazões observadas. Neste sentido, está sendo disponibilizado no pacote de dados a série de vazões diárias da estação de Porto Velho (Código

15400000), disponíveis no Hidroweb, plataforma digital de dados fluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA.

#### **4.5 Parâmetros climatológicos**

Foram utilizados parâmetros climatológicos da base de dados CRU (NEW et al., 2002), que compatibilizou informações de postos climatológicos de vários países, gerando uma grade de pontos com resolução de 10' (aproximadamente 18 km), em escala global, com valores de médias mensais.

Da base de dados CRU (NEW et al., 2002) foram utilizados as médias mensais de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), percentual de insolação por mês (%), velocidade do vento (m/s) e altitude (km). Para adequar os dados às unidades requeridas pelo MGB, para cada ponto da grade, a insolação foi transformada para a unidade de horas/dia, considerando-se o percentual encontrado para o mês aplicada a 24 horas, e foi utilizada a fórmula barométrica de Laplace (BERBERAN-SANTOS, 1997) para encontrar a pressão atmosférica (kPa) baseada na temperatura e altitude local.

#### **4.6 Parâmetros da superfície e do solo**

No caso do pacote de dados baseado no MDE de 90 metros, estão sendo disponibilizados os parâmetros encontrados por Siqueira et al. (2018), tanto para a cobertura do solo como para os parâmetros calibráveis, descritos nos itens 3.4 e 3.5, respectivamente.

No caso do pacote de dados baseado no MDE de 500 metros, estão sendo disponibilizados os parâmetros encontrados por Siqueira et al. (2018) para a superfície do solo, porém para os parâmetros calibráveis estão sendo disponibilizados os dados encontrados pela calibração manual mais bem sucedida efetuada em testes com arquivo (“pasta de trabalho”) descrito no item 6 deste manual.

## 5 FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS

Softwares baseados em planilhas eletrônicas revolucionaram o mercado de informática na década de 60, sendo amplamente utilizados até os dias atuais por profissionais que tenham no seu trabalho a necessidade de efetuar cálculos financeiros, estatísticos ou científicos (SILVA & SANTOS, 2015; OLIVEIRA, 2019).

O software Microsoft Excel está caracterizado como um dos mais importantes aplicativos para uso em microcomputadores, sendo o líder de mercado entre as planilhas eletrônicas desde os anos 90 até os dias atuais, onde em 2005 detinha de 80 a 90% do mercado deste tipo de software, tornando comum o seu uso por profissionais das áreas de engenharias e exatas, bem como tornando ferramentas desenvolvidas em Excel acessíveis à grande número de pessoas (SILVA & SANTOS, 2015; VALENTE, 2017; OLIVEIRA, 2019) e atrativas para utilização em trabalhos científicos de diversas áreas (MEYER, 2009; BROWN, 2014; STOLF, 2014; VALENTE, 2017; RATHOD, 2018).

As fórmulas, ferramentas de análise de dados, visualização instantânea de gráficos e conexões com dados externos permitem ao usuário do Microsoft Excel diversas possibilidades de utilização, porém limitadas às ferramentas e funções nativas do software. Análises de dados mais específicas e rotinas de automatização mais complexas exigem que o usuário recorra ao Visual Basic for Applications (VBA), a partir da onde se abre uma gama muito maior de possibilidades.

O Visual Basic (VB) é uma linguagem de programação orientada a objetos, desenvolvida pela Microsoft para criação de softwares no ambiente Windows. Já o Visual Basic for Applications (VBA) é uma linguagem de programação que usa como base as notações do VB, porém incorporada aos softwares do pacote Office, como Access, Excel, PowerPoint e Word, permitindo que sejam controladas e automatizadas por linha de comando todas as funcionalidades existentes nesses aplicativos, bem como automatizar fluxo de dados com outros softwares e plataformas.

Neste contexto, a seguir, serão descritas as funções, sub-rotinas e pastas de trabalho desenvolvidas em VBA, para manipulação de dados de entrada, calibração e resultados no Modelo de Grandes Bacias – MGB.

Importante ressaltar que o código fonte do MGB trabalho com o ponto (“.”) como o separador decimal e vírgula (“,”) como separador de agrupamento de dígitos, portanto esse padrão também foi adotado na confecção dos códigos em VBA. Para que as ferramentas apresentadas nesta seção e o MGB funcionem adequadamente é importante que as configurações de região sejam verificadas, ou alteradas, seguindo os seguintes passos:

- Painel de Controle → Região
- Formatos → Configurações adicionais...
- Símbolo decimal → .
- Símbolo de agrupamento de dígitos → ,

Ainda como conhecimento introdutório, o ambiente do VBA no Excel pode ser acessado pelo comando “Alt + F11”. Caso o usuário deseje utilizar algumas das funções ou sub-rotinas descritas neste manual, ele deve copiar o script e colar em um módulo, que pode ser inserido na aba “Inserir” → “Módulo”.

## **5.1 Funções**

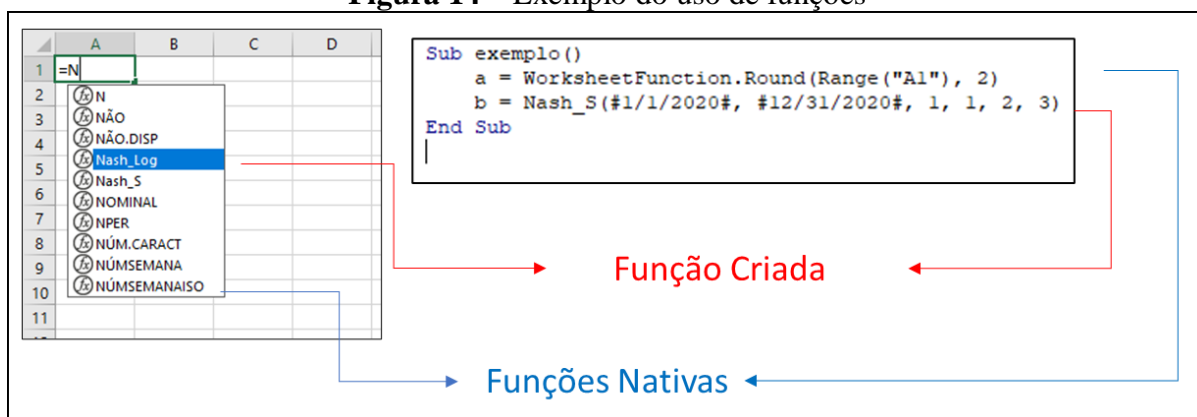
A seguir são descritas as funções desenvolvidas neste trabalho, assim denominadas por seus resultados poderem ser apresentados em uma única célula da planilha ou serem armazenados em uma única variável simples. Este tipo de código inicia com “Public Function” por ser uma função que pode ser utilizada por qualquer outro módulo dentro do projeto.

Abaixo segue o endereço eletrônico com o arquivo “.txt” que contém o código de todas as funções aqui relacionadas, bastando apenas o usuário copiar e colar para um módulo do ambiente VBA do Excel, esses códigos também estão disponíveis no Apêndice A deste manual:



Essas funções podem ser utilizadas na planilha de Excel da mesma forma que uma função nativa, conforme pode ser visualizado no exemplo da Figura 14, onde as funções descritas nos itens 5.1.1 e 5.1.2 aparecem juntamente com as demais. Caso se deseje utilizar essas funções na linha de comando, elas devem ser escritas dentro de uma sub-rotina, dentro de um módulo no ambiente VBA e de forma direta, diferentemente das funções nativas da planilha, que precisam ser precedidas por “WorksheetFunction”.

**Figura 14 – Exemplo do uso de funções**



### 5.1.1 Nash\_S

Esta função consiste no cálculo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Eq. 5), comumente utilizado para avaliar a habilidade preditiva de modelos hidrológicos, sendo mais efetivo na avaliação de ajustes para vazões da época de cheia (COLLISCHONN, 2001; GUILHON & ROCHA, 2007), tendo o seu valor máximo igual a 1. Quanto mais próximo de 1 melhor o ajuste do modelo.

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad \text{Eq.5}$$

Onde NS é o coeficiente de Nash-Sutcliffe,  $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada no tempo t e  $Q_{cal}(t)$  é a vazão calculada no tempo t.

O código aqui descrito necessita que a planilha de Excel tenha uma coluna com datas, outra com valores observados e outra com valores calculados, onde os valores calculados e observados podem estar em colunas separadas, mas devem estar na mesma linha de sua respectiva data. Neste código, o cálculo do Nash-Sutcliffe é feito apenas no período compreendido entre determinada data inicial e final, eliminando-se falhas de vazão e vazões iguais a “zero” que, por ventura, hajam no período selecionado.

É importante ressaltar que o método construtivo deste código só permite o cálculo do Nash-Sutcliffe para dados que estejam na mesma planilha (“Worksheet”), devendo a planilha com os dados ser “ativada” pelo código VBA antes de se iniciar a função ou, no uso tradicional do Excel, o resultado de uma planilha pode ir para a outra através do “=”, seguido da referência da célula.

São variáveis obrigatórias desta função em ordem sequencial:

1. Dt\_Inicial = Data inicial do período de Análise;
2. dt\_Final= Data final do período de Análise;
3. Primeira\_Linha\_Data = Número da primeira linha em que a série de datas está inserida;
4. Coluna\_Data = Número da coluna em que as datas estão inseridas (Ex.: Coluna A = 1, Coluna B = 2, Coluna C = 3....);
5. Coluna\_Vazao\_Obs = Número da coluna em que as vazões observadas estão inseridas;
6. Coluna\_Vazao\_Calc= Número da coluna em que as vazões calculadas estão inseridas.

A Figura 15 ilustra um exemplo de uso desta função, onde pode ser percebido que, apesar da série de dados preencher desde a linha 3 até a linha 20, o cálculo da função está limitado pelas datas indicadas nas células “H3” e “H4”, correspondente ao período de 20 a 30/12/2020, onde os valores observados, que estão na coluna “B”, são comparados com os valores simulados na

coluna “D”, com exceção do dia 23/12/2020, que teve os dados excluídos do cálculo devido à falha de vazão observada.

**Figura 15** – Exemplo de cálculo da função Nash\_S

	A	B	Simulações:			F	G	H
1	Data	Observado	Sim 1	Sim 2	Sim 3			
3	14/12/2020	12,448.0	9,933.3	9,819.1	9,418.7	Data Inicial	20/12/2020	
4	15/12/2020	14,089.3	10,520.5	10,388.6	9,961.0	Data Final	30/12/2020	
5	16/12/2020	14,136.3	11,000.1	10,851.8	10,398.3	Nash-Sutcliffe	0.157517	=Nash_S(H3;H4;3;1;2;4)
6	17/12/2020	13,416.2	11,379.3	11,194.5	10,714.7			
7	18/12/2020	12,714.6	11,698.5	11,463.1	10,953.4			
8	19/12/2020	12,781.7	11,989.4	11,705.2	11,175.3			
9	20/12/2020	12,714.6	12,305.7	11,977.6	11,424.5			
10	21/12/2020	12,547.6	12,673.9	12,308.1	11,707.6			
11	22/12/2020	11,988.1	13,079.5	12,687.5	12,027.6			
12	23/12/2020		13,455.5	13,050.0	12,336.7			
13	24/12/2020	11,473.0	13,735.9	13,327.9	12,551.5			
14	25/12/2020	11,654.2	13,896.9	13,493.7	12,647.3			
15	26/12/2020	12,162.3	14,011.7	13,605.8	12,680.5			
16	27/12/2020	14,586.8	14,025.2	13,611.1	12,594.3			
17	28/12/2020	15,905.2	14,071.8	13,643.0	12,510.8			
18	29/12/2020	16,357.1	14,115.1	13,660.3	12,398.3			
19	30/12/2020	16,661.9	14,183.3	13,698.1	12,298.8			
20	31/12/2020	16,155.5	14,359.0	13,832.1	12,309.2			
21								

### 5.1.2 Nash\_Log

Esta função consiste no cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões, comumente utilizado para avaliar a eficiência de modelos hidrológicos nos períodos de recessão e estiagem do hidrograma (COLLISCHONN, 2001; GUILHON & ROCHA, 2007), tendo o seu valor máximo e ideal igual a 1.

Este código é composto pelas mesmas variáveis de entrada, exigências e funcionalidades da função Nash\_S, descritas no item anterior (5.1.1), modificando-se apenas a equação aplicada, conforme pode ser visto na Equação 6.

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum (\log(Q_{\text{obs}}(t)) - \log(Q_{\text{cal}}(t)))^2}{\sum (\log(Q_{\text{obs}}(t)) - \overline{\log(Q_{\text{obs}}(t))})^2}$$

Eq.6

Onde  $NS_{\log}$  é o coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões,  $Q_{\text{obs}}(t)$  é a vazão observada no tempo  $t$  e  $Q_{\text{cal}}(t)$  é a vazão calculada no tempo  $t$ .

### 5.1.3 Correl\_P

Esta função calcula a correlação de Pearson ( $r$ ), descrita na equação 7. A diferença entre esta função e a função “CORREL”, nativa do Excel, é a sua capacidade de filtrar dados que estejam dentro de um período de datas, assim como as funções descritas nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

$$r = \frac{\sum [(Q_{\text{cal}} - \overline{Q_{\text{cal}}})(Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})]}{\sqrt{\sum (Q_{\text{cal}} - \overline{Q_{\text{cal}}})^2} \sqrt{\sum (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}}$$

Eq. 7

Onde  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson,  $Q_{\text{obs}}(t)$  é a vazão observada no tempo  $t$  e  $Q_{\text{cal}}(t)$  é a vazão calculada no tempo  $t$ .

O código aqui descrito necessita que a planilha de Excel tenha uma coluna com datas em ordem cronológica crescente e sem falhas, outra com valores observados e outra com valores calculados, onde os valores calculados e observados podem estar em colunas separadas, mas devem estar na mesma linha de sua respectiva data.

É importante ressaltar que o método construtivo deste código só permite o cálculo da correlação de Pearson para dados que estejam na mesma planilha. São variáveis obrigatórias desta função em ordem sequencial:

1. Dt\_Inicial = Data inicial do período de Análise;
2. dt\_Final = Data final do período de Análise;
3. Primeira\_Linha\_Data = Número da primeira linha em que a série de datas está inserida;

4. Coluna\_Data = Número da coluna em que as datas estão inseridas (Ex.: Coluna A = 1, Coluna B = 2, Coluna C = 3....);
5. Coluna\_Vazao\_Obs = Número da coluna em que as vazões observadas estão inseridas;
6. Coluna\_Vazao\_Calc= Número da coluna em que as vazões calculadas estão inseridas.

#### 5.1.4 dVPercet

Esta função consiste no cálculo da diferença percentual de volume entre vazões simuladas e observadas, onde quanto mais próximo de “zero” melhor o ajuste. Este código é composto pelas mesmas variáveis de entrada, exigências e aplicabilidades das funções descritas nos itens 5.1.1 e 5.1.2, modificando-se apenas a equação aplicada, conforme pode ser visto na Equação 8.

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cal}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum(Q_{obs}(t))} \times 100 \quad \text{Eq.8}$$

Onde  $\Delta V$  é o erro percentual de volume,  $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada no tempo  $t$  e  $Q_{cal}(t)$  é a vazão calculada no tempo  $t$ .

#### 5.1.5 Trans\_Cota\_Vaz

Esta função transforma dados de cota em vazão, baseada em curvas-chave no formato exponencial, conforme mostra a Equação 9.

$$Q = a (h - h_0)^n \quad \text{Eq.9}$$

Onde  $Q$  é a vazão calculada,  $h$  é a cota que será transformada em vazão,  $h_0$  é a cota do leito do rio somada à altura de rugosidade, “ $a$ ” é um coeficiente e “ $n$ ” é um expoente, em que ambos dependem do controle hidráulico, regime de referência e geometria da seção (LIRA et al. 2019).

O código aqui descrito necessita que a planilha de Excel tenha uma tabela que relacione o código da estação, validade inicial da curva-chave, validade final, cota mínima do tramo, cota máxima do tramo e Coeficientes a, h<sub>0</sub> e n, não necessariamente seguindo esta ordem de colunas, mas estando no mesmo alinhamento, conforme pode ser visto na Figura 16. É importante ressaltar que o método construtivo deste código só permite o cálculo de vazão para dados de curva-chave que estejam na mesma planilha da célula que apresentará o resultado.

**Figura 16 – Exemplo de cálculo da função Trans\_Cota\_Vaz**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	Código	Validade Inicial	Validade Final	Cota Mínima	Cota Máxima	CoefA	CoefN	CoefH0		Estação	Data	Cota	Vazão	
2	15200000	01/01/2015	14/03/2015	120	780	561.28670	1.40000	-1.29000						
3	15200000	01/01/2015	14/03/2015	780	927	2.01290	3.00000	-10.50000						
4	15200000	15/03/2015	13/08/2018	927	2000	188.51940	1.83000	-1.88000						
5	15200000	15/03/2015	13/08/2018	120	904	100.71580	2.01100	-3.67000		15200000	01/12/2016	700	11768.91	
6	15200000	14/08/2018	31/12/2021	904	1388	1.173.95040	1.30000	1.32000		15200000	01/12/2017	1000	17469.084	
7	15200000	14/08/2018	31/12/2021	1388	2000	13.41780	2.60000	-5.91000		15250000	01/12/2016	1400	32008.593	
8	15250000	01/01/2015	14/03/2015	120	2000	13.41780	2.60000	-5.91000		15250000	01/12/2017	1500	36358.152	
9	15250000	01/01/2015	14/03/2015	120	1331	142.52310	1.92600	-2.03000		15400000	01/12/2014	400	Curva não encontrada	
10	15250000	15/03/2015	13/08/2018	1331	2000	188.51940	1.83000	-1.88000		15400000	01/12/2017	400	5734.365	
11	15250000	15/03/2015	13/08/2018	120	2000	13.41780	2.60000	-5.91000		15400000	01/12/2021	1500	=Trans_Cota_Vaz(\$A\$2:\$A\$19;	
12	15250000	14/08/2018	31/12/2021	120	1727	188.51940	1.83000	-1.88000					\$B\$2:\$B\$19;\$C\$2:\$C\$19;\$D\$2:	
13	15250000	14/08/2018	31/12/2021	1727	2000	2.942.89680	1.30000	9.56000					\$D\$19;\$E\$2:\$E\$19;\$F\$2:\$F\$19;	
14	15400000	01/01/2015	14/03/2015	120	1727	188.51940	1.83000	-1.88000					\$H\$2:\$H\$19;\$G\$2:\$G\$19;I11;K11;	
15	15400000	01/01/2015	14/03/2015	1727	2000	2.942.89680	1.30000	9.56000					L11)	
16	15400000	15/03/2015	13/08/2018	120	1601	262.94030	1.70300	-2.11000						
17	15400000	15/03/2015	13/08/2018	1601	2000	1.449.34250	1.41500	6.23000						
18	15400000	14/08/2018	31/12/2021	120	1700	109.05080	1.96900	-3.70000						
19	15400000	14/08/2018	31/12/2021	1700	2000	1.455.39130	1.40700	5.99000						

São variáveis obrigatórias desta função em ordem sequencial:

1. Intervalo\_Codigo = Intervalo que contém os códigos das estações fluviométricas;
2. Inter\_Validade\_Inicial = Intervalo que contém as datas de validade inicial das respectivas curvas-chave;
3. Inter\_Validade\_Final = Intervalo que contém as datas de validade final;
4. Inter\_Cota\_Min = Intervalo que contém as cotas mínimas dos respectivos tramos das curvas-chave;
5. Inter\_Cota\_Max = Intervalo que contém as cotas máximas dos tramos;
6. Inter\_CoefA = Intervalo que contém os coeficientes “a” das equações;

7. Inter\_CoefH0 = Intervalo que contém os coeficientes “h<sub>0</sub>” das equações;
8. Inter\_CoefN = Intervalo que contém os coeficientes “n” das equações;
9. CelCodigo = Célula que contém o código da estação da cota de interesse;
10. CelData = Célula que contém a data de observação da cota;
11. CelCota = Célula que contém a cota do rio em cm.

### **5.1.6 Trans\_Vaz\_Cota**

Esta função realiza o caminho inverso da função anterior (item 5.1.5), transformando dados de vazão em cota. Possui as mesmas variáveis, estrutura e requisitos.

### **5.1.7 MaximoEmIntervalo**

Esta função verifica o valor máximo em uma série de dados de acordo com critérios de filtro na própria coluna do dado ou em colunas paralelas, sendo exigido a informação de limites máximos, mínimos e valor igual. Tem a mesma lógica de aplicação das funções nativas SOMASES e MÉDIASES. São variáveis obrigatórias desta função em ordem sequencial:

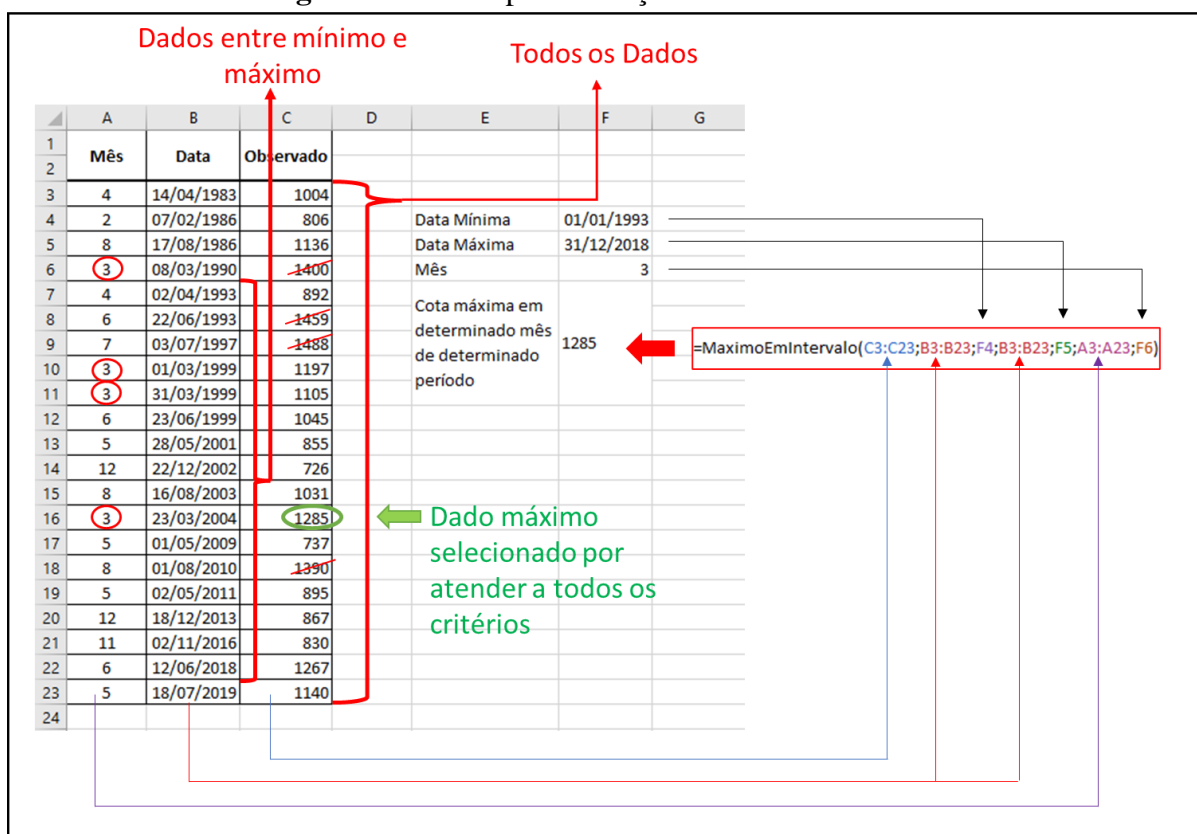
1. Intervalo\_Valores = Intervalo que contém números ou datas onde será procurado o maior valor;
2. Intervalo\_Maiorq = Intervalo que será filtrado, onde os valores devem ser maiores ou iguais ao presente na “Celula\_Maiorq”;
3. Celula\_Maiorq = Valor ou data mínimos do filtro;
4. Intervalo\_Menorq = Intervalo que será filtrado, onde os valores devem ser menores ou iguais ao presente na “Celula\_Menorq”;
5. Celula\_Menorq = Valor ou data máximos do filtro;

6. Intervado\_Igualq = Intervalo que será filtrado onde valores, datas ou textos devem ser iguais ao conteúdo da célula “Celula\_Igualq”;

7. Celula\_Igualq = Número, data ou texto que será filtrado.

A Figura 17 demonstra um exemplo de utilização da função MaximoEmIntervalo, onde os dados que serão filtrados estão no intervalo “C3:C23”, em que o maior valor encontrado é 1488 e o segundo maior é 1459, porém eles não atendem ao critério de igualdade, que diz que o intervalo “A3:A23” deve ser igual a 3. O terceiro maior valor, 1400, atende ao critério de igualdade, mas não atende ao critério de que na coluna B3:B23 as datas devem ser maiores ou iguais a 01/01/1993 e menores ou iguais a 31/12/2018. O quarto maior valor, 1390, também não atende ao critério de igualdade. Até que o quinto maior valor, 1285, atende a todos os critérios.

**Figura 17 – Exemplo da função MaximoEmIntervalo**





### **5.1.8 MaximoEmIntervalo\_2**

Esta função verifica o valor máximo em uma série de dados de acordo com critérios de filtro na própria coluna do dado ou em colunas paralelas, assim como a do item anterior, 5.1.7, porém não exige que haja um intervalo de células que seja igual a um valor procurado. Restando apenas as seguintes variáveis:

1. Intervalo\_Valores = Intervalo que contém números ou datas onde será procurado o maior valor;
2. Intervalo\_Maiorq = Intervalo que será filtrado, onde os valores devem ser maiores ou iguais ao presente na “Celula\_Maiorq”;
3. Celula\_Maiorq = Valor ou data mínimos do filtro;
4. Intervalo\_Menorq = Intervalo que será filtrado, onde os valores devem ser menores ou iguais ao presente na “Celula\_Menorq”;
5. Celula\_Menorq = Valor ou data máximos do filtro;

### **5.1.9 MinimoEmIntervalo\_2**

Esta função verifica o valor mínimo em uma série de dados de acordo com critérios de filtro na própria coluna do dado ou em colunas paralelas, tendo o mesmo funcionamento da função citada no item anterior, 5.1.8.

### **5.1.10 ProcvAle**

Esta função possui a mesma funcionalidade da função nativa do Excel “PROCV”, porém ela permite a pesquisa em qualquer direção e entre colunas juntas, separadas ou em outra planilha, fornecendo a opção de retornar o primeiro valor encontrado ou o último, na sequência de linhas de cima para baixo. São variáveis obrigatórias desta função em ordem sequencial:

1. Valor\_Procurado = Valor que deseja ser encontrado

2. Intervalo\_Valor\_Procurado = Intervalo de células onde está o valor que deva ser encontrado;
3. Intervalo\_Valor\_Desejado = Intervalo de células onde está o valor ou texto correspondente a linha em que o “Valor\_Procurado” venha a ser encontrado;
4. Primeiro\_ou\_Ultimo = 1 para primeiro valor correspondente e 2 para último valor correspondente.

### 5.1.11 ProcvSes

Esta função possui a mesma aplicabilidade da função nativa do Excel “PROCV”, porém procura os dados em qualquer direção e entre colunas juntas ou separadas. A diferença entre ela e a função descrita anteriormente “ProcvAle” (item 5.1.10) é que ela não permite a procura em planilhas diferentes, bem como as tabelas dos valores procurados e correspondentes devem ter a mesma linha inicial e final. Outra diferença é que ela adiciona filtros que limitam a procura a um intervalo maior e menor que determinado valor, bem como igual a outro, semelhante à função MaximoEmIntervalo, descrita no item 5.1.7.

São variáveis obrigatórias desta função em ordem sequencial:

1. Valor\_Procurado = Valor que deseja ser encontrado
2. Intervalo\_Valor\_Procurado = Intervalo de células onde está o valor que deva ser encontrado;
3. Intervalo\_Valor\_Desejado = Intervalo de células onde está o valor ou texto correspondente a linha em que o “Valor\_Procurado” venha a ser encontrado;
4. Celula\_Maiorq = Valor ou data mínimos do filtro aplicado no Intervalo\_Valor\_Procurado
5. Celula\_Menorq = Valor ou data máximo do filtro aplicado no Intervalo\_Valor\_Procurado

6. Intervalo\_Igualq = Intervalo que será filtrado onde valores, datas ou textos devem ser iguais ao conteúdo da célula “Celula\_Igualq”;
7. Celula\_Igualq = Número, data ou texto que será filtrado.
8. Primeiro\_ou\_Ultimo = 1 para primeiro valor correspondente e 2 para último valor correspondente.

## 5.2 Sub-Rotinas

A seguir são descritas as sub-rotinas desenvolvidas neste trabalho, assim separadas devido a seus resultados não conseguirem ser apresentados em uma única célula das planilhas do Excel, e por envolverem atividades mais complexas como armazenamento de dados em vetores e matrizes, bem como manipulação e geração de arquivos externos.

Essas sub-rotinas não estão atreladas a estruturas fixas de planilhas, portanto estão disponibilizadas no endereço eletrônico abaixo no formato “.txt”, bastando apenas o usuário copiar e colar seu conteúdo para um módulo do ambiente VBA do Excel, esses códigos também estão disponíveis no Apêndice B:

<https://drive.google.com/file/d/1QDBmMOcho1mhMjmKylWAjoh7NfkiRdWM/view?usp=sharing>

As sub-rotinas são inicializadas por outras sub-rotinas no ambiente VBA através do comando “Call”, conforme pode ser visualizado na Figura 18.

**Figura 18** – Exemplo do uso de uma sub-rotina

```
Sub Exemplo()  
    Call Inserir_dados(#1/1/2020#, #12/31/2020#, 1, 10)  
End Sub  
|
```

### 5.2.1 MGB\_Bin\_to\_Exel

Esta sub-rotina transforma arquivos binários de Imput e Output do Modelo de Grandes Bacias – MGB, a exemplo do arquivo “CHUVABIN.pbj” descrito no item 3.3, em dados que podem ser

lidos no Excel, onde cada linha corresponderá aos dias e cada coluna corresponderá às minibacias, de 1 até o número total existente na área de estudo.

Esses arquivos binários correspondem a dados de precipitação, vazão ou evapotranspiração para cada dia em cada minibacia. No diretório “C:\mgb\Output” podem ser encontrados alguns arquivos binários neste formato com informações importantes sobre o comportamento hidrológico da área de estudo em uma distribuição espacial e temporal. A Tabela 2 relaciona os arquivos binários que conseguem ser lidos com a sub-rotina MGB\_Bin\_to\_Excel.

**Tabela 2** – Exemplo de arquivos binários do MGB com dados para cada minibacia em cada dia do período simulado que podem ser lidos com a sub-rotina “MGB\_Bin\_to\_Excel”

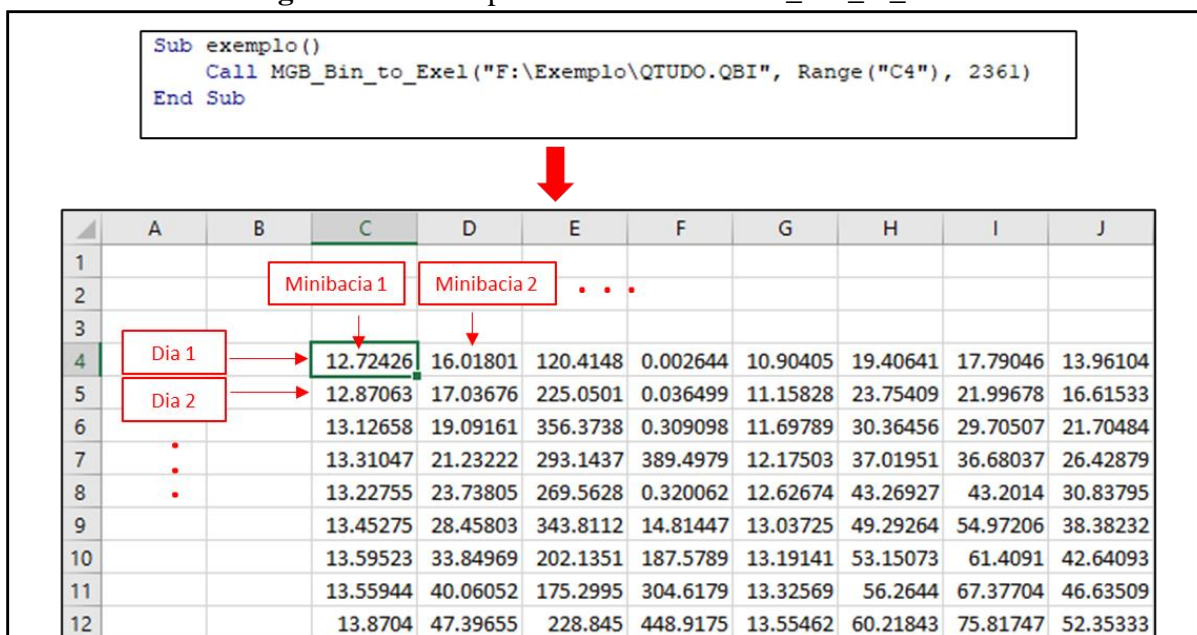
Nome	Local	Descrição
CHUVABIN.pbi	Input	Precipitação em mm
EVAPTUDO_bin.MGB	Output	Evapotranspiração em mm
HANDTUDO.MGB	Output	Altitude da lâmina d’água acima da calha
QBASTUDO_bin.MGB	Output	Vazão de base em m <sup>3</sup> /s
QITUDO_bin.MGB	Output	Vazão sub-superficial em m <sup>3</sup> /s
STUDO_bin.MGB	Output	Vazão superficial em m <sup>3</sup> /s
QTUDO.QBI	Output	Vazão total em m <sup>3</sup> /s
TWS2_bin.MGB	Output	Armazenamento de água terrestre em mm

São variáveis obrigatórias desta sub-rotina em ordem sequencial:

1. Nome\_Arquivo\_Bin = Caminho completo do arquivo que será lido. Informar entre aspas;
2. Celula\_inicial= Célula que receberá o primeiro dado. Utilizar Range ();
3. Numero\_De\_Bacias = Número total de minibacias. Número inteiro.

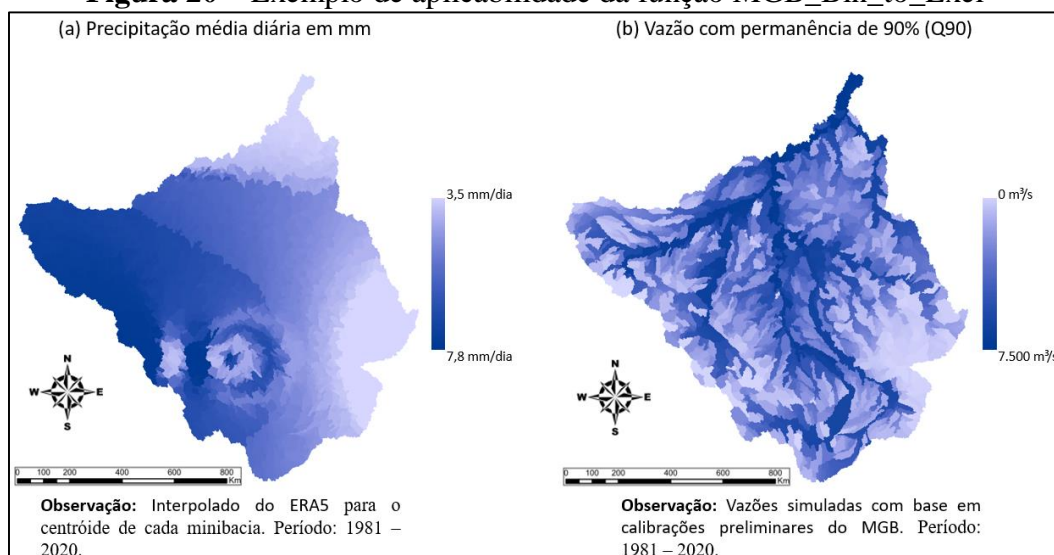
A Figura 19 ilustra um exemplo de utilização da sub-rotina para ler um arquivo de vazão total presente no diretório “F:\Exemplo\QTUDO.QBI”, com início de escrita dos dados na célula “C4” de uma planilha qualquer, em uma área de estudo com um total de 2361 minibacias.

**Figura 19** – Exemplo da sub-rotina MGB\_Bin\_to\_Exel



A Figura 20 ilustra um exemplo de utilização desta sub-rotina, onde após a extração dos dados dos arquivos CHUVABIN.pbi e QTUDO.QBI, obtidos com o pacote de dados para o rio Madeira descrito no item 4, foram calculadas por funções nativas do Excel as chuvas médias diárias e vazões com permanência de 90% para cada minibacia. Informações que, por exemplo, podem ser úteis para a concessão de outorgas de captação superficial.

**Figura 20** – Exemplo de aplicabilidade da função MGB\_Bin\_to\_Exel



Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.2.2 Trans\_Vazao\_Bin

Dependendo da quantidade de dias no período simulado, do tamanho da área de estudo e da capacidade de processamento do computador, a sub-rotina “MGB\_Bin\_to\_Exel” (item 5.2.1) pode ser bastante demorada. Tomando como exemplo o pacote dados para a bacia hidrográfica do rio Madeira, descrito no item 4, que contém 14610 dias simulados e 2361 minibacias na base de dados do MDE de 500 metros, a transformação de todos os dados binários ultrapassa 30 minutos de processamento.

Comumente os dados de vazão simulada são necessários apenas para algumas minibacias específicas da área de estudo. Neste contexto a sub-rotina Trans\_Vazao\_Bin executa o mesmo papel da MGB\_Bin\_to\_Exel, porém de forma mais rápida, permitindo a escolha de uma até dez minibacias que terão os dados binários extraídos para a planilha de Excel, no mesmo formato da Figura 19, porém com os dados das colunas correspondentes a sequência das minibacias listadas. Esta função também pode ser utilizada em todos os arquivos listados na Tabela 2.

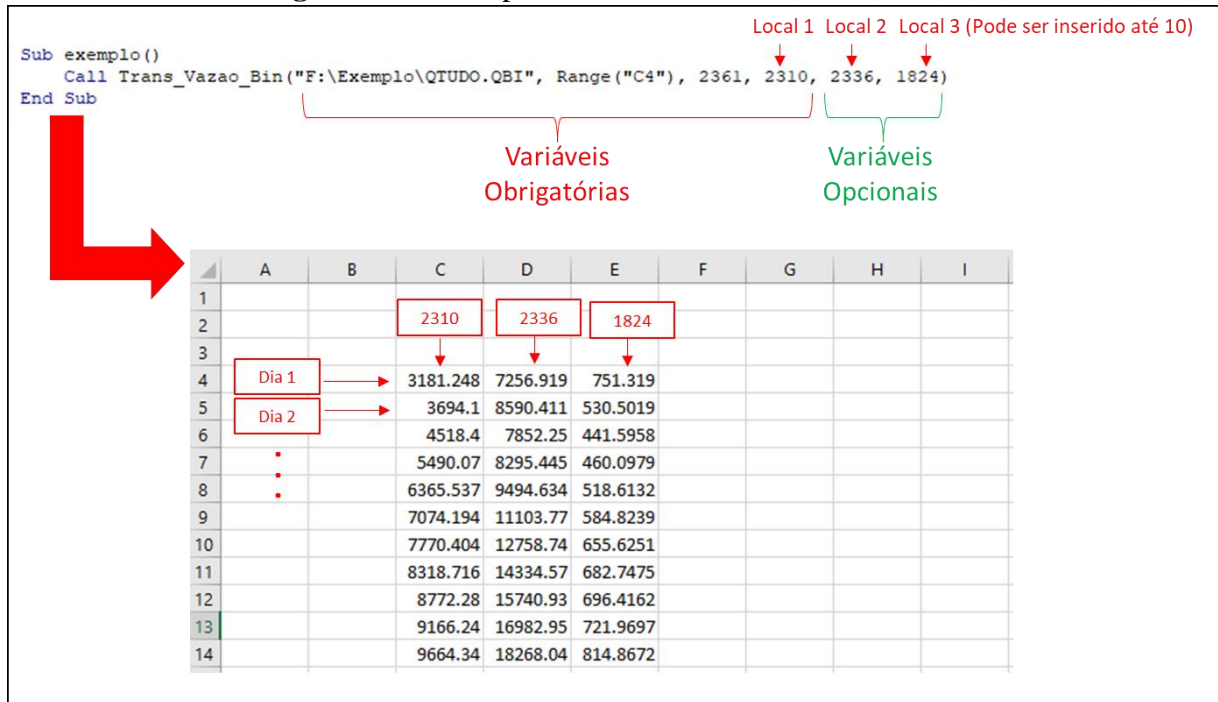
São variáveis obrigatórias desta sub-rotina em ordem sequencial:

1. Nome\_Arquivo\_Bin = Caminho completo do arquivo que será lido. Informar entre aspas;
2. Celula\_inicial= Célula que receberá o primeiro dado. Utilizar Range ();
3. Numero\_De\_Bacias = Número total de minibacias. Número inteiro;
4. Mini\_n1 = Número da minibacia que se deseja obter os valores simulados.

Após as variáveis obrigatórias podem ser inseridos mais 9 números de minibacias.

A Figura 21 ilustra um exemplo de utilização desta sub-rotina para extrair as vazões simuladas para as minibacias onde estão localizadas as estações fluviométricas das cidades de Guajará-Mirim (minibacia 2310), Porto Velho (minibacia 2336) e Ji-Paraná (minibacia 1824), de acordo com o pacote de dados baseado em 500 metros, descrito no item 4.

**Figura 21 – Exemplo da sub-rotina Trans\_Vazao\_Bin**



### 5.2.3 Exel\_to\_MGB\_pbi

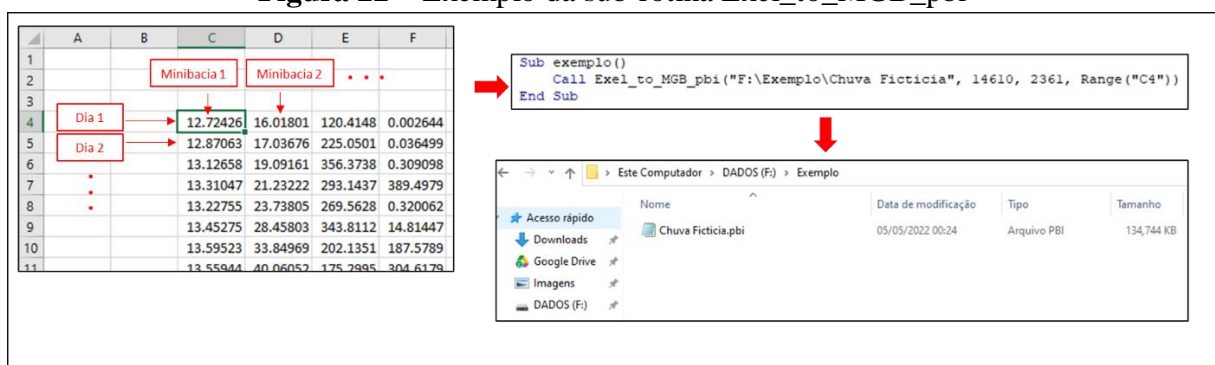
Esta sub-rotina faz o caminho inverso da “MGB\_Bin\_to\_Exel”, descrita no item 5.2.1. A partir de uma planilha que contenha uma matriz de dados em que as colunas representem as ninibacias e as linhas representem os dias de simulação, esta sub-rotina gera um arquivo compatível com qualquer um dos arquivos listados na Tabela 2. Como a aplicação mais óbvia é a modificação e geração de arquivos de entrada no modelo, por padrão esta sub-rotina gera arquivos com extensão de precipitação “.pbi”, porém a extensão pode ser renomeada manualmente caso tenha-se o desejo de modificar arquivos da pasta output.

Esta sub-rotina permite a entrada de precipitações de diferentes fontes de dados no MGB, sejam elas de modelos de estimativa por satélite ou de estações pluviométricas, após o usuário certificar-se de estar inserindo precipitações interpoladas para os centroides das minibacias (coordenadas presentes no arquivo descrito no item 3.1). Outra funcionalidade desta sub-rotina é facilitar a simulação com chuvas fictícias para verificar desdobramentos na vazão de exutórios.

A Figura 22 ilustra um exemplo de utilização desta sub-rotina. São variáveis obrigatórias desta sub-rotina em ordem sequencial:

1. Nome\_Bin\_Export = Caminho completo e nome do arquivo que será gerado;
2. Num\_De\_Dias = Número de dias simulados (Ex: 01/01/2020 a 10/01/2020 = 11 dias). Normalmente equivalente ao número de linha da matriz na planilha do Excel. Também podendo ser correspondente a parte dos dados, no entanto o usuário deverá adequar a Celula\_inicial dos dados;
3. Numero\_De\_Bacias = Número total de minibacias;
4. Celula\_inicial = Célula do primeiro dado que será transformado em binário, normalmente correspondente ao primeiro dia de simulação da minibacia 1.

**Figura 22 – Exemplo da sub-rotina Exel\_to\_MGB\_pbi**



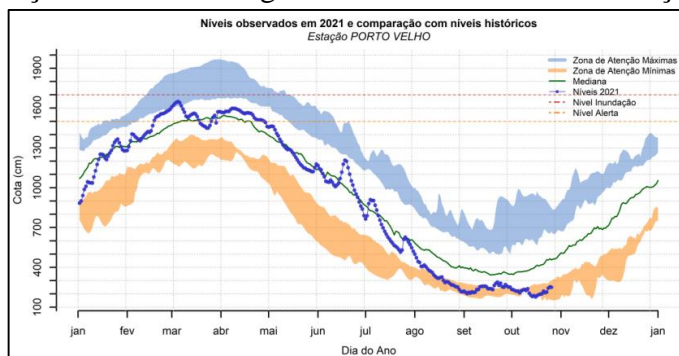
## 5.2.4 Gerar Permanencia

Esta sub-rotina importa arquivos binários do MGB, dentre os listados na Tabela 2, calcula os valores de permanência para cada dia do ano em cada minibacia e gera um novo arquivo no formato binário com os dados calculados, onde cada dia do ano para cada minibacia possui um valor específicos, sendo esses valores repetidos todos os anos. Por padrão esta sub-rotina gera arquivos com extensão de precipitação “.pbi”, porém a extensão pode ser renomeada manualmente.



Esta sub-rotina pode ser útil, por exemplo, para simular o comportamento da bacia hidrográfica com a ocorrência da mediana das chuvas ou, em parceria com as sub-rotinas 5.2.1 ou 5.2.2, extrair a linha de permanência para uma localidade que não tenha uma estação fluviométrica, a exemplo da visualização dos dados comumente utilizada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM para avaliação na magnitude de cheias anuais, ilustrado na Figura 23.

**Figura 23** – Variação sazonal e cotograma da cheia de 2021 na estação de Porto Velho

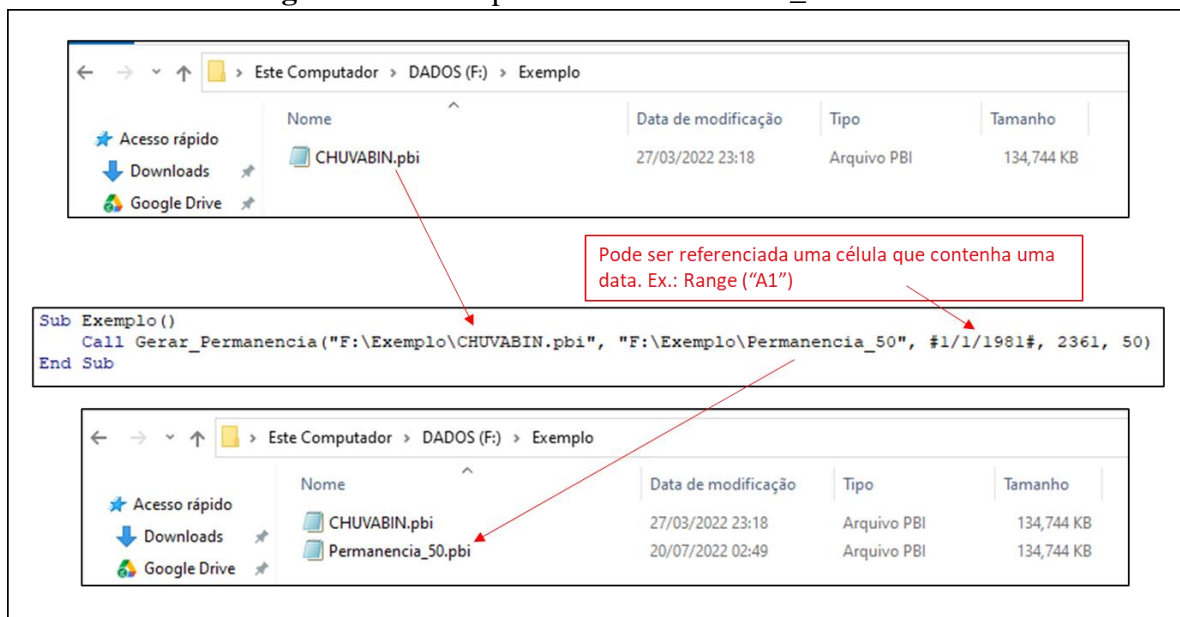


Fonte: SANTOS et al., 2021

A Figura 24 ilustra um exemplo de utilização desta sub-rotina. São variáveis obrigatórias desta sub-rotina em ordem sequencial:

1. Nome\_Bin\_Import = Caminho e nome do arquivo original;
2. Nome\_Bim\_Export = Caminho e nome do arquivo após cálculo de permanência;
3. data\_inicial= Data inicial da série de dados;
4. Numero\_De\_Bacias= Número de minibacias da área de estudo;
5. Permanencia = Permanência desejada em porcentagem (intervalo entre 1 e 100).

**Figura 24** – Exemplo da sub-rotina Gerar\_Permanencia

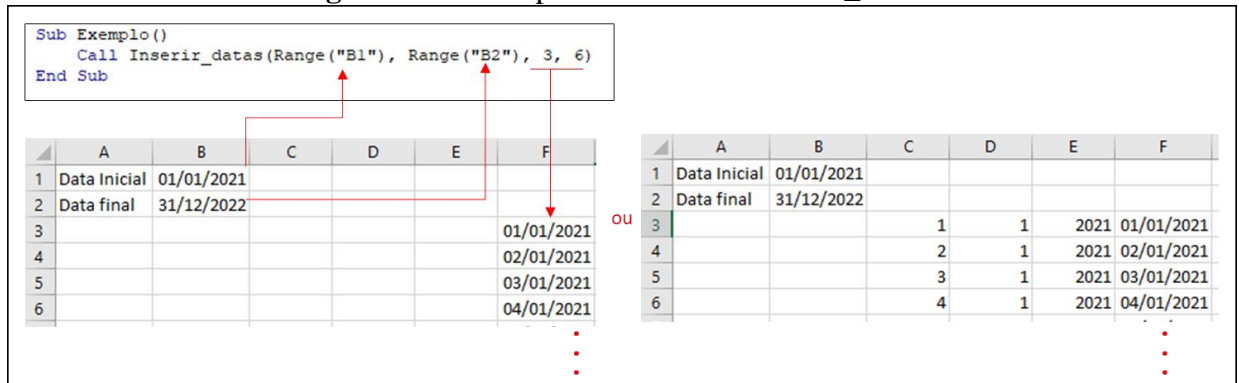


Dependendo da quantidade de dias no período simulado, do tamanho da área de estudo e da capacidade de processamento do computador, esta sub-rotina pode ser bastante demorada. Em sua primeira versão ela foi escrita utilizando apenas vetores e matrizes internas ao código VBA, porém o seu cálculo em uma bacia hidrográfica grande, a exemplo do rio Madeira, demorava dias. Portanto, modificou-se o método construtivo da sub-rotina para que fosse possível utilizar o processamento multi-threaded do Excel, algo que permitiu a utilização de 100% da capacidade de processamento do computador e reduziu o tempo de processamento para horas, porém inviabilizando a máquina ou tornando muito lenta a execução de outras atividades. Desta forma, é recomendável a utilização desta sub-rotina em um período que não se tenha a necessidade de utilizar o computador em outras tarefas.

### 5.2.5 Inserir\_datas

Esta sub-rotina insere uma série de datas em uma coluna indicada pelo usuário, contidas em um período. Também é possível, removendo a indicação de comentário no código (aspas simples), inserir em colunas separadas os respectivos dias, meses e anos de cada data, que aparecerão nas três colunas que antecedem a coluna indicada pelo usuário, conforme ilustra a Figura 25.

**Figura 25 – Exemplo da sub-rotina Inserir\_datas**



São variáveis obrigatórias desta sub-rotina em ordem sequencial:

1. Dt\_Inicial = Data inicial do período;
2. dt\_Final= Data final do período;
3. Primeira\_Linha\_Data = Número da linha que aparecerá a primeira data da sequência;
4. Coluna\_Data = Número da coluna que aparecerá a sequência de datas.

### 5.2.6 anos\_serie\_data

Esta sub-rotina lista os anos contidos entre uma data inicial e final. São variáveis obrigatórias desta sub-rotina em ordem sequencial:

1. Dt\_Inicial = Data inicial do período;
2. dt\_Final= Data final do período;
3. Primeira\_celula= Célula onde começará a lista de anos. Exemplo: Range (“B3”).

### 5.2.7 Executar o MGB pelo Excel

Este item não se trata de um código criado neste trabalho, mas sim uma indicação de como executar o código fonte do MGB pelo Excel. As versões 4.5 e 4.6 do MGB, instaladas no

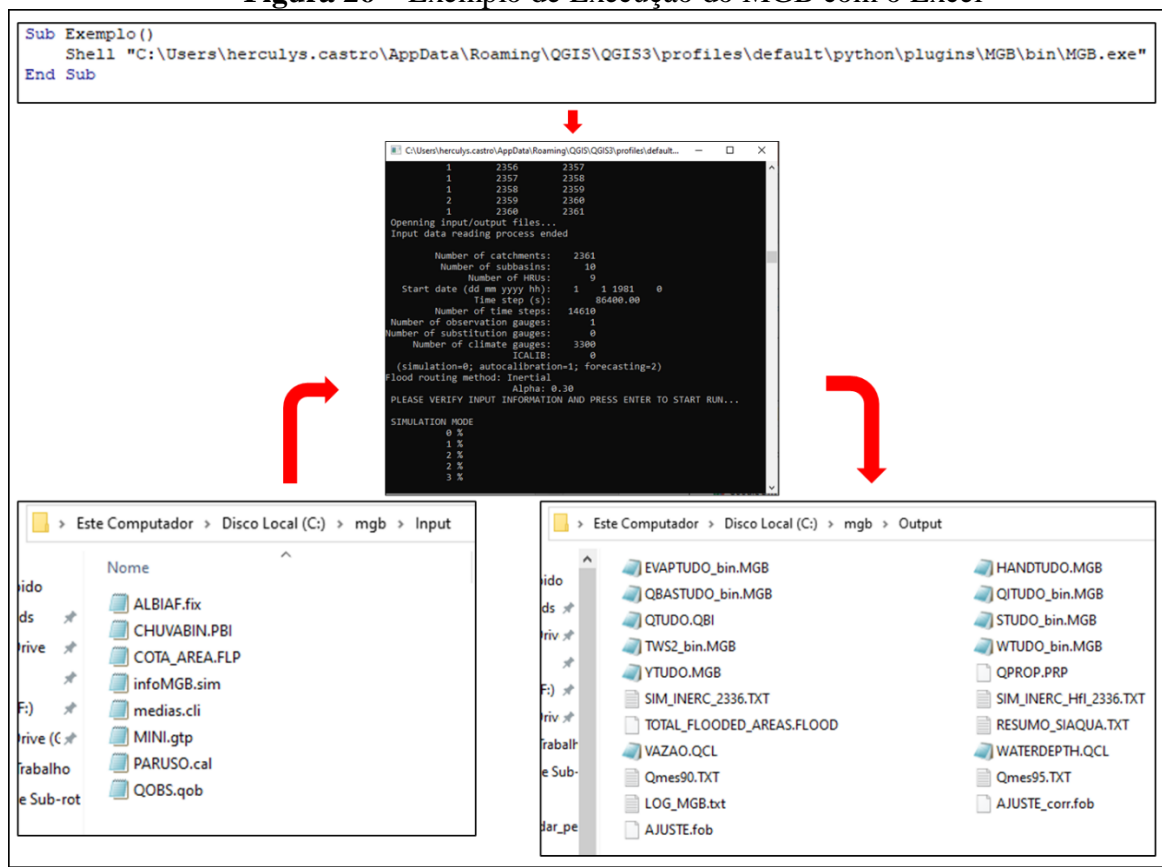
computador, respectivamente, como plugins do QGIS 3.4.14 (Madeira) e 3.16.6 (Hannover), possuem o seguinte caminho do programa executável:

C:\Users\**Nome\_do\_Usuário**\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\MGB\bin\MGB.exe

Há várias maneiras de executar o MGB, por exemplo copiando e colando o endereço acima no explorador de arquivos ou copiando e colando apenas o diretório acima e depois clicando no arquivo “MGB.exe”. No Excel, para inicializar arquivos “.exe” o VBA utiliza o comando “Shell”, conforme pode ser visualizado na Figura 26.

Vale ressaltar que os arquivos descritos no item 3 e exemplificados no item 4 devem estar presentes no diretório “C:\mgb\Input”, bem como deve existir um diretório “C:\mgb\Output”. Outro aspecto importante é instalar o plugin do MGB no QGIS, conforme descrito no item 6 deste manual, e também por Alves et al. (2020).

**Figura 26** – Exemplo de Execução do MGB com o Excel



### **5.3 Pastas de Trabalho**

A seguir são descritos os arquivos do Excel, denominados de Pasta de Trabalho, que contém planilhas (popularmente conhecidas como abas), que auxiliam na criação e manipulação de dados de entrada do MGB.

Assim como as funções e sub-rotinas descritas nos itens anteriores (5.1 e 5.2), essas pastas de trabalho também utilizam sub-rotinas em VBA na execução de suas tarefas, porém os códigos são atrelados às estruturas das planilhas e, portanto, caso o código seja copiado e colado em outra pasta de trabalho com planilhas e/ou estruturas diferentes, certamente ensejará erros.

Vale ressaltar que é livre a criação de novas abas de interesse do usuário, no entanto, não se deve alterar o nome ou excluir as abas originais. É livre a alteração do nome do arquivo, porém deve-se manter a extensão “.xlsm”, correspondente à Pasta de Trabalho do Excel Habilitada para Macros”. No primeiro uso do arquivo é necessário clicar em “Habilitar Edição” e “Habilitar Conteúdo”, pois as macros são desabilitadas por padrão do Windows.

Os arquivos que trata esta seção estão disponíveis no seguinte endereço eletrônico:

<https://drive.google.com/drive/folders/1PRigiCJXagxlGuDelCqyDrRhVc1OAnXr?usp=sharing>

#### **5.3.1 Transforma\_MINI**

Este arquivo tem por função transformar a planilha do Excel em um arquivo de entrada do MGB tipo “MINI.gtp”, descrito no item 3.1 e ilustrado na Figura 3. É importante reservar a primeira linha da planilha para o cabeçalho, não alterando os nomes originais da primeira linha, e preencher as colunas com a sequência correta dos dados. É possível usar um arquivo “.gtp” já existente, basta copiar do Bloco de Notas o conteúdo do arquivo e colar em uma nova aba, utilizar a ferramenta “Dados → Texto para Coluna” e separar por espaços.

Após serem feitas as alterações desejadas, deve-se copiar os dados para a aba “Dados\_Colunas” e então clicar no botão “Transformar”. Após esta operação aparecerá uma janela perguntando se o usuário deseja salvar as alterações do arquivo corrente ou se o interesse é apenas pelo

arquivo que será gerado, logo após aparecerá outra janela perguntando se a planilha está com o nome correto e se o cabeçalho inicia na célula “A1”. Após clicar em “Sim”, a planilha gerará o arquivo no formato “.gtp” com o nome atribuído pelo usuário. A Figura 27 ilustra o passo-a-passo descrito.

**Figura 27 – Exemplo de utilização do arquivo “Transforma\_MINI.xlsm”**

The image displays a large Excel spreadsheet with columns labeled A through Z. A red circle highlights the 'Transformar' button in the top right corner. Below the spreadsheet, three dialog boxes are shown: a 'Salvar' dialog box asking to save changes, a 'Prossiguir' dialog box asking to confirm conversion to \*.TXT, and a file explorer window showing the output files.

Dentre outras possibilidades, seguem alguns exemplos de situações em que esta planilha é útil, sempre com o auxílio de softwares como o ArcGIS ou QGIS, e de funções e ferramentas nativas do Excel:

- Modificar o agrupamento de minibacias para fins de calibração, bastando alterar os números presentes na coluna “Sub”;
- Extrair uma sub-bacia hidrográfica de dentro da área de estudo. Por exemplo, extrair a bacia do rio Machado da bacia do rio Madeira. Após este procedimento de extração as

linhas do arquivo devem ser ordenadas de forma crescente pela coluna “Mini”, a qual deve ser renumerada com início no número 1. Deve ser verificado qual o novo número da minibacia a jusante na coluna “MiniJus” (que receberá a vazão propagada) e deve-se atribuir o valor de “-1” para a coluna “MiniJus” do novo exutório;

- Unir trechos de sub-bacias extraídos com base em MDE’s diferentes. Por exemplo, utilizar os dados do arquivo gerado pelo MDE de 500 metros de resolução (4.2.2) para a sub-bacia do rio Guaporé e utilizar o MDE de 90 metros de resolução (4.2.1) para o restante da bacia hidrográfica do rio Madeira. Para o sucesso deste procedimento é necessário reordenar o número das minibacias (coluna “Mini”) de acordo com a ordem crescente da área de drenagem a montante (coluna “Area\_M”) e compatibilizar o número da minibacia a jusante (coluna “MiniJus”);
- Simular cenários de disponibilidade hídrica através de mudança no uso do solo. Partindo-se do princípio que o modelo esteja bem calibrado, pode-se alterar as proporções das Unidades de Resposta Hidrológica (URH’s) dentro das minibacias (Colunas “BLC\_01” à “BLC\_09”). Por exemplo, transformar determinada região atualmente identificada como “Floresta em Solo Profundo” (Figura 12) em uma região com “Agricultura em Solo Profundo” e verificar o efeito dessa alteração no hidrograma.

### **5.3.2 Transforma\_COTA\_AREA\_FLP**

Este arquivo tem por função transformar a planilha do Excel em um arquivo de entrada do MGB tipo “Cota\_area.flp” (item 3.2). Sempre que o arquivo Mini.gtp (descrito no item 3.1) tiver o número de referência de qualquer minibacia alterado, ele deve ser compatibilizado com o arquivo Cota\_area.flp, que usa o número da minibacia como referência em sua primeira coluna. Portanto, dependendo da modificação, a pasta de trabalho “Transforma\_COTA\_AREA\_FLP.xlsm” deve ser utilizada em conjunto com a “Transforma\_MINI.xlsm”, descrita no item anterior (5.3.1).

É importante não alterar os nomes originais da primeira linha e preencher as colunas com a sequência correta dos dados. É possível usar um arquivo “.flp” já existente, basta copiar do



Bloco de Notas o conteúdo do arquivo e colar em uma nova aba, utilizar a ferramenta “Dados → Texto para Coluna” e separar por espaços.

Após serem feitas as alterações desejadas, deve-se copiar os dados para a aba “Dados\_Colunas” e então clicar no botão “Gerar .flp”. Após esta operação aparecerá uma janela perguntando se o usuário deseja salvar as alterações do arquivo corrente ou se o interesse é apenas pelo arquivo que será gerado, logo após aparecerá outra janela perguntando se a planilha está com o nome correto e se o cabeçalho inicia na célula “A1”. Após clicar em “Sim”, a planilha gerará o arquivo no formato “.flp” com o nome atribuído pelo usuário.

### 5.3.3 Transforma\_Solo

Conforme mostra a Figura 28, este arquivo tem por função transformar a planilha do Excel em um arquivo de entrada do MGB tipo “Paruso.cal”, descrito no item 3.5. Assim como as planilhas anteriores, também é possível a importação dos dados do Bloco de Notas.

**Figura 28 – Visão geral do arquivo “Transforma\_Solo.xlsm”**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Watershed		1										
2	use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc					
3	FlorRas	80.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
4	FlorProf	350.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
5	AgriRas	80.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
6	AgriProf	150.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
7	CampRas	80.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
8	CampProf	150.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
9	Varzea	100.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
10	ASI	100.0	0.08	0.80	35.00	0.40	0.00	0.10					
11	Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
12	CS	20.00											
13	CI	50.00											
14	CB	3000.00											
15	QB_M3/SKM2	0.0100											
16	Watershed		2										
17	use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc					
18	FlorRas	900.0	0.10	0.20	2.00	0.67	0.00	0.10					
19	FlorProf	1300.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
20	AgriRas	450.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
21	AgriProf	700.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
22	CampRas	450.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
23	CampProf	700.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
24	Varzea	450.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
25	ASI	100.0	0.10	0.20	2.00	0.20	0.00	0.10					
26	Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
27	CS	30.00											
28	CI	120.00											
29	CB	800.00											
30	QB_M3/SKM2	0.0100											



O arquivo é composto por uma planilha com a mesma estrutura do arquivo “Paruso.cal”, sendo possível adicionar ou excluir grupos de calibração, em congruência com a quantidade existente na coluna “Sub” do arquivo “Mini.gtp”. Para fazer este procedimento é só copiar a estrutura existente no intervalo compreendido entre as células “A1” e “H15” e alterar o número da coluna “B” que segue a palavra “Watershed”.

Diferentemente das planilhas mostradas anteriormente, esta pode ter o nome da aba alterado para algum outro de preferência do usuário, sendo este o nome final que será adotado pelo arquivo “.cal”. A planilha pode ser duplicada quantas vezes for necessário e, também diferentemente das planilhas anteriores, ao clicar em “Salvar” não aparecerá nenhuma janela de aviso, apenas de escolha da pasta, pois o método construtivo desta planilha foi aprimorado para que não se perca as modificações feitas no arquivo “.xslm” ao se gerar um “.txt”.

Caso não se opte por utilizar o arquivo de calibração do MGB, descrito a seguir no item 6, esta planilha agiliza o processo de calibração manual dos parâmetros do solo no procedimento tradicional do QGis, descrito por Alves et al. (2020).

## **6 PASTA DE TRABALHO DE CALIBRAÇÃO DO MGB**

Esta pasta de trabalho foi destacada do item 5 por ser o cerne deste manual. Este arquivo é resultado de todo o conteúdo gerado nos itens anteriores, adicionado de outras sub-rotinas em VBA na execução de suas tarefas, atrelados às estruturas fixas das planilhas (abas).

O objetivo geral do desenvolvimento desta pasta de trabalho é apresentar para o usuário do MGB uma ferramenta alternativa ao plugin do QGis para calibração manual do modelo, focada na apresentação de resultados voltada para a avaliação de desempenho no período de cheias.

Os objetivos específicos são: agilizar o processo de calibração manual, dispensar utilização de shapes no processo de calibração, possibilitar de maneira rápida o mapeamento de diferentes períodos de simulação e diferentes eficiências, possibilitar a separação do período de “aquecimento” das condições hidrológicas da bacia do período de avaliação da eficiência, possibilitar o backup automático de parâmetros do solo e vazões simuladas de inúmeras rodadas de simulação (inclusive com apresentação no mesmo gráfico), possibilitar que o usuário aplique

uma lógica de calibração em diversos arquivos de parâmetros do solo de forma sequencial, possibilitar a simulação sequencial de várias configurações de solo, possibilitar a flexibilização e utilização de funções e ferramentas do Excel para aprimorar a avaliação das simulações de acordo com o objetivo de cada usuário.

O arquivo que trata esta seção está disponível no seguinte endereço eletrônico:

- Arquivo em branco:

<https://drive.google.com/drive/folders/1PRigiCJXagxlGuDelCqyDrRhVc1OAnXr?usp=sharing>

- Exemplo de uso:

<https://drive.google.com/drive/folders/1QMEFT6mDHkm9odbxPVD97GGiJEK7fKn6?usp=sharing>

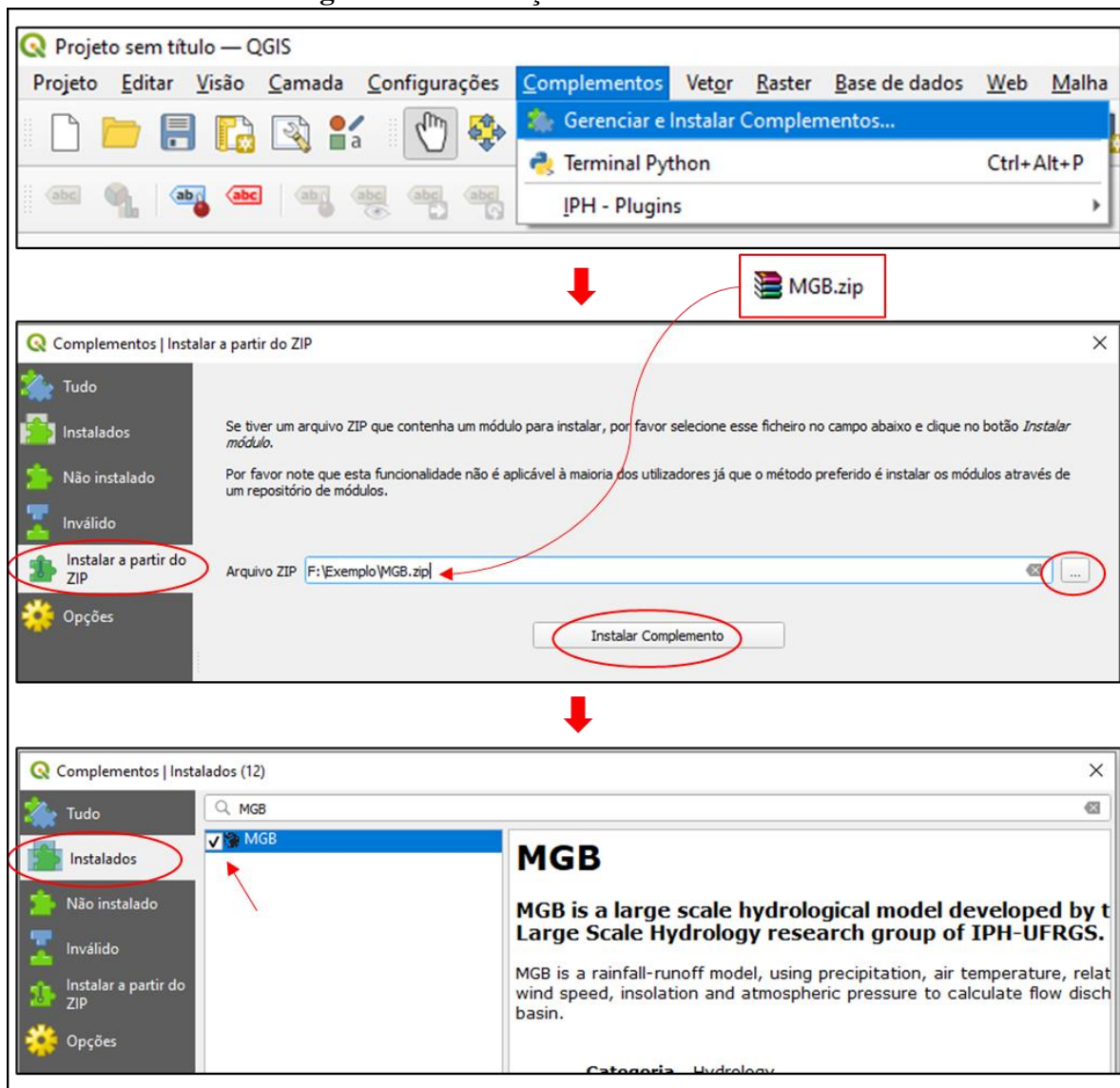
Conforme mencionado anteriormente, para o correto funcionamento das planilhas é importante que as configurações de região sejam verificadas, onde o símbolo de decimal deve ser o ponto (“.”) e o símbolo de agrupamento de dígitos deve ser a vírgula (“,”). Vale ressaltar que os arquivos descritos no item 3 e exemplificados no item 4 devem estar presentes no diretório “C:\mgb\Input”, bem como deve existir um diretório “C:\mgb\Output”. Outro aspecto importante é instalar o plugin do MGB no QGIS, conforme indicado abaixo:

- Fazer o download do plugin do MGB no site do grupo de pesquisa “Hidrologia de Grande Escala” (HGE/IPH/UFRGS): <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/>. Atualmente os links diretos são:

- Versão 4.5, utilizada no QGIS 3.4.14 (Madeira), endereço eletrônico: <https://mega.nz/file/I9s0RZDC#c2BDG8Jx34LoYeN6HL5etoicuSuLxVLg792tr7rtQx8>
- Versão 4.6, utilizada no QGIS 3.16.6 (Hannover), endereço eletrônico: [https://mega.nz/file/xk82HART#24UIt8lSqnLEZho\\_8GfeGzjz4ajQWutUX5pIW7lhm2Y](https://mega.nz/file/xk82HART#24UIt8lSqnLEZho_8GfeGzjz4ajQWutUX5pIW7lhm2Y)

- No QGIS, conforme ilustrado pela Figura 29, deve-se ir na aba “Complementos” → “Gerenciar e Instalar Complementos...”, clicar no índice “Instalar a partir do ZIP”, encontrar o arquivo na pasta onde ele foi baixado e clicar em “Instalar Complemento”. Ainda na mesma janela, ir no índice “Instalados” e verificar se está marcada a caixa de seleção. Após este procedimento o QGIS poderá ser fechado.

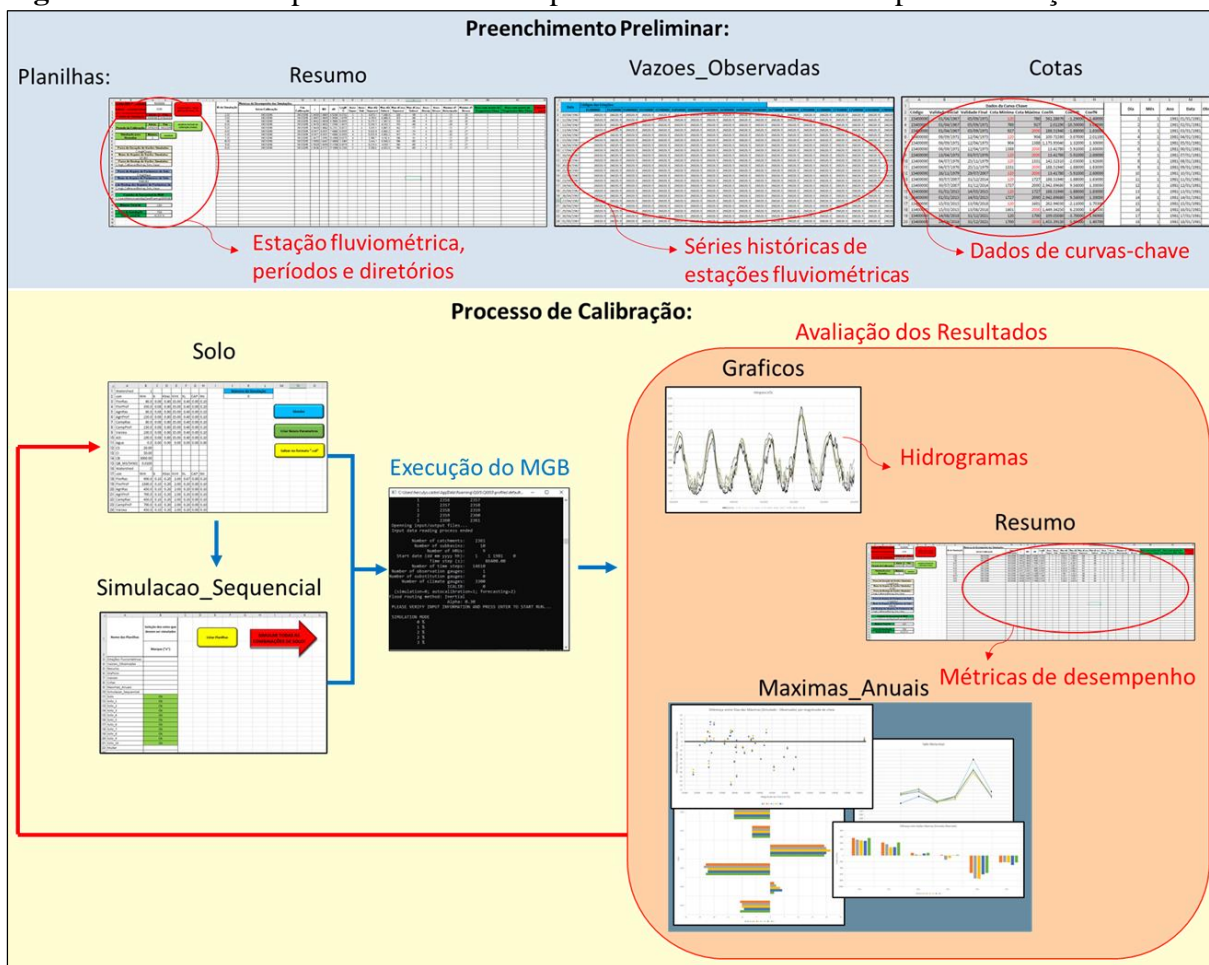
**Figura 29 – Instalação correta do MGB 4.5/4.6**



Nos itens a seguir serão descritas as funcionalidades de cada planilha (abas) e sua ligação com as outras. A Figura 30 resume os procedimentos que devem ser realizados com esta pasta de trabalho para a calibração manual do MBG. Vale ressaltar que é livre a criação de novas abas

de interesse do usuário, movimentação da sequência das abas, ocultar e reexibir, no entanto, não se deve alterar o nome ou excluir as abas originais, com exceção de algumas específicas. É livre a alteração do nome do arquivo, porém deve-se manter a extensão “.xslm”, correspondente à Pasta de Trabalho do Excel Habilitada para Macros”. No primeiro uso do arquivo é necessário clicar em “Habilitar Edição” e “Habilitar Conteúdo”, pois as macros são desabilitadas por padrão do Windows.

**Figura 30** – Fluxo de procedimentos com pasta de trabalho do Excel para calibração do MBG



## 6.1 Resumo

Conforme o próprio nome sugere, esta planilha apresenta o resumo de dados cadastrais que antecedem a simulação e o resumo das métricas de desempenho das simulações já realizadas. A Figura 31, apresenta a visão geral desta planilha, onde é indicado o Setor 1, referente às definições de estação fluviométrica, datas de simulação e calibração, Setor 2, referente ao

cadastro de caminhos de arquivos que serão utilizados pelo código VBA e Setor 3, referente à avaliação das simulações.

**Figura 31 – Visão geral da planilha “Resumo”**

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet. The main table is titled 'Métricas de Desempenho das Simulações'. It has columns for 'ID da Simulação', 'Início Calibração', 'Fim Calibração', 'r', 'ND', 'dy', 'LogH', 'Anos', 'Anos', 'Máx dCota', 'Máx dCota', 'Máx dCota', 'Máx dCota', 'Anos', 'Anos', 'Máximo dT', 'Máximo dT', 'Anos com acerto do Proprietário', 'Anos com acerto do Proprietário', 'Faltas Positivas', and 'Faltas Negativas'. The rows contain simulation data for various years and parameters. Red callouts point to specific areas: 'Setor 1' points to the top-left input fields; 'Setor 2' points to the bottom-left input fields; 'Setor 3' points to the main data table.

**Legenda:** Setor 1 = Estação fluviométrica e datas, Setor 2 = Cadastro de diretórios e Setor 3 = Desempenho das simulações

### 6.1.1 Setor 1 – Estação fluviométrica e datas

Nesta região da planilha deve ser inserido o código da estação fluviométrica da ANA e o número da minibacia correspondente, conforme já explicado nos itens anteriores deste manual. No exemplo da Figura 32, foi utilizada a estação de Porto Velho (Código 15400000), que corresponde à minibacia 2336 da base de dados descrita no item 4.2.2.

**Figura 32 – Setor 1 da planilha “Resumo”**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>Código ANA da Estação:</b>			15400000		<b>Limpar tudo e alterar período de simulação</b>			
2	<b>Minibacia correspondente:</b>			2336					
3	<b>Período de Simulação:</b>			<b>Início</b>	<b>Fim</b>				
4				01/01/1981	31/12/2020				
5				<b>Início</b>	<b>Fim</b>	<b>Atualizar Período de Calibração (Todas)</b>			
6	<b>Periodo de Calibração:</b>			01/01/2010	31/12/2015				
7				<b>Número</b>	<b>Atualizar</b>				
8	<b>Simulação para Reavaliar</b>			0					
9									
10									
11									

Logo abaixo deve ser indicado o período de simulação, através das datas iniciais e finais solicitadas nas células “D4” e “E4”, respectivamente. Este período deve ser idêntico ao período de precipitações inserido no arquivo “Chuvabin.pbi” (item 3.3) na pasta de imput do modelo, bem como deve ser idêntico ao período indicado pelo arquivo “InfoMGB.sim”, descrito no item 3.8.

Ao clicar-se no botão “Limpar tudo e alterar período de simulação”, todos os dados simulados existentes na planilha serão apagados, será feita uma nova busca de vazões na planilha “Vazoes\_Observadas” (item 6.2) e, com base nas novas datas simuladas, será feito o preenchimento de dados observados de vazões (item 6.3), cotas (item 6.4) e gráficos (itens 6.7 e 6.8). Este procedimento não exclui os arquivos de backup de configurações de solo e vazões simuladas, bem como não exclui as abas duplicadas pelo usuário da planilha de parâmetros calibráveis (item 6.5). Nesta etapa também é calculada a vazão atual de inundação, baseada no preenchimento da célula “D32” do Setor 2, que é opcional.

Nas células “D7” e “E7” deve ser inserido o período de calibração. Este período é o que será utilizado para medir a eficiência das simulações do modelo, podendo-se retirar da avaliação o período de estabelecimento das condições hidrológicas iniciais da bacia hidrográfica, bem como, separar datas de calibração das de validação ou mapear diferentes graus de ajustes do modelo para diferentes intervalos de tempo dentro do período simulado.

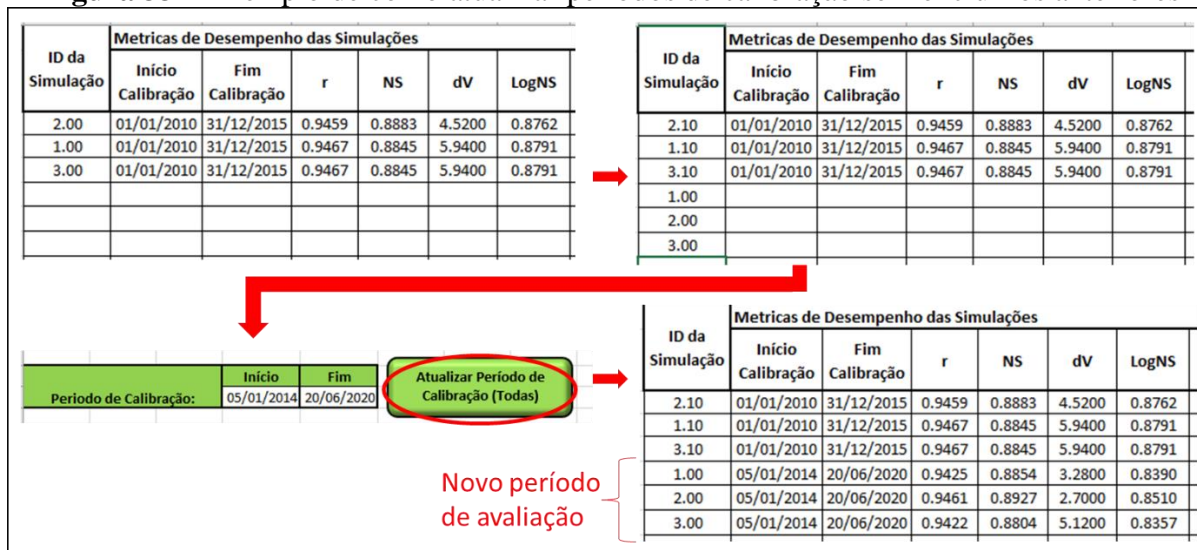
A partir de quando se define um novo período de calibração, todas as simulações desse ponto em diante terão o preenchimento das métricas de desempenho do Setor 3 (Figura 31), baseado nas novas datas. Caso se deseje alterar o período de avaliação de simulações já realizadas, basta alterar as datas das células “D7” e “E7” e clicar no botão “Atualizar Período de Calibração (Todas)”. Esse último procedimento irá alterar todos os períodos de avaliação e métricas de desempenho de todas as simulações listadas no Setor 3.

Caso se deseje alterar o período de calibração de apenas uma simulação, basta alterar as datas de início e fim da calibração respectivamente nas colunas “L” e “M” do Setor 3, preencher a célula “D10” do Setor 1 e clicar no botão “Atualizar”.



Ainda, caso o usuário queira verificar diferentes períodos de calibração para todas as simulações, mas deseje manter as datas de calibração e métricas de desempenho já calculadas, basta ele transformar os números dos ID's da simulação (coluna "K" do Setor 3) em números decimais, escrever nas linhas abaixo os números inteiros e clicar em "Atualizar Período de Calibração (Todas)". Este último procedimento está exemplificado na Figura 33.

**Figura 33** – Exemplo de como atualizar períodos de calibração sem excluir os anteriores



### 6.1.2 Setor 2 – Cadastro de diretórios

Assim como o Setor 1, esta região da planilha deve ser preenchida antes de serem iniciadas as simulações, pois o código VBA utiliza estas informações de caminhos de pastas e arquivos para desencadear os cálculos e simulações. Abaixo seguem as descrições de cada campo:

- **Pasta de Geração de Vazões Simuladas:** Corresponde à pasta onde serão encontradas as vazões simuladas no formato binário. O caminho padrão é "C:\mgb\Output";
- **Nome do Arquivo de Vazões Simuladas:** Corresponde ao nome do arquivo de vazões no formato binário. O padrão é "QTUDO";
- **Pasta de Backup de Vazões Simuladas:** Corresponde ao caminho de qualquer pasta do computador em que o usuário queira fazer o backup dos arquivos binários ".qbi". O código em VBA importa para o Excel os dados simulados apenas da minibacia que está

indicada na célula “D2” da planilha “Resumo”, portanto esses arquivos de backup são importantes para caso o usuário queira verificar o comportamento das vazões em outra minibacia;

- **Pasta do Arquivo de Parâmetros do Solo:** Corresponde à pasta onde serão salvos os arquivos de parâmetros do solo para dar início às simulações. O caminho padrão é “C:\mgb\Input”;
- **Nome do Arquivo de Parâmetros do Solo:** Corresponde ao nome do arquivo de parâmetros do solo. O padrão é “PARUSO”;
- **Pasta de Backup dos Arquivos de Parâmetros do Solo:** Corresponde ao caminho de qualquer pasta do computador em que o usuário queira fazer o backup dos arquivos “.cal”. Pode ser indicada a mesma pasta de backup das vazões simuladas;
- **Caminho do Executável do MGB:** Deve-se verificar o nome do usuário que está logado no computador e substituir no seguinte caminho: C:\Users\**Nome do Usuário**\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins\MGB\bin\MGB.exe
- **Número Total de Minibacias:** Número total de minibacias da área simulada. Pode ser facilmente encontrado nos arquivos “InfoMGB.sim” (item 3.8) ou “Mini.gtp” (item 3.1);
- **Cota de Inundação:** Cota, em cm, considerada como inundação para a localidade da minibacia. Tendo em vista que esta planilha foi criada com foco na calibração do MGB para a época de cheia, este dado é importante para métricas de desempenho que envolvam falsos positivos ou falsos negativos de inundação. Caso o objetivo do usuário não seja este, pode-se colocar “zero”. É recomendável que o preenchimento deste campo seja feito antes de se clicar no botão “Limpar tudo e alterar período de simulação”, pois é nesta etapa que é calculado o valor da célula “Vazão atual de Inundação”.



- **Vazão atual de Inundação:** Caso a célula “Cota de Inundação” tenha sido preenchida antes de se clicar no botão “Limpar tudo e alterar período de simulação”, este campo será preenchido automaticamente e mostrará a vazão em que o rio atinge a cota de inundação baseada na curva-chave mais atual. É um campo apenas informativo para calibrações voltadas para a época de cheia, não entrando em etapas de cálculo de nenhum outro código e, portanto, sendo opcional.

### 6.1.3 Setor 3 – Desempenho das simulações

Este setor da planilha é preenchido automaticamente após o término de cada simulação, podendo listar até 1000 simulações. Além do procedimento exemplificado pela Figura 33, que permite verificar vários períodos de avaliação para várias simulações, também é possível excluir simulações ruins e reordenar as linhas contidas entre as colunas “K” e “AE”, através da ferramenta do Excel “Dados → Classificar”, sem que isso acarrete em prejuízos para o código em VBA. Este procedimento permite que as simulações sejam ordenadas de acordo com os melhores valores para determinada métrica desempenho, por exemplo, ordenar as simulações pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe mais próximo de 1. A seguir são descritos os conteúdos de cada coluna:

- ID da Simulação (Coluna “K”): Corresponde ao número de referência de cada simulação. Estes números são gerados automaticamente e de forma sequencial, de acordo com o valor atribuído para a célula “J2” da planilha “Solo”, descrita no item 6.5, sendo originalmente números inteiros.
  - Caso o usuário opte por repetir o número de referência do solo antes de iniciar uma nova simulação, o código em VBA irá procurar se o referido número já existe no Setor 3 e então irá considerar a nova simulação no lugar da anterior;
  - Caso a linha da simulação seja excluída do Setor 3 pelo usuário e posteriormente o mesmo queira resgatá-la, basta inserir o número de referencia novamente na coluna “K”, inserir o período de calibração nas colunas “L” e “M”, inserir o mesmo número de ID na célula “D10” e clicar em “Atualizar”;

- Início Calibração (Coluna “L”): Indica a data inicial do período em que os dados simulados serão avaliados em comparação com os dados observados;
- Fim Calibração (Coluna “M”): Indica a data final do período em que os dados simulados serão avaliados em comparação com os dados observados;
- r (Coluna “N”): Correlação de Pearson para o período de calibração;
- NS (Coluna “O”): Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe;
- dV (Coluna “P”): Diferença percentual de volume entre vazões simuladas e observadas;
- LogNS (Coluna “Q”): Coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo das vazões;
- Anos Super (Coluna “R”): Anos dentro do período calibrado em que a vazão máxima foi superestimada;
- Anos Sub (Coluna “S”): Anos dentro do período calibrado em que a vazão máxima foi subestimada;
- Máx dQ Superest (Coluna “T”): Máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada;
- Máx dQ Subest (Coluna “U”): Máxima diferença entre vazões de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada;
- Máx dCota Superest (Coluna “V”): Em centímetros, máxima diferença entre **cotas** de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi superestimada;

- Máx dCota Subest (Coluna “W”): Em centímetros, máxima diferença entre **cotas** de pico de cheia (Simulada – Observada) em anos dentro do período simulado em que a vazão máxima foi subestimada;
- Anos Antecip (Coluna “X”): Anos dentro do período calibrado em que o dia de ocorrência da vazão máxima foi antecipado pela simulação;
- Anos Atraso (Coluna “Y”): Anos dentro do período calibrado em que o dia de ocorrência da vazão máxima foi atrasado pela simulação;
- Máximo dT Antecipado (Coluna “Z”): Máxima diferença em dias em que o pico da cheia foi antecipado;
- Máximo dT Atraso (Coluna “AA”): Máxima diferença em dias em que o pico da cheia foi atrasado;
- Anos com acerto do Prognóstico Cheia (Coluna “AB”): Anos dentro do período calibrado em que a simulação acertou no prognóstico de que o rio atingiria a cota de inundação;
- Anos com acerto do Prognóstico Não-Cheia (Coluna “AC”): Anos dentro do período calibrado em que a simulação acertou no prognóstico de que o rio **não** atingiria a cota de inundação;
- Falsos Positivos para Cheia (Coluna “AD”): Anos dentro do período calibrado em que a simulação indicou de forma equivocada que o rio atingiria a cota de inundação;
- Falsos Negativos para Cheia (Coluna “AE”): Anos dentro do período calibrado em que a simulação indicou de forma equivocada que o rio **não** atingiria a cota de inundação;

Os quatro últimos pontos relacionados acima são baseados na cota de inundação indicada na célula “D32”. O somatório dos números de anos presentes entre as colunas “AB” e “AE” deve ser igual ao número de anos contidos no período de calibração.

## 6.2 Vazoes\_Observadas

Esta planilha contém os dados diários de vazões observadas de estações fluviométricas da ANA, servindo de banco de dados para extrair o período de simulação requerido pelo botão “Limpar tudo e alterar período de simulação” da planilha “Resumo”. Não há limite para o número de estações cadastradas.

A Figura 34 apresenta um exemplo de preenchimento desta planilha, onde pode ser visto que estão cadastradas as séries históricas das estações 15200000, 15250000 e 15400000, onde a estação 15400000 é a única que possui dados de vazão desde 10/04/1967, as outras duas respectivamente só terão dados a partir de 21/04/1983 e 08/08/1970, portanto só a partir dessas datas é que terão a suas respectivas colunas preenchidas.

**Figura 34** – Exemplo de preenchimento da planilha “Vazoes\_Observadas”

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Códigos das Estações:									
2	Data	15200000	15250000	15400000							...
3	10/04/1967			26020.9							
4	11/04/1967			25443.5							
5	12/04/1967			24998.5							
6	13/04/1967			24400.3							
7	14/04/1967			23839.6							
8	15/04/1967			23438.3							
9	16/04/1967			23162.4							
10	17/04/1967			23009.7							
11	18/04/1967			22827.1							
	⋮	⋮	⋮	⋮							

## 6.3 Vazões

Esta planilha guarda os dados diários de vazões observadas e de todas as vazões simuladas pelo usuário para o período de simulação indicado na planilha “Resumo” (6.1), bem como é a partir dela que são feitos todos os cálculos de eficiência do modelo e gerados os hidrogramas da planilha “Graficos” (6.7).

O preenchimento dela é totalmente automático, sendo recomendado que o usuário não faça modificações manuais nela, pois pode afetar a organização das simulações. É livre a cópia dos dados contidos nela para outra planilha, para que o usuário possa fazer análises de sua

preferência. A Figura 35 apresenta uma visão geral desta planilha, que suporta dados de até 1000 simulações.

**Figura 35 – Visão geral da planilha “Vazoes”**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	Dia	Mês	Ano	Data	Observado	Simulações:														
2						0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
3	1	1	1981	01/01/1981	12,202.4	7,228.4	7,228.0	7,227.6	7,216.4	7,228.4	7,218.6	7,218.2	7,234.2	7,218.3	7,217.7	7,226.2				
4	2	1	1981	02/01/1981	11,927.3	8,547.1	8,545.6	8,544.7	8,525.4	8,547.1	8,525.9	8,524.9	8,564.0	8,536.9	8,541.1	8,553.2				
5	3	1	1981	03/01/1981	11,813.8	7,792.7	7,789.1	7,785.5	7,761.6	7,792.7	7,771.9	7,768.3	7,826.8	7,823.9	7,851.3	7,872.5				
6	4	1	1981	04/01/1981	11,588.8	8,251.9	8,241.6	8,230.8	8,204.1	8,251.9	8,234.5	8,223.7	8,309.7	8,436.2	8,547.0	8,578.2				
7	5	1	1981	05/01/1981	11,432.8	9,508.2	9,430.4	9,395.1	9,405.0	9,508.2	9,435.9	9,401.0	9,588.0	10,126.3	10,442.1	10,483.5				
8	6	1	1981	06/01/1981	11,477.3	11,303.1	11,004.2	10,909.2	11,065.4	11,303.1	11,012.3	10,918.0	11,396.0	12,598.4	13,165.8	13,215.9				
9	7	1	1981	07/01/1981	11,455.0	13,092.8	12,475.8	12,290.0	12,679.0	13,092.8	12,470.1	12,280.4	13,191.8	15,008.8	15,825.2	15,878.9				
10	8	1	1981	08/01/1981	11,499.5	14,800.5	13,869.6	13,558.2	14,230.9	14,800.5	13,840.4	13,518.8	14,907.9	17,030.7	18,074.8	18,130.0				
11	9	1	1981	09/01/1981	11,859.1	16,311.4	15,252.8	14,889.1	15,687.2	16,311.4	15,178.6	14,801.7	16,445.0	18,602.3	19,809.6	19,862.4				
12	10	1	1981	10/01/1981	12,931.2	17,586.2	16,482.6	16,106.6	16,937.0	17,586.2	16,360.0	15,965.8	17,754.0	19,771.3	21,043.2	21,092.7				
13	11	1	1981	11/01/1981	14,263.5	18,820.3	17,718.1	17,332.3	18,161.9	18,820.3	17,560.8	17,147.4	19,016.8	20,910.4	22,233.6	22,291.9				
14	12	1	1981	12/01/1981	15,302.6	20,075.7	18,967.5	18,543.0	19,402.6	20,075.7	18,846.1	18,361.1	20,263.6	22,121.3	23,490.2	23,553.3				
15	13	1	1981	13/01/1981	16,918.3	21,177.7	20,107.1	19,650.6	20,479.8	21,177.7	20,051.6	19,495.5	21,383.0	23,217.0	24,622.4	24,685.7				
16	14	1	1981	14/01/1981	17,691.2	22,479.5	21,363.6	20,870.3	21,676.0	22,479.5	21,349.6	20,739.5	22,704.1	24,419.9	25,796.0	25,860.3				
17	15	1	1981	15/01/1981	18,307.1	23,826.0	22,639.5	22,032.7	22,889.8	23,826.0	22,679.6	21,929.6	24,048.4	25,589.5	26,943.5	27,011.9				
18	16	1	1981	16/01/1981	18,986.6	24,826.6	23,711.5	23,011.5	23,889.7	24,826.6	23,601.2	22,827.6	25,028.6	26,530.2	27,821.4	27,882.7				

#### 6.4 Cotas

Esta planilha guarda os dados diários de cotas observadas e de todas as cotas simuladas pelo usuário. Para o funcionamento adequado das rotinas desta Pasta de Trabalho como um todo é necessário que, antes de qualquer operação, sejam cadastrados os dados das curvas-chave da estação fluviométrica utilizada na calibração e/ou também das curvas-chave de outras possíveis estações de interesse do usuário. Nesta etapa de preenchimento das curvas-chave é recomendável que o usuário reduza as cotas mínimas dos tramos mais inferiores de cada validade e eleve as cotas máximas dos tramos mais superiores de cada validade (sinalizadas em vermelho na Figura 36), pois as vazões simuladas podem não estar compreendidas na amplitude de cotas estabelecida para as curvas-chave.

Após a etapa de cadastro das curvas-chave, o preenchimento das demais colunas é automático, onde as datas e as cotas, observadas e simuladas, são preenchidas e calculadas com base na planilha “Vazoes” (item 6.3). Esta planilha também suporta dados de até 1000 simulações, sendo recomendado que o usuário não faça modificações manuais a partir da coluna “J”, pois pode afetar a organização dessas simulações. A Figura 36 apresenta uma visão geral desta planilha.

**Figura 36 – Visão geral da planilha “Cotas”**

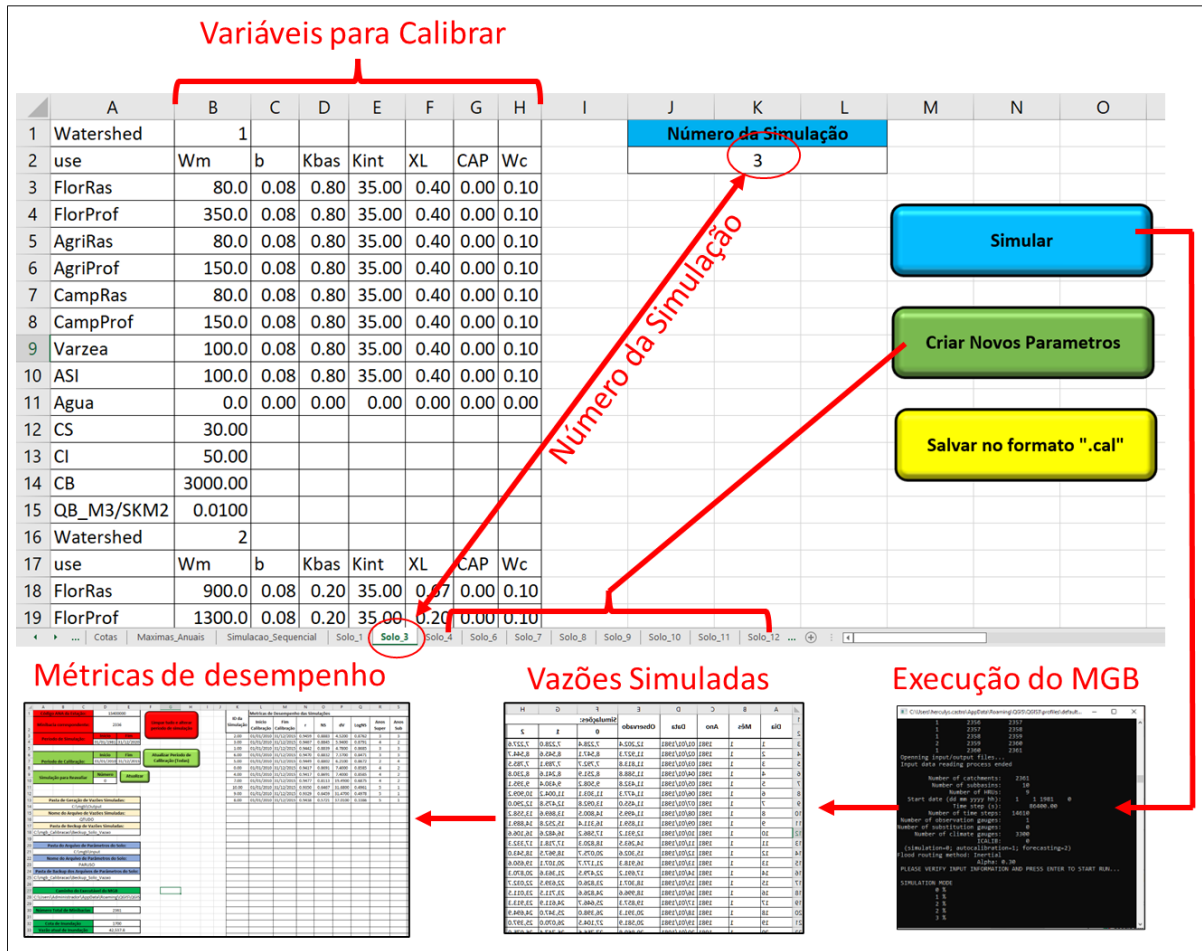
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	Dados da Curva-Chave															Simulações:	
2	Código	Validade Inicial	Validade Final	Cota Mínima	Cota Máxima	CoefA	CoefH0	CoefN		Dia	Mês	Ano	Data	Observado	0	1	
3	15400000	01/04/1967	05/09/1971	120	780	561.28670	-1.29000	1.40000		1	1	1981	01/01/1981	783	532	532	
4	15400000	01/04/1967	05/09/1971	780	927	2.01290	-10.50000	3.00000		2	1	1981	02/01/1981	771	607	607	
5	15400000	01/04/1967	05/09/1971	927	2000	188.51940	-1.88000	1.83000		3	1	1981	03/01/1981	766	565	565	
6	15400000	06/09/1971	12/04/1973	120	904	100.71580	-3.67000	2.01100		4	1	1981	04/01/1981	756	591	591	
7	15400000	06/09/1971	12/04/1973	904	1388	1.173.95040	1.32000	1.30000		5	1	1981	05/01/1981	749	657	653	
8	15400000	06/09/1971	12/04/1973	1388	2000	13.41780	-5.91000	2.60000		6	1	1981	06/01/1981	751	743	729	
9	15400000	13/04/1973	03/07/1976	120	2000	13.41780	-5.91000	2.60000		7	1	1981	07/01/1981	750	821	795	
10	15400000	04/07/1976	25/11/1979	120	1331	142.52310	-2.03000	1.92600		8	1	1981	08/01/1981	752	889	852	
11	15400000	04/07/1976	25/11/1979	1331	2000	188.51940	-1.88000	1.83000		9	1	1981	09/01/1981	768	945	906	
12	15400000	26/11/1979	29/07/2007	120	2000	13.41780	-5.91000	2.60000		10	1	1981	10/01/1981	814	990	951	
13	15400000	30/07/2007	31/12/2014	120	1727	188.51940	-1.88000	1.83000		11	1	1981	11/01/1981	868	1032	995	
14	15400000	30/07/2007	31/12/2014	1727	2000	2.942.89680	9.56000	1.30000		12	1	1981	12/01/1981	908	1073	1037	
15	15400000	01/01/2015	14/03/2015	120	1727	188.51940	-1.88000	1.83000		13	1	1981	13/01/1981	967	1108	1074	
16	15400000	01/01/2015	14/03/2015	1727	2000	2.942.89680	9.56000	1.30000		14	1	1981	14/01/1981	994	1147	1113	
17	15400000	15/03/2015	13/08/2018	120	1601	262.94030	-2.11000	1.70300		15	1	1981	15/01/1981	1015	1186	1152	
18	15400000	15/03/2015	13/08/2018	1601	2000	1.449.34250	6.23000	1.41500		16	1	1981	16/01/1981	1038	1215	1183	
19	15400000	14/08/2018	31/12/2021	120	1700	109.05080	-3.70000	1.96900		17	1	1981	17/01/1981	1066	1237	1209	
20	15400000	14/08/2018	31/12/2021	1700	2000	1.455.39130	5.99000	1.40700		18	1	1981	18/01/1981	1083	1258	1229	
21										19	1	1981	19/01/1981	1089	1277	1249	
22										20	1	1981	20/01/1981	1098	1294	1267	
23										21	1	1981	21/01/1981	1133	1310	1287	
24										22	1	1981	22/01/1981	1180	1328	1304	
25										23	1	1981	23/01/1981	1201	1345	1319	
26										24	1	1981	24/01/1981	1150	1258	1222	

## 6.5 Solo

A efetiva calibração e simulação do MGB é feita através desta planilha, que contém a estrutura de entrada dos dados calibráveis do solo, descrita nos itens 3.5 e 5.3.3. Conforme mostra a Figura 37, entre as colunas “B” e “H” devem ser modificadas as variáveis do solo que interferirão nas interações hidrológicas da bacia hidrográfica, a descrição dessas variáveis está presente no item 2.2 deste manual e também entre as colunas “S” e “V” da referida planilha.

Na célula “J2” é indicado o número da simulação de referência, que tem por padrão inicial ser igual a 0. Para iniciar a simulação do código fonte do MGB, basta clicar no botão “Simular”. Após a simulação ser finalizada as planilhas Resumo (6.1), Vazoes (6.3), Cotas (6.4) e Maximas\_Anuais (6.8) serão atualizadas automaticamente com os novos dados gerados e será feito o backup dos parâmetros do solo e das vazões simuladas para a pasta escolhida pelo usuário na planilha “Resumo”.

**Figura 37 – Resumo do funcionamento da planilha “Solo”**



Caso o usuário não goste do resultado da simulação, basta ele alterar as variáveis do solo na própria planilha e clicar novamente em “Simular”, que a simulação anterior será substituída automaticamente.

Caso o usuário queira fazer uma nova simulação sem excluir a anterior, basta clicar no botão “Criar Novos Parametros”, que uma nova planilha com as mesmas funcionalidades será gerada, porém com um número diferente de simulação indicado na célula “J1” e o nome da planilha passa a ser acompanhado do número da simulação, exemplo: Solo, Solo\_1, Solo\_2, Solo\_3 e etc.

Normalmente o número da planilha seguinte é igual ao número da planilha de origem mais um, porém há casos em que o usuário pode querer usar como base uma simulação de uma planilha que teve melhor desempenho e que está em meio a uma sequência de números, por exemplo, a

planilha com melhor desempenho ser a de número 3, mas já existem outras com números 4 e 5. Nesta situação o usuário poderá clicar normalmente em “Criar Novos Parâmetros”, pois o código irá procurar o próximo número inteiro disponível que, seguindo o exemplo, será o número 6.

Também é possível excluir as abas dos parâmetros do solo que tiveram um baixo desempenho, inclusive a própria planilha “Solo” original, contanto que se mantenha pelo menos uma planilha deste tipo no arquivo. Após a exclusão dessas abas, o número de referência delas ficará vago, podendo ser criada outra planilha com o mesmo número no seu lugar e, após a execução do código do MGB, todos os dados e métricas de eficiência encontrados com base na planilha anterior serão substituídos pela nova. Por exemplo, se é excluída a aba “Solo\_5” o usuário clicar para criar novos parâmetros na aba “Solo\_4”, será criada uma nova aba “Solo\_5” com base na “Solo\_4”, se o usuário executar a simulação, todos os dados referentes à calibração 5 serão substituídos.

Conforme mostra a Figura 37, ainda há outro botão, que gera o arquivo “.cal”, caso o usuário deseje disponibilizar os parâmetros do solo encontrados ou realizar a simulação pelo método tradicional, no plugin do MGB do QGIS.

## **6.6 Simulacao\_Sequencial**

Esta planilha deve ser utilizada quando se deseja fazer a simulação em sequência de várias configurações de solo criadas com a planilha do item anterior (6.5), possibilitando variar os parâmetros do solo de acordo com uma lógica de calibração e possibilitando uma visualização posterior dos resultados em uma única vez.

Conforme mostra a Figura 38, o usuário deve primeiramente clicar no botão “Listar Planilhas”, esse procedimento irá atualizar a coluna “A” com a lista de planilhas existentes na pasta de trabalho. Deve-se marcar com “x” na coluna “B” as respectivas planilhas de calibração do solo que o usuário deseja simular. Por fim, deve-se clicar no botão “Simular todas as combinações de solo!”. Logo em seguida será iniciada uma simulação em cadeia. Após todo o processo, as simulações realizadas com sucesso terão na coluna “B” a palavra “Ok” no lugar do “x”.



**Figura 38 – Passo-a-passo da simulação sequencial**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Nome das Planilhas	Seleção dos solos que devem ser simulados										
2		Marque ("x")										
3	Vazoes_Observadas											
4	Resumo											
5	Graficos											
6	Vazoes											
7	Cotas											
8	Maximas_Anuais											
9	Simulacao_Sequencial											
10	Solo_1	x										
11	Solo_3	x										
12	Solo_4											
13	Solo_6	x										
14	Solo_7	x										
15	Solo_8	x										
16	Solo_9	x										
17	Solo_10											

Vale ressaltar que a simulação em cadeia pode demorar várias horas, considerando a quantidade de solos para serem simulados, o tamanho da área estudada, o período de simulação e o poder de processamento do computador. Tomando como exemplo a bacia hidrográfica do rio Madeira sendo simulada para um período de 40 anos, conforme pacote de dados disponibilizado no item 4, cada simulação dura em média 14 minutos, portanto é recomendável que o usuário execute esta operação em um período que não necessite utilizar o Excel para outra atividade.

### 6.7 Gráficos

Esta planilha apresenta em forma de hidrograma as vazões observadas e simuladas contidas na planilha “Vazoes” (item 6.3). Sempre que for feita uma nova simulação ou que seja finalizada uma simulação sequencial é necessário clicar no botão “Atualizar Vazões”, ao fazer este procedimento as vazões simuladas são plotadas no gráfico e as datas iniciais e finais do gráfico são ajustadas para o período de calibração contido nas células “D7” e “E7” da planilha “Resumo”.

Este gráfico possui todas as funcionalidades de um gráfico do Excel, onde é permitido adição e exclusão de séries, aumento do tamanho do gráfico, formatação de elementos, mudança do

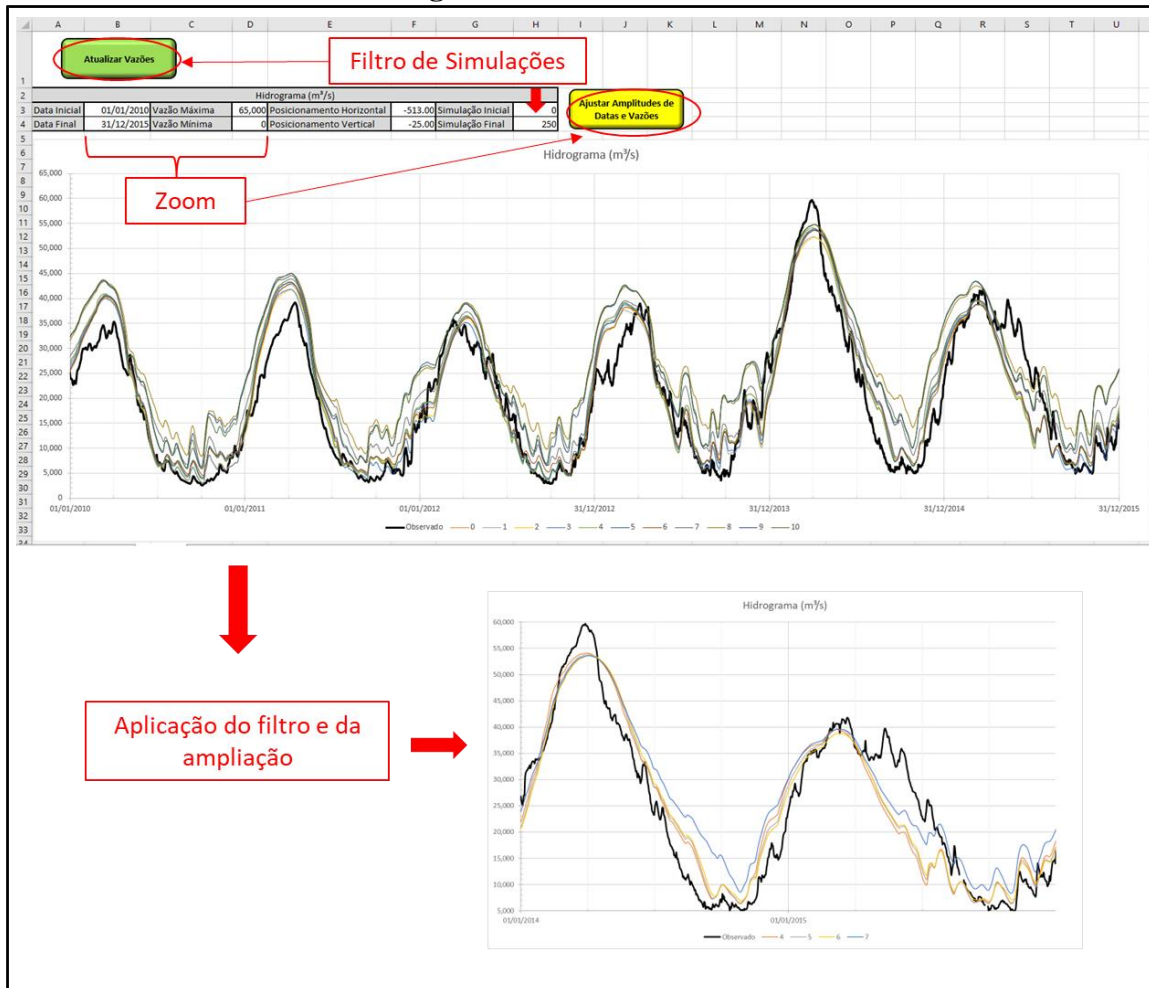
tipo de gráfico, dentre outras facilidades. Para retornar o gráfico ao estado original, basta clicar novamente em “Atualizar Vazões”.

Para uma visualização mais detalhada de períodos específicos do hidrograma o usuário pode ampliar a região desejada do gráfico através da alteração da data inicial e final nas células “B3” e “B4”, respectivamente, e alteração das vazões mínimas e máximas visualizadas, através das células “D4” e “D3”. Ao clicar no botão “Ajustar Amplitudes de Datas e Vazões” os eixos X e Y do gráfico irão ser ajustados automaticamente. A Figura 39 ilustra esse procedimento.

As células “F3” e “F4” são parâmetros fixos relacionados a posição do gráfico na tela, algo que pode ser necessário no primeiro uso da planilha, dependendo do tamanho da tela do computador em que o usuário esteja trabalhando. Para fazer o gráfico refletir alterações feitas neste campo, deve-se clicar novamente em “Atualizar Vazões”.

As células “H3” e “H4” representam um filtro de simulações que devem aparecer no gráfico. Para fazer o gráfico refletir alterações feitas neste campo, deve-se clicar novamente em “Atualizar Vazões”. A Figura 39 ilustra esse procedimento.

Figura 39 – Planilha “Gráficos”



## 6.8 Maximas Anuais

Esta planilha apresenta dados e gráficos voltados para a avaliação de simulações para a época de cheia, através de métricas de máximas anuais, em complemento às métricas de desempenho presentes na planilha “Resumo”.

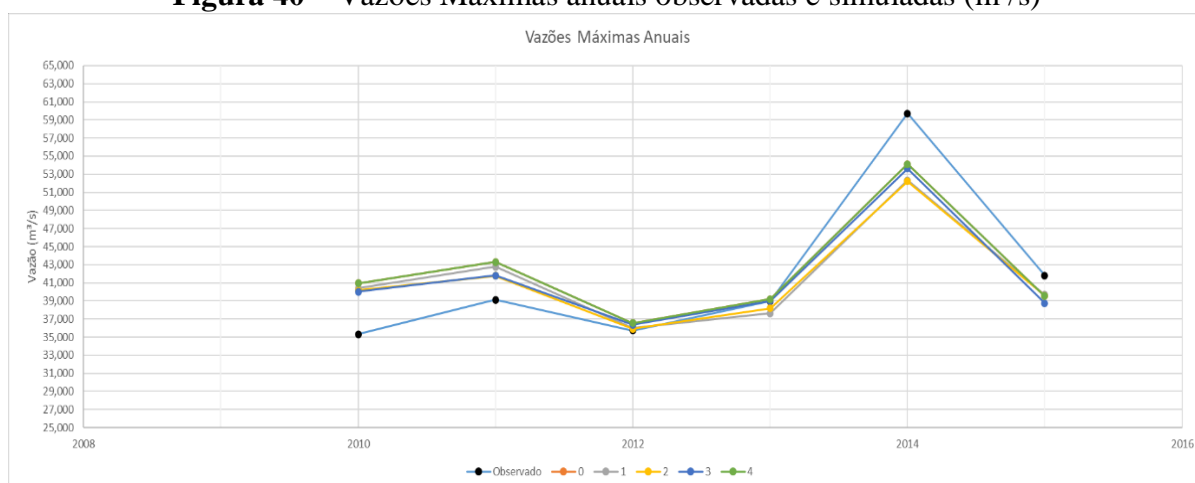
Basicamente ela é composta por estatísticas de máximas anuais em tabelas que são preenchidas automaticamente após cada simulação, que são apresentadas em gráficos do Excel que não possuem programação específica em VBA, diferentemente do gráfico apresentado no item anterior (item 6.7). No entanto os gráficos já estão lincados com as colunas e índices das suas respectivas tabelas, de forma que o usuário ao clicar na figura visualizará a área de seleção dos dados na tabela de referência, podendo facilmente selecionar as simulações e anos que serão

visualizados no gráfico correspondente. Os itens a seguir descrevem cada um dos gráficos e tabelas.

### 6.8.1 Vazões máximas

Apresenta as vazões máximas anuais observadas e simuladas para todo o período simulado, tendo o limite de 40 anos. A Figura 40 mostra o gráfico relacionada a esta tabela, com as simulações 0 até 4, entre os anos de 2010 e 2015.

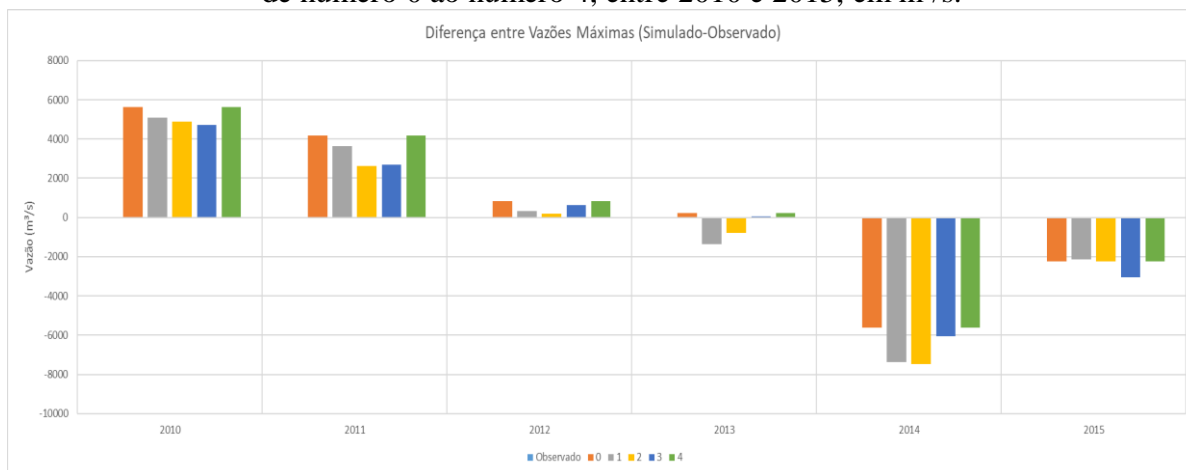
**Figura 40** – Vazões Máximas anuais observadas e simuladas (m<sup>3</sup>/s)



### 6.8.2 Diferença entre vazões máximas

Apresenta as magnitudes das diferenças entre as máximas anuais simuladas e máximas anuais observadas (Simulado – Observado), possibilitando uma análise visual de como está o equilíbrio entre subestimativas e superestimativas, bem como qual simulação está com valores menores, girando mais próximo do eixo do “0” (Figura 41).

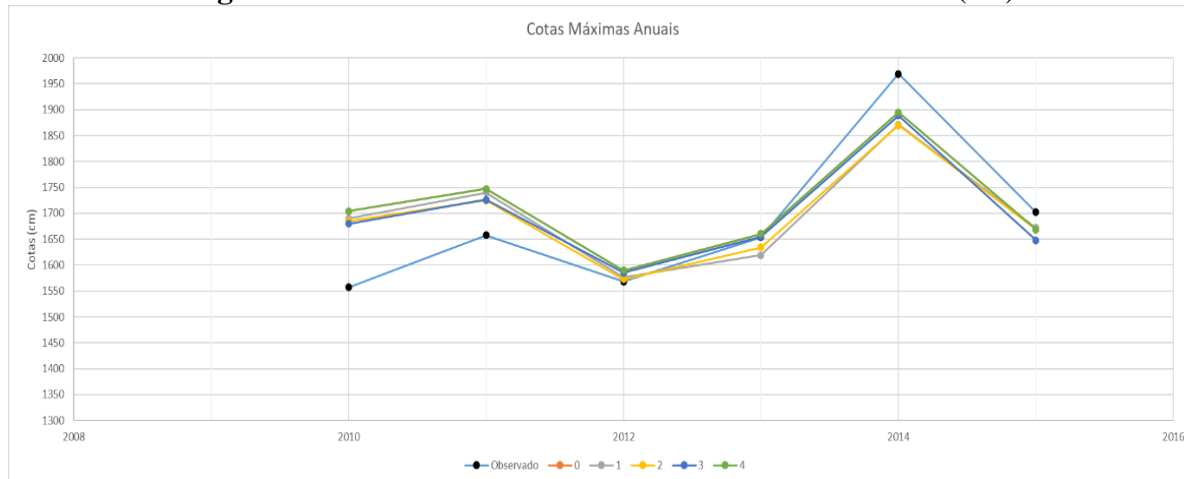
**Figura 41** – Diferença entre vazões máximas anuais simuladas e observadas das simulações de número 0 ao número 4, entre 2010 e 2015, em m<sup>3</sup>/s.



### 6.8.3 Cotas máximas

A partir das vazões máximas entrando como variável independente na função inversa da curva-chave, encontra-se os valores de cotas. A Figura 42 possui a mesma lógica da Figura 40 (item 6.8.1), porém apresentada em termos de cotas (cm) máximas anuais observadas e simuladas.

**Figura 42** – Cotas máximas anuais observadas e simuladas (cm)

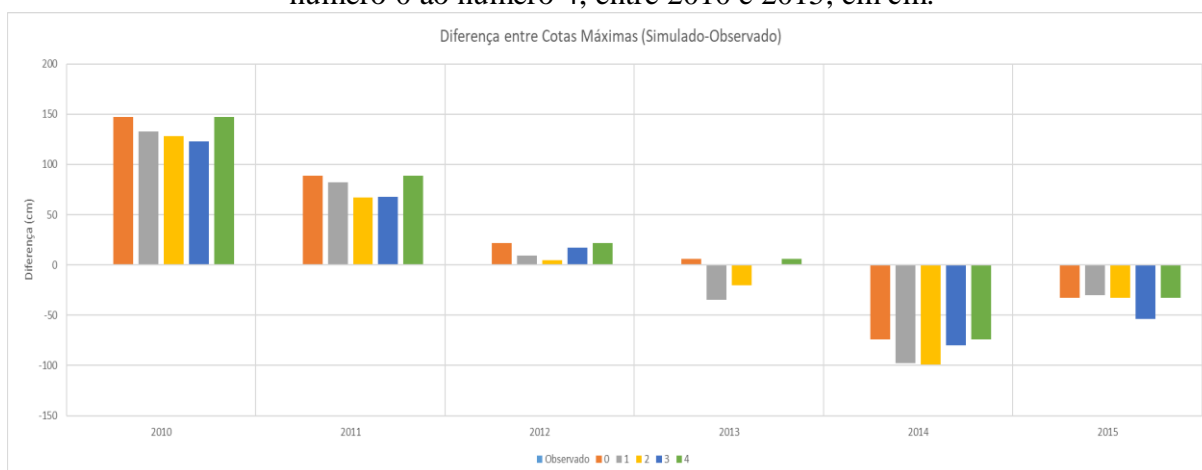


### 6.8.4 Diferença entre cotas máximas

Considerando o formato da calha do rio e a magnitude da cheia máxima, tem-se um impacto diferente em termos de cota (cm) que o rio atinge. Com o objetivo de mensurar o impacto dos

erros da simulação em termos de cota, a Figura 43 apresenta as magnitudes das diferenças entre as máximas anuais simuladas e máximas anuais observadas (Simulado – Observado), possibilitando uma análise visual de como está o equilíbrio entre subestimativas e superestimativas, bem como qual simulação está com valores menores, girando mais próximo do eixo do “0”.

**Figura 43** – Diferença entre cotas máximas anuais simuladas e observadas das simulações de número 0 ao número 4, entre 2010 e 2015, em cm.



### 6.8.5 Dias máximos

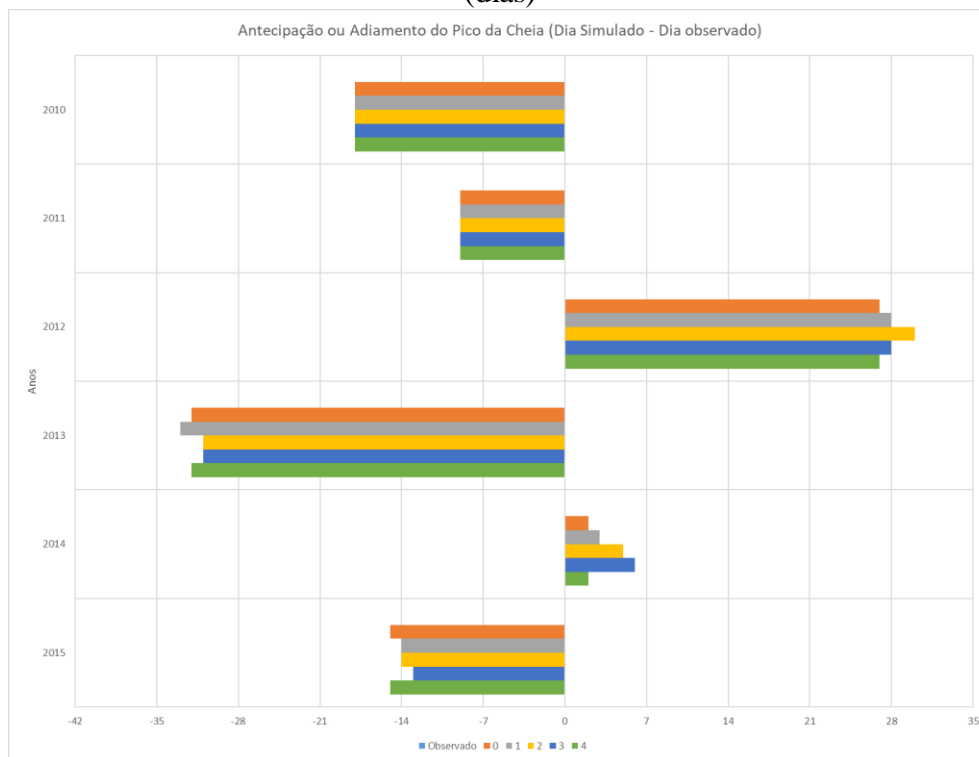
Este setor da planilha apresenta uma tabela com os dias em que ocorreram as máximas anuais, de todos os anos presentes no período simulado. Não há gráficos atrelados a esta tabela.

### 6.8.6 Diferença entre dias máximos

Com o objetivo de fornecer ao usuário uma análise visual de como está o equilíbrio entre picos de cheia antecipados e retardados pelas simulações, neste setor da planilha é apresentada uma tabela e um gráfico com a diferença entre as datas em que as simulações indicaram a ocorrência da maior vazão em relação às datas observadas em que ocorreram a maior vazão.

O resultado é expresso em dias, onde valores negativos indicam antecipação do pico das cheias pelas simulações e valores positivos indicam atrasos dos picos das cheias pelas simulações. Os melhores valores são aqueles que giram mais próximos do eixo vertical do gráfico. A Figura 44 ilustra um exemplo de resultados de simulações.

**Figura 44** – Diferença entre datas de ocorrência das máximas anuais simuladas e observadas (dias)

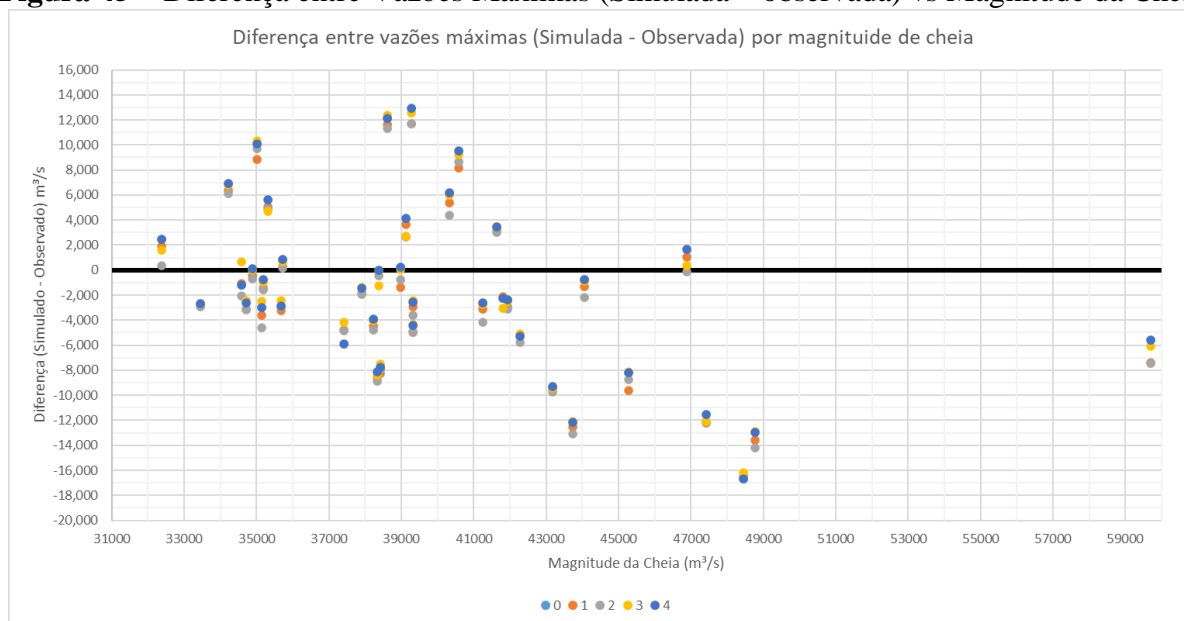


### 6.8.7 Diferença entre Vazões Máximas vs Magnitude da Cheia

O gráfico presente na Figura 41 (item 6.8.2) fornece uma visão geral de subestimativas e superestimativas de vazões, porém não permite a análise visual da distribuição dessas diferenças de acordo com a magnitude das cheias ocorridas na série histórica do período de simulação. Nesse sentido, este setor da planilha apresenta uma tabela em que as vazões máximas anuais observadas do período simulado são classificadas da maior para a menor e é relacionada a diferença entre vazões simuladas e observadas (Simulada-Observada) para cada ano do período simulado.

A Figura 45 apresenta o resultado da operação escrita acima, onde no eixo “X” estão valores crescentes de vazão, representando as máximas anuais em (m<sup>3</sup>/s) e no eixo “Y” valores da diferença entre vazões simuladas e observadas, também em (m<sup>3</sup>/s). A partir do gráfico é possível identificar se há tendências de vazões serem superestimadas (valores acima do eixo 0 da horizontal) ou subestimadas (valores abaixo do eixo 0 da horizontal), bem como em qual faixa de magnitudes das cheias isso ocorre.

**Figura 45** – Diferença entre Vazões Máximas (Simulada – observada) vs Magnitude da Cheia



No exemplo da Figura 45, onde foram utilizados dados desde 1981 até 2020, percebe-se que cheias com magnitude de até 41 mil m<sup>3</sup>/s possuem uma tendência de serem superestimadas pelas simulações e a amplitude das diferenças está na faixa de 10 mil m<sup>3</sup>/s negativos à 14 mil m<sup>3</sup>/s positivos. Já a partir de cheias com magnitudes maiores que 41 mil m<sup>3</sup>/s a tendência é que as vazões máximas sejam subestimadas pelo modelo, reduzindo a amplitude de erros entorno do eixo “0”, passando a ter uma amplitude entre de 18 mil m<sup>3</sup>/s negativos e 2 mil m<sup>3</sup>/s positivos. Neste exemplo não é possível identificar de forma conclusiva a existência de alguma simulação que se destoa das demais por apresentar valores mais próximos ao eixo “0”, talvez a simulação de número 3, em amarelo.

### 6.8.8 Diferença entre Dias de Ocorrência das Máximas vs Magnitude da Cheia

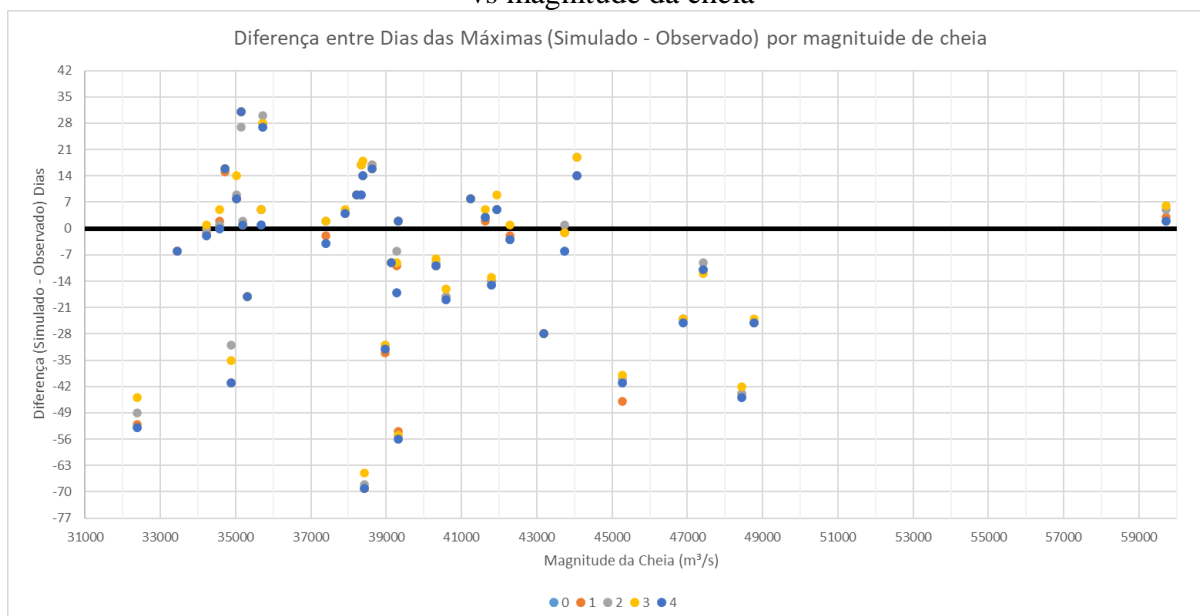
A mesma lógica do item anterior, 6.8.7, é aplicado ao gráfico apresentado neste, porém com a diferença entre dias de estimativa de ocorrência do pico da cheia (antecipação ou atraso), estratificado pela magnitude de vazões.

No exemplo da Figura 46, onde foram utilizados dados desde 1981 até 2020, percebe-se que há a tendência de haver antecipação do pico da cheia em todas as faixas de vazões máximas anuais, sendo predominando a partir de cheias com magnitude acima de 45 mil m<sup>3</sup>/s, com exceção da cheia extrema, com vazão acima de 59 mil m<sup>3</sup>/s, onde as simulações acertaram a semana que



ocorreu o pico. Também é possível verificar que há uma redução nos erros de antecipação da cheia a partir de magnitudes de 40 mil m<sup>3</sup>/s.

**Figura 46** – Diferença entre dias de ocorrência das vazões máximas (simulada – observada) vs magnitude da cheia

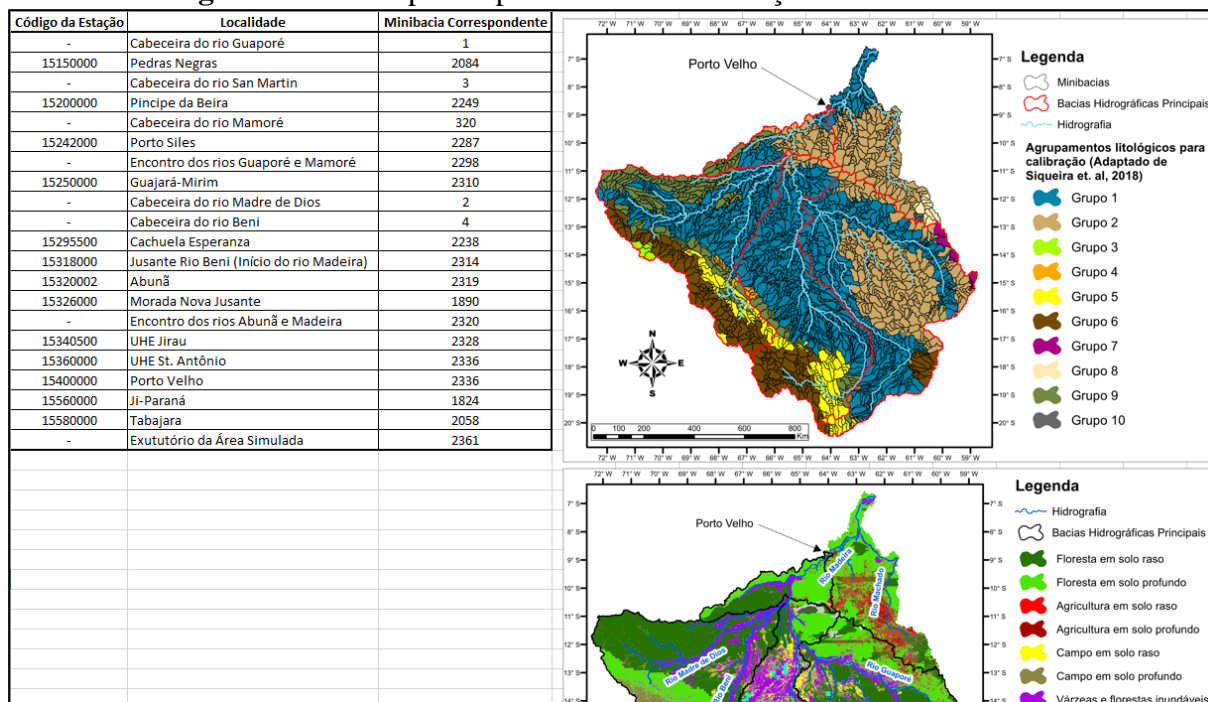


## 6.9 Informações Adicionais

Em complemento às planilhas desta pasta de trabalho é recomendável que o usuário monte algumas outras com informações extras que irão auxiliá-lo na calibração, como, por exemplo, as informações contidas na Figura 47, onde são relacionados alguns pontos de interesse, códigos de estações fluviométricas correspondentes e códigos das minibacias correspondentes.

Ainda conforme a Figura 47, é recomendável que esteja em fácil acesso uma imagem das divisões das minibacias em seus respectivos grupos de calibração ou sub-bacias, bem como uma imagem com a distribuição espacial das Unidades de Resposta Hidrológica (URH's). Essa iniciativa fornecerá ao usuário uma dimensão espacial sobre o impacto que alterações nas variáveis do solo de determinada URH, em determinado grupo de calibração, causarão no resultado do modelo e evitará que o usuário necessite utilizar com frequência os softwares de geoprocessamento durante o processo de calibração.

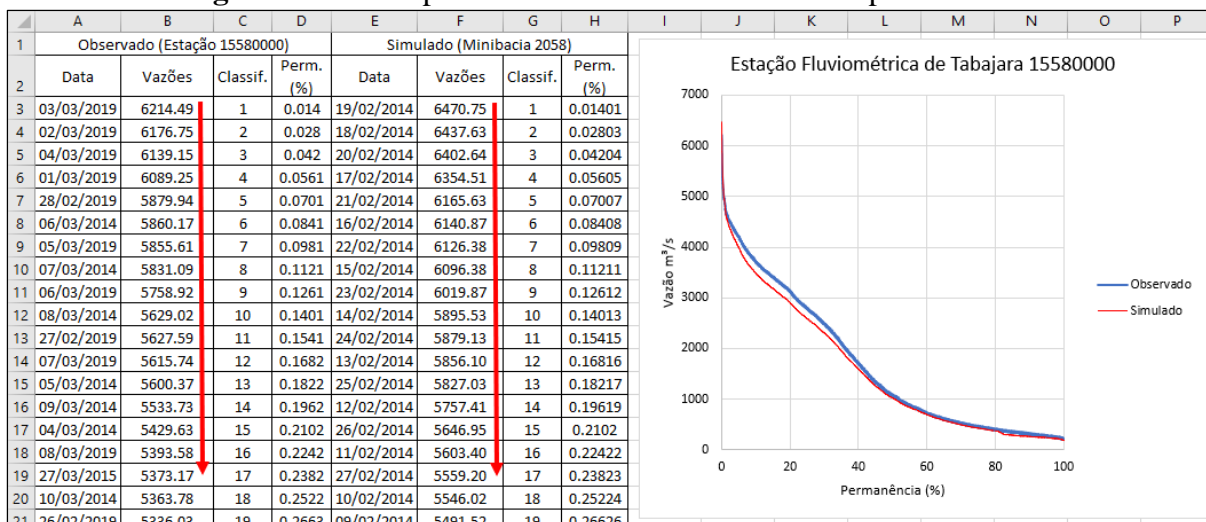
**Figura 47** – Exemplo de planilha com informações extras relevantes



Outro aspecto que deve ser ressaltado é que esta pasta de trabalho possui gráficos e métricas de desempenho voltados para avaliar a eficiência do modelo para a simulação de cheias. Caso o usuário deseje trabalhar com disponibilidade hídrica ou regionalização de vazão, por exemplo, é interessante que seja implementada uma sub-rotina que permita a visualização de gráficos de curvas de permanência de minibacias de interesse.

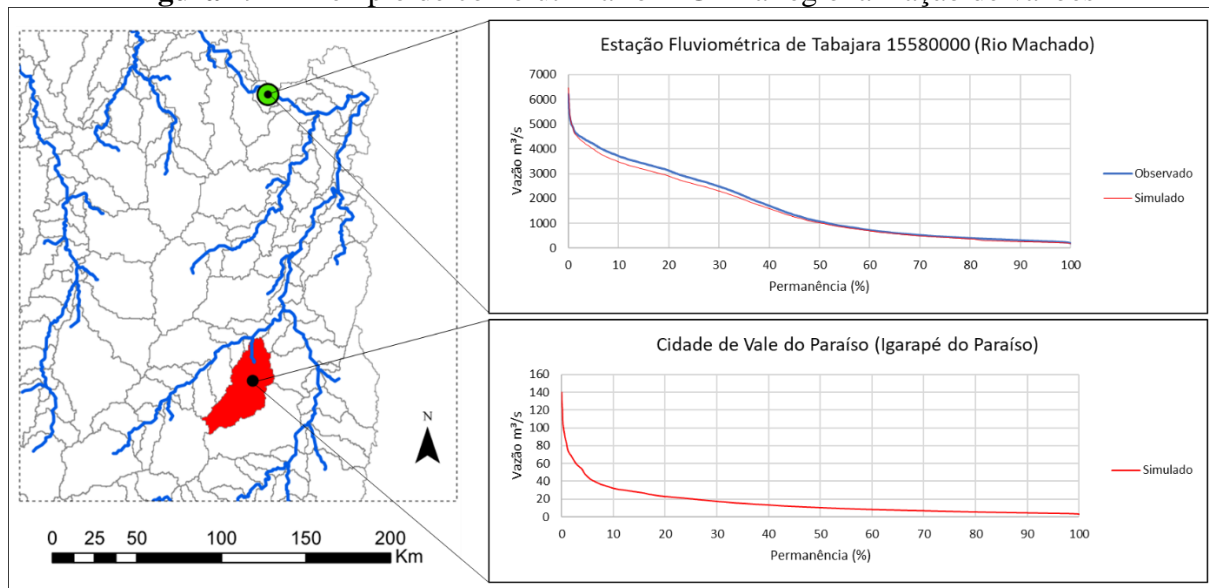
Esse gráfico pode ser implementado através da sub-rotina “Trans\_Vaz\_Bin” (item 5.2.2), adicionado de uma classificação decrescente de vazões, numeração sequencial dessas vazões e posterior cálculo de porcentagem de ocorrência, conforme ilustra a Figura 48, onde estão sendo comparados os gráficos de permanência das vazões observadas e simuladas para a estação fluviométrica de Tabajara (15580000).

**Figura 48 – Exemplo de como montar uma curva de permanência**



A Figura 49 ilustra um exemplo de utilização do MGB e dos códigos descritos neste manual para calibração da curva de permanência em uma localidade em que há estação fluiométrica, com o objetivo de adquirir a curva de permanência para uma localidade a montante em que não há estação fluiométrica.

**Figura 49 – Exemplo de como utilizar o MGB na regionalização de vazões**



Para a simulação de cheias em tempo atual, a exemplo do trabalho realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através do Sistema de Alerta Hidrológico do rio Madeira, os códigos em VBA descritos neste manual permitem que dados de chuvas estimadas por satélite

e previstas por modelos meteorológicos possam ser utilizados nas simulações com o MGB, sendo necessária a criação de outras rotinas computacionais, escritas em softwares e linguagens de programação que suportem dados no formato NetCDF e Grib2, a exemplo de Python, R ou Matlab, que colem esses dados dos servidores dos centros de previsão meteorológica e interpole a precipitação diária para as coordenadas de cada centróide de cada minibacia e/ou que transformem esses dados em arquivos que possuam formatos legíveis pelo VBA, como por exemplo “.txt” ou “.csv”.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este manual apresentou caminhos de utilização de códigos em Visual Basic for Application (VBA), voltados para profissionais e estudantes que estejam envolvidos com soluções para a gestão de recursos hídricos, que simpatizam com o software Microsoft Excel e que desejam utilizar e potencializar o Modelo de Grandes Bacias (MGB) em suas inúmeras possibilidades de uso, algumas delas exemplificadas durante este manual.

Todos os códigos e planilhas citados são de livre acesso e edição, recomendando-se que desenvolvedores implementem sub-rotinas e/ou planilhas voltadas para a automatização e facilitação de trabalhos ainda não contemplados pelos produtos disponibilizados por este manual. A seguir é elencada na Tabela 3 uma lista com o resumo de links importantes citados neste manual.

**Tabela 3 – Resumo de links citados no manual**

<b>Descrição</b>	<b>Item de Referência no Manual</b>	<b>Links</b>
Site do grupo de pesquisa “Hidrologia de Grande Escala” (HGE/IPH/UFRGS), criadores do MGB	-	<a href="https://www.ufrgs.br/hge/">https://www.ufrgs.br/hge/</a>
MGB versão 4.5, utilizada no QGIS 3.4.14 (Madeira)	-	<a href="https://mega.nz/file/I9s0RZDC#c2BDG8Jx34LoYeN6HL5etoicuSuLxVLg792tr7rtQx8">https://mega.nz/file/I9s0RZDC#c2BDG8Jx34LoYeN6HL5etoicuSuLxVLg792tr7rtQx8</a>
MGB versão 4.6, utilizada no QGIS 3.16.6 (Hannover)	-	<a href="https://mega.nz/file/xk82HART#24UIt8lSqLEZho_8GfeGzjz4ajQWutUX5pIW7lhm2Y">https://mega.nz/file/xk82HART#24UIt8lSqLEZho_8GfeGzjz4ajQWutUX5pIW7lhm2Y</a>

Pacote de dados pré-processados para o rio Madeira, baseado em um MDE com 500 metros de resolução e remoção de vegetação	4	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1P_IEXrgp6quBayI2t7vBvhrVUyYK2Fi5?usp=sharing">https://drive.google.com/drive/folders/1P_IEXrgp6quBayI2t7vBvhrVUyYK2Fi5?usp=sharing</a>
Pacote de dados pré-processados para o rio Madeira, baseado em um MDE hidrologicamente condicionado com 90 metros de resolução	4	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1PVowQobel1mY-x1CHzOBxF-RkjrYUaog?usp=sharing">https://drive.google.com/drive/folders/1PVowQobel1mY-x1CHzOBxF-RkjrYUaog?usp=sharing</a>
Funções escritas em VBA para uso no Excel	5.1	<a href="https://drive.google.com/file/d/1Q9tAYi6CbJYQXuoalNigirtb1edBRjSV/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1Q9tAYi6CbJYQXuoalNigirtb1edBRjSV/view?usp=sharing</a>
Sub-rotinas escritas em VBA para uso no Excel	5.2	<a href="https://drive.google.com/file/d/1QDBmMOcho1mhMjmKylWAjoh7NfkiRdWM/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1QDBmMOcho1mhMjmKylWAjoh7NfkiRdWM/view?usp=sharing</a>
Pastas de Trabalho do Excel	5.3 e 6	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1PRigiCJXagxlGuDelCqyDrRhVc1OAnXr?usp=sharing">https://drive.google.com/drive/folders/1PRigiCJXagxlGuDelCqyDrRhVc1OAnXr?usp=sharing</a>
Exemplo de uso de arquivo para calibração do MGB	6	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1QMEFT6mDHkm9odbxPVD97GGiJEK7fKn6?usp=sharing">https://drive.google.com/drive/folders/1QMEFT6mDHkm9odbxPVD97GGiJEK7fKn6?usp=sharing</a>

Observação: Os endereços eletrônicos citados nesta tabela são referentes a consultas feitas no dia 30 de outubro de 2022, podendo ter havido alterações.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia amazônica.** 2018. 90f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19642>. Acesso em: 05 out. 2021.
- ALVES, M. E.; MEYER, A. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico.** HGE, IPH. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020.
- BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 387, p. 33-45, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>.
- BERBERAN-SANTOS, M. N.; BODUNOV, E. N.; POGLIANI, L. On the barometric formula. **Am. J. Phys.**, [s.l.], v. 65, n. 5, p. 404-412, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.18555>.
- BROWN, S.; HUTTON, B.; CLIFFORD, T.; COYLE, D.; GRIMA, D.; WELLS, G.; CAMERON, C. A Microsoft-Excel-based tool for running and critically appraising network meta-analyses – an overview and application of NetMetaXL. **Systematic Reviews**, v.3, p 110, 2014.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** 2001. 270f. Tese (Doutorado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2500>. Acesso em: 05 out. 2021.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrolog. Sci. J.**, [s.l.], v. 52, p. 878-895, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.
- COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A. S. **Manual de Referência Teórica do MGB.** HGE, IPH. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020.
- ESPINOZA, J. C.; GARREAUD, R.; POVEDA, G.; ARIAS, P. A.; MOLINA-CARPIO, J.; MASIOKAS, M.; VIALE, M.; SCAFF, L. Hydroclimate of the Andes part I: main climatic features. **Front. Earth Sci.**, 20 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064>.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica. **RBRH**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>.
- FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE*

RECURSOS HÍDRICOS, 21, 2015, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/304991815\\_UM\\_MAPA\\_DE\\_UNIDADES\\_DE\\_REPOSTA\\_HIDROLOGICA\\_PARA\\_A\\_AMERICA\\_DO\\_SUL](https://www.researchgate.net/publication/304991815_UM_MAPA_DE_UNIDADES_DE_REPOSTA_HIDROLOGICA_PARA_A_AMERICA_DO_SUL). Acesso em: 05 out. 2021.

FÖEGER, L. B.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M. Simulação Hidrológica com propagação inercial de vazão: estudo de caso na bacia do rio Madeira. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337797213\\_SIMULACAO\\_HIDROLOGICA\\_COM\\_PROPAGACAO\\_INERCIAL\\_DE\\_VAZAO\\_ESTUDO\\_DE\\_CASO\\_NA\\_BACIA\\_DO\\_RIO\\_MADEIRA](https://www.researchgate.net/publication/337797213_SIMULACAO_HIDROLOGICA_COM_PROPAGACAO_INERCIAL_DE_VAZAO_ESTUDO_DE_CASO_NA_BACIA_DO_RIO_MADEIRA). Acesso em: 05 out. 2021.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 13-20, 2007.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P. et al. The ERA5 global reanalysis. **Q J R Meteorol Soc**, v. 146, p. 1999-2049, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. **Eos, Transactions, AGU**, [s.l.], v. 89, n. 10, p. 93-94, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>.

LIRA, C. B. M.; MALDONADO, L. H.; KAZAY, D. F. Nova abordagem para determinação de chuva-chave. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: 2019.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos Hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, p. 35-47, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18316/268>.

MEDEIROS, M. S.; FLEISCHMANN, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; CORATI, B. K.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K.; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools. Manual Técnico.** HGE, IPH. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2019.

MEYER, D. Z.; AVERY, L. M. Excel as a qualitative data analysis tool. **Field Methods**, v. 21, p 91-112, 2009. DOI: 10.1177/1525822X08323985.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, [s.l.], v. 21, p. 1-25, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr021001>.

OLIVEIRA, J. I. **O uso de planilhas eletrônicas e da computação em nuvem na gestão de vagas em creche.** 2019. 64f. Dissertação (Especialização em Informática Instrumental para



Professores da Educação Básica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

O'LOUGHLIN, F. E.; PAIVA, R. C. D.; DURAND, M.; ALSDORF, D. E.; BATES, P. D. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sens. Environ.**, [s.l.], v. 182, p. 49-59, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.018>.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 406, p. 170-181, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrol. Processes**, [s.l.], v. 27, p. 333-346, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8425>.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resour. Res.**, [s.l.], v. 49, p. 1226–1243, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, S. A.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P.; SORRIBAS, M.; COLLISCHONN, W. MGB model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 94, p. 1-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.

RATHOD, T.; SINGH, V.; SRIVASTAVA, S. K.; WESLEY, C. J.; ALAM, M. A. Rainfall prediction using co-active neuro fuzzy inference system for umargaon watershed Nagpur India. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, p 658-662, 2018.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. *In*: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**. New York, EUA: McGraw-Hill, 1993, Chapter 5.

SANTOS, M. S.; CASTRO, H. P.; MATOS, A. J. S. **Relatório de atividades Departamento de Hidrologia: Sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Madeira – Relatório anual de operação 2021**. [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22534>. Acesso em: 02 ago. 2022.

SILVA, F. T.; SANTOS, C. R. O. A. Soluções em planilhas eletrônicas para aplicações no ambiente corporativo. **Caderno PAIC**, v.16, p. 669-682, 2015.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>.



SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, [s.l.], v. 22, p. 4815-4842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F. S.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto Stolf – Programa computacional de dados em Excel-VBA. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.38, p. 774-782, 2014.

SOUZA, V. A. D.; MOREIRA, D. M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; RUDKE, A. P. Extreme rainfall events in Amazonia: the Madeira river basin. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 18, apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316>.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 175, p. 339-382, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3).

TUCCI, C. E. M. Fundamentos do escoamento não-permanente. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2007, p. 373-389.

VALENTE, C. N. **Programação em Excel para estatística: Modelo linear e extensões**. 2017. 113f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada à Economia e Gestão) – Universidade de Lisboa. Lisboa, 2017.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **J. Hydrol.**, [s.l.], v. 204, p. 83-97, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00107-8).

# APÊNDICE A: FUNÇÕES

## 8 NASH\_S

Public Function Nash\_S(Dt\_Inicial, dt\_Final, Primeira\_Linha\_Data, Coluna\_Data, Coluna\_Vazao\_Obs, Coluna\_Vazao\_Calc)  
'Clacula o Nash-Sutcliffe, elimina as vazões em branco e menores ou iguais a 0. O pré-requisito desta função é ter uma coluna com datas, outra com valores observados e outras com valores calculado onde os valores calculados e observados devem estar na mesma linha de sua respectiva data.

```
Dim a As Long
Dim Numerador As Double
Dim MediaObs As Double
Dim Soma As Double
Dim Val_Valid As Long
Dim Divisor As Double
'Fórmula do Numerador = SOMA((Qobs (t) -Qcal (t))^2)
a = 0
Numerador = 0
MediaObs = 0
Soma = 0
Val_Valid = 0
Divisor = 0
Do While WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data))
'Verifica se as datas estão dentro do período e elimina brancos e vazões iguais a zero
If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) >= Dt_Inicial And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) <= dt_Final And
Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) > 0 And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc) > 0 And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc)) Then
'Calcula o coeficiente
Numerador = Numerador + (Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) - Cells(Primeira_Linha_Data + a,
Coluna_Vazao_Calc)) ^ 2
Soma = Soma + Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)
Val_Valid = Val_Valid + 1
End If
a = a + 1
Loop
If Val_Valid > 0 Then
MediaObs = Soma / Val_Valid
a = 0
Do While WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data))
If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) >= Dt_Inicial And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) <= dt_Final And
Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) > 0 And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc) > 0 And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc)) Then
Divisor = Divisor + (Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) - MediaObs) ^ 2
End If
a = a + 1
Loop
Nash_S = WorksheetFunction.Round(1 - (Numerador / Divisor), 6)
Else
Nash_S = "SEM DADOS"
End If
End Function
```

## 9 NASH\_LOG

Public Function Nash\_Log(Dt\_Inicial, dt\_Final, Primeira\_Linha\_Data, Coluna\_Data, Coluna\_Vazao\_Obs, Coluna\_Vazao\_Calc)  
'Clacula o Nash-Sutcliffe do Logaritmo das Vazões, elimina as vazões em branco e menores ou iguais a 0. O pré-requisito desta função é ter uma coluna com datas, outra com valores observados e outras com valores calculado onde os valores calculados e observados devem estar na mesma linha de sua respectiva data.

```
Dim a As Long
Dim Numerador As Double
Dim MediaObs As Double
Dim Soma As Double
Dim Val_Valid As Long
Dim Divisor As Double
```

```

Fórmula do Numerador = SOMA((Log(Qobs (t)) -Log(Qcal (t)))^2)
a = 0
Numerador = 0
MediaObs = 0
Soma = 0
Val_Valid = 0
Divisor = 0
Do While WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data))
'Verifica se as datas estão dentro do período e elimina brancos e vazões iguais a zero
If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) >= Dt_Inicial And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) <= dt_Final And
Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) > 0 And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc) > 0 And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc)) Then
    Numerador = Numerador + (WorksheetFunction.Log(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) -
WorksheetFunction.Log(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc))) ^ 2
    Soma = Soma + WorksheetFunction.Log(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs))
    Val_Valid = Val_Valid + 1
End If
a = a + 1
Loop
If Val_Valid > 0 Then
    MediaObs = Soma / Val_Valid
    a = 0
    Do While WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data))
        If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) >= Dt_Inicial And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) <= dt_Final And
Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) > 0 And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc) > 0 And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) And
WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc)) Then
            Divisor = Divisor + (WorksheetFunction.Log(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) - MediaObs) ^ 2
        End If
        a = a + 1
    Loop
    Nash_Log = WorksheetFunction.Round(1 - (Numerador / Divisor), 6)
Else
    Nash_Log = "SEM DADOS"
End If
End Function

```

## 10 CORREL\_P

Public Function Correl\_P(Dt\_Inicial, dt\_Final, Primeira\_Linha\_Data, Coluna\_Data, Coluna\_Vazao\_Obs, Coluna\_Vazao\_Calc)  
'Calcula a Correlação de Pearson(r). O pré-requisito desta função é ter uma coluna com datas, outra com valores observados e outras com valores calculados no mesmo alinhamento onde se deve indicar: Dt\_Inicial (Date), Dt\_Final (Date), Primeira\_Linha\_Data (Número da linha da primeira célula), Coluna\_Data (Número da coluna da data), Coluna\_Vazao\_Obs(Número da coluna da Vazão obs), Coluna\_Vazao\_Calc (Idem)

```

Dim a As Long
Dim LinhaInicial As Long
Dim LinhaFinal As Long
a = 0
LinhaInicial = 0
LinhaFinal = 0
'Verifica se as datas estão em sequência
Do While WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data))
    If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) = Dt_Inicial Then
        LinhaInicial = Primeira_Linha_Data + a
    End If
    If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) = dt_Final Then
        LinhaFinal = Primeira_Linha_Data + a
    End If
    If LinhaFinal > 0 Then
        If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) < Cells(LinhaFinal, Coluna_Data) Then
            Correl_P = "DATAS FORA DE ORDEM"
        End If
    End If
    Exit Function
End If
a = a + 1
Loop
If LinhaInicial = 0 Or LinhaFinal = 0 Then

```

```

Correl_P = "PERÍODO NÃO ENCONTRADO OU DATAS COM FALHA"
Else
Correl_P = WorksheetFunction.Round(WorksheetFunction.Correl(Range(Cells(LinhaInicial, Coluna_Vazao_Obs), Cells(LinhaFinal, Coluna_Vazao_Obs)), Range(Cells(LinhaInicial, Coluna_Vazao_Calc), Cells(LinhaFinal, Coluna_Vazao_Calc))), 6)
End If
End Function

```

## 11 DVPERCET

Public Function dVPerct(Dt\_Inicial, dt\_Final, Primeira\_Linha\_Data, Coluna\_Data, Coluna\_Vazao\_Obs, Coluna\_Vazao\_Calc)  
'Calcula a diferença percentual de volume entre vazões simuladas e observadas , elimina as vazões em branco e menores ou iguais a 0. O pré-requisito desta função é ter uma coluna com datas, outra com valores observados e outras com valores calculado onde os valores calculados e observados devem estar na mesma linha de sua respectiva data.

```

Dim a As Long
Dim SomaQobs As Double
Dim SomaQcal As Double
a = 0
SomaQobs = 0
SomaQcal = 0
Do While WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data))
If Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) >= Dt_Inicial And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) <= dt_Final And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs) > 0 And Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc) > 0 And WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)) And WorksheetFunction.IsNumber(Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc)) Then
SomaQobs = SomaQobs + Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Obs)
SomaQcal = SomaQcal + Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Vazao_Calc)
End If
a = a + 1
Loop
If SomaQobs > 0 And SomaQcal > 0 Then
dVPerct = WorksheetFunction.Round(((SomaQcal - SomaQobs) / SomaQobs) * 100, 2)
Else
dVPerct = "SEM DADOS"
End If
End Function

```

## 12 TRANS\_COTA\_VAZ

Public Function Trans\_Cota\_Vaz(Intervalo\_Codigo, Inter\_Validade\_Inicial, Inter\_Validade\_Final, Inter\_Cota\_Min, Inter\_Cota\_Max, Inter\_CoefA, Inter\_CoefH0, Inter\_CoefN, CelCodigo, CelData, CelCota)  
'Esta fórmula transforma cota em vazão, baseado em uma tabela que contenha as curvas-chave com seus respectivos códigos, validades e tramos

```

Dim Primeira_Linha As Integer
Dim Ultima_Linha As Integer
Dim Coluna_Codigo As Integer
Dim Coluna_Validade_Inicial As Integer
Dim Coluna_Validade_Final As Integer
Dim Coluna_Cota_Min As Integer
Dim Coluna_Cota_Max As Integer
Dim Coluna_CoefA As Integer
Dim Coluna_CoefH0 As Integer
Dim Coluna_CoefN As Integer
Dim a As Long
Dim Resultado As Double
Resultado = -1
Primeira_Linha = Intervalo_Codigo.Row
Ultima_Linha = Intervalo_Codigo.Row - 1 + WorksheetFunction.Count(Intervalo_Codigo) + WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Codigo)
Coluna_Codigo = Intervalo_Codigo.Column
Coluna_Validade_Inicial = Inter_Validade_Inicial.Column
Coluna_Validade_Final = Inter_Validade_Final.Column
Coluna_Cota_Min = Inter_Cota_Min.Column
Coluna_Cota_Max = Inter_Cota_Max.Column
Coluna_CoefA = Inter_CoefA.Column
Coluna_CoefH0 = Inter_CoefH0.Column
Coluna_CoefN = Inter_CoefN.Column

```

```

For a = Primeira_Linha To Ultima_Linha
    If CelCodigo = Cells(a, Coluna_Codigo) And CelData >= Cells(a, Coluna_Validade_Inicial) And CelData <= Cells(a, Coluna_Validade_Final) And CelCota >= Cells(a, Coluna_Cota_Min) And CelCota <= Cells(a, Coluna_Cota_Max) Then
        Resultado = Cells(a, Coluna_CoefA) * (((CelCota / 100) - Cells(a, Coluna_CoefH0)) ^ Cells(a, Coluna_CoefN))
    End If
Next
If Resultado >= 0 Then
    Trans_Cota_Vaz = WorksheetFunction.Round(Resultado, 3)
Else
    Trans_Cota_Vaz = "Curva não encontrada"
End If
End Function

```

## 13 TRANS\_VAZ\_COTA

Public Function Trans\_Vaz\_Cota(Intervalo\_Codigo, Inter\_Validade\_Inicial, Inter\_Validade\_Final, Inter\_Cota\_Min, Inter\_Cota\_Max, Inter\_CoefA, Inter\_CoefH0, Inter\_CoefN, CelCodigo, CelData, CelVaz)  
 Esta fórmula transforma vazão em cota, baseado em uma tabela que contenha as curvas-chave com seus respectivos códigos, validades e tramos

```

Dim Primeira_Linha As Integer
Dim Ultima_Linha As Integer
Dim Coluna_Codigo As Integer
Dim Coluna_Validade_Inicial As Integer
Dim Coluna_Validade_Final As Integer
Dim Coluna_Cota_Min As Integer
Dim Coluna_Cota_Max As Integer
Dim Coluna_CoefA As Integer
Dim Coluna_CoefH0 As Integer
Dim Coluna_CoefN As Integer
Dim a As Long
Dim Resultado As Double
Resultado = -1
Primeira_Linha = Intervalo_Codigo.Row
Ultima_Linha = Intervalo_Codigo.Row - 1 + WorksheetFunction.Count(Intervalo_Codigo) + WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Codigo)
Coluna_Codigo = Intervalo_Codigo.Column
Coluna_Validade_Inicial = Inter_Validade_Inicial.Column
Coluna_Validade_Final = Inter_Validade_Final.Column
Coluna_Cota_Min = Inter_Cota_Min.Column
Coluna_Cota_Max = Inter_Cota_Max.Column
Coluna_CoefA = Inter_CoefA.Column
Coluna_CoefH0 = Inter_CoefH0.Column
Coluna_CoefN = Inter_CoefN.Column
For a = Primeira_Linha To Ultima_Linha
    If CelCodigo = Cells(a, Coluna_Codigo) And CelData >= Cells(a, Coluna_Validade_Inicial) And CelData <= Cells(a, Coluna_Validade_Final) And CelVaz >= Cells(a, Coluna_CoefA) * (((Cells(a, Coluna_Cota_Min) / 100) - Cells(a, Coluna_CoefH0)) ^ Cells(a, Coluna_CoefN)) And CelVaz <= Cells(a, Coluna_CoefA) * (((Cells(a, Coluna_Cota_Max) / 100) - Cells(a, Coluna_CoefH0)) ^ Cells(a, Coluna_CoefN)) Then
        Resultado = 100 * (((CelVaz / (Cells(a, Coluna_CoefA))) ^ (1 / (Cells(a, Coluna_CoefN)))) + (Cells(a, Coluna_CoefH0)))
    End If
Next
If Resultado >= 0 Then
    Trans_Vaz_Cota = WorksheetFunction.Round(Resultado, 0)
Else
    Trans_Vaz_Cota = "Curva não encontrada"
    Trans_Vaz_Cota = ""
End If
End Function

```

## 14 MAXIMOEMINTERVALO

Public Function MaximoEmIntervalo(Intervalo\_Valores, Intervalo\_Maiorq, Celula\_Maiorq, Intervalo\_Menorq, Celula\_Menorq, Intervalo\_Igualq, Celula\_Igualq)  
 'verifica o valor máximo em uma série de dados de acordo com critérios, similar a função SOMASES  
 Dim Primeira\_Linha As Long

```

Dim Ultima_Linha As Long
Dim Coluna_Intervalo_Valores As Long
Dim Coluna_Intervalo_Maiorq As Long
Dim Coluna_Intervado_Menorq As Long
Dim Coluna_Intervado_Igualq As Long
Dim a As Long
Dim Resultado As Double
Resultado = -99999999#
Primeira_Linha = Intervalo_Valores.Row
Ultima_Linha = Intervalo_Valores.Row - 1 + WorksheetFunction.Count(Intervalo_Valores) +
WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Valores)
Coluna_Intervalo_Valores = Intervalo_Valores.Column
Coluna_Intervalo_Maiorq = Intervalo_Maiorq.Column
Coluna_Intervado_Menorq = Intervado_Menorq.Column
Coluna_Intervado_Igualq = Intervado_Igualq.Column
For a = Primeira_Linha To Ultima_Linha
    If Cells(a, Coluna_Intervalo_Maiorq) >= Celula_Maiorq And Cells(a, Coluna_Intervado_Menorq) <= Celula_Menorq And Cells(a,
Coluna_Intervado_Igualq) = Celula_Igualq And Cells(a, Coluna_Intervalo_Valores) > Resultado Then
        Resultado = Cells(a, Coluna_Intervalo_Valores)
    End If
Next
If Resultado > -99999999# Then
    MaximoEmIntervalo = Resultado
End If
End Function

```

## 15 MAXIMOEMINTERVALO\_2

Public Function MaximoEmIntervalo\_2(Intervalo\_Valores, Intervalo\_Maiorq, Celula\_Maiorq, Intervado\_Menorq, Celula\_Menorq)  
'verifica o valor máximo em uma série de dados de acordo com critérios, similar a função MaximoEmIntervalo porém sem o controle de igual

```

Dim Primeira_Linha As Long
Dim Ultima_Linha As Long
Dim Coluna_Intervalo_Valores As Long
Dim Coluna_Intervalo_Maiorq As Long
Dim Coluna_Intervado_Menorq As Long
Dim a As Long
Dim Resultado As Double
Resultado = -99999999#
Primeira_Linha = Intervalo_Valores.Row
Ultima_Linha = Intervalo_Valores.Row - 1 + WorksheetFunction.Count(Intervalo_Valores) +
WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Valores)
Coluna_Intervalo_Valores = Intervalo_Valores.Column
Coluna_Intervalo_Maiorq = Intervalo_Maiorq.Column
Coluna_Intervado_Menorq = Intervado_Menorq.Column
For a = Primeira_Linha To Ultima_Linha
    If Cells(a, Coluna_Intervalo_Maiorq) >= Celula_Maiorq And Cells(a, Coluna_Intervado_Menorq) <= Celula_Menorq And Cells(a,
Coluna_Intervalo_Valores) > Resultado Then
        Resultado = Cells(a, Coluna_Intervalo_Valores)
    End If
Next
If Resultado > -99999999# Then
    MaximoEmIntervalo_2 = Resultado
End If
End Function

```

## 16 MINIMOEMINTERVALO\_2

Public Function MinimoEmIntervalo\_2(Intervalo\_Valores, Intervalo\_Maiorq, Celula\_Maiorq, Intervado\_Menorq, Celula\_Menorq)  
'verifica o valor máximo em uma série de dados de acordo com critérios, similar a função MaximoEmIntervalo porém sem o controle de igual

```

Dim Primeira_Linha As Long
Dim Ultima_Linha As Long
Dim Coluna_Intervalo_Valores As Long
Dim Coluna_Intervalo_Maiorq As Long
Dim Coluna_Intervado_Menorq As Long

```

```

Dim a As Long
Dim Resultado As Double
Resultado = 999999999#
Primeira_Linha = Intervalo_Valores.Row
Ultima_Linha = Intervalo_Valores.Row - 1 + WorksheetFunction.Count(Intervalo_Valores) +
WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Valores)
Coluna_Intervalo_Valores = Intervalo_Valores.Column
Coluna_Intervalo_Maiorq = Intervalo_Maiorq.Column
Coluna_Intervalo_Menorq = Intervalo_Menorq.Column
For a = Primeira_Linha To Ultima_Linha
    If Cells(a, Coluna_Intervalo_Maiorq) >= Celula_Maiorq And Cells(a, Coluna_Intervalo_Menorq) <= Celula_Menorq And Cells(a,
Coluna_Intervalo_Valores) < Resultado Then
        Resultado = Cells(a, Coluna_Intervalo_Valores)
    End If
Next
If Resultado < 999999999# Then
    MinimoEmIntervalo_2 = Resultado
End If
End Function

```

## 17 PROCVALE

```

Public Function ProcvAle(Valor_Procurado, Intervalo_Valor_Procurado, Intervalo_Valor_Desejado, Primeiro_ou_Ultimo)
'Faz um PROCV em qualquer direção e entre colunas justas, separadas ou em outra planilha
'A última variável deve ter o valor 1 ou 2. Primeiro valor encontrado = 1. Último Valor encontrado = 2.
    Dim Primeira_Linha_Intervalo_Valor_Procurado As Long
    Dim Ultima_Linha_Intervalo_Valor_Procurado As Long
    Dim Coluna_Intervalo_Valor_Procurado As Long
    Dim Primeira_Linha_Intervalo_Valor_Desejado As Long
    Dim Coluna_Intervalo_Valor_Desejado As Long
    Dim a As Long
    Dim b As Long
    Dim Valor_Encontrado As Variant
    Primeira_Linha_Intervalo_Valor_Procurado = Intervalo_Valor_Procurado.Row
    Ultima_Linha_Intervalo_Valor_Procurado = Intervalo_Valor_Procurado.Row - 1 +
WorksheetFunction.Count(Intervalo_Valor_Procurado) + WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Valor_Procurado)
    Coluna_Intervalo_Valor_Procurado = Intervalo_Valor_Procurado.Column
    Primeira_Linha_Intervalo_Valor_Desejado = Intervalo_Valor_Desejado.Row
    Coluna_Intervalo_Valor_Desejado = Intervalo_Valor_Desejado.Column
    b = 0
    For a = Primeira_Linha_Intervalo_Valor_Procurado To Ultima_Linha_Intervalo_Valor_Procurado
        If Cells(a, Coluna_Intervalo_Valor_Procurado) = Valor_Procurado Then
            Valor_Encontrado = Cells(Primeira_Linha_Intervalo_Valor_Desejado + b, Coluna_Intervalo_Valor_Desejado)
            If Primeiro_ou_Ultimo = 1 Then
                Exit For
            End If
        End If
        b = b + 1
    Next
    If Valor_Encontrado <> "" Then
        ProcvAle = Valor_Encontrado
    End If
End Function

```

## 18 PROCVSES

```

Public Function ProcvSes(Valor_Procurado, Intervalo_Valor_Procurado, Intervalo_Valor_Desejado, Celula_Maiorq, Celula_Menorq,
Intervalo_Igualq, Celula_Igualq, Primeiro_ou_Ultimo)
'Faz um PROCV em qualquer direção e entre colunas justa ou separadas, porém devem ter a mesma linha inicial e final. A procura é limitada
a um intervalo existente entre dois parâmetros, bem como igual a outro
'A última variável deve ter o valor 1 ou 2. Primeiro valor encontrado = 1. Último Valor encontrado = 2 ou qualquer outro número.
    Dim Primeira_Linha As Long
    Dim Ultima_Linha As Long
    Dim Coluna_Intervalo_Valor_Procurado As Long
    Dim Coluna_Intervalo_Valor_Desejado As Long
    Dim Coluna_Intervalo_Igualq As Long

```

```

Dim a As Long
Dim Valor_Encontrado As Variant
Primeira_Linha = Intervalo_Valor_Procurado.Row
Ultima_Linha = Intervalo_Valor_Procurado.Row - 1 + WorksheetFunction.Count(Intervalo_Valor_Procurado) +
WorksheetFunction.CountBlank(Intervalo_Valor_Procurado)
Coluna_Intervalo_Valor_Procurado = Intervalo_Valor_Procurado.Column
Coluna_Intervalo_Valor_Desejado = Intervalo_Valor_Desejado.Column
Coluna_Intervado_Igualq = Intervado_Igualq.Column
For a = Primeira_Linha To Ultima_Linha
    If Cells(a, Coluna_Intervalo_Valor_Procurado) = Valor_Procurado And Cells(a, Coluna_Intervalo_Valor_Desejado) >= Celula_Maiorq
And Cells(a, Coluna_Intervalo_Valor_Desejado) <= Celula_Menorq And Cells(a, Coluna_Intervado_Igualq) = Celula_Igualq Then
        Valor_Encontrado = Cells(a, Coluna_Intervalo_Valor_Desejado)
        If Primeiro_ou_Ultimo = 1 Then
            Exit For
        End If
    End If
Next
If Valor_Encontrado <> "" Then
    ProcvSes = Valor_Encontrado
End If
End Function

```



## APÊNDICE B: SUB-ROTINAS

### 19 MGB\_BIN\_TO\_EXEL

```
Public Sub MGB_Bin_to_Exel(Nome_Arquivo_Bin As String, Celula_inicial As Range, Numero_De_Bacias As Long)
'Este código faz a leitura de arquivos binários de Imput e Output do MGB
  Dim Num_De_Dias As Long
  Dim Num_Arquivo_Memoria As Integer
  Num_De_Dias = ((FileLen(Nome_Arquivo_Bin) / 4) / Numero_De_Bacias)
'Criação da matriz com linhas=minibacias e colunas=dias
  ReDim Matriz_Temp(1 To Numero_De_Bacias, 1 To Num_De_Dias) As Single
  Num_Arquivo_Memoria = FreeFile()
'Abre o arquivo binário e preenche a matriz
  Open Nome_Arquivo_Bin For Binary Access Read As #Num_Arquivo_Memoria
  Get #Num_Arquivo_Memoria, , Matriz_Temp
  Close #Num_Arquivo_Memoria
  Dim a As Integer
  Dim c As Long
'Preenche a planilha do Excel
  For a = 1 To Numero_De_Bacias
    For c = 1 To Num_De_Dias
      Celula_inicial.Cells(c, a) = Matriz_Temp(a, c)
    Next
  Next
End Sub
```

### 20 TRANS\_VAZAO\_BIN

```
Public Sub Trans_Vazao_Bin(Nome_Arquivo_Bin As String, Celula_inicial As Range, Numero_De_Bacias As Long, Mini_n1 As Integer,
Optional Mini_2 As Integer = -1, Optional Mini_3 As Integer = -1, Optional Mini_4 As Integer = -1, Optional Mini_5 As Integer = -1,
Optional Mini_6 As Integer = -1, Optional Mini_7 As Integer = -1, Optional Mini_8 As Integer = -1, Optional Mini_9 As Integer = -1,
Optional Mini_10 As Integer = -1)
'Este código faz a leitura de dados binários de até 10 minibacias, sendo necessário indicar o arquivo binário, célula que iniciará o resultado,
numero de minibacias e pelo menos uma minibacia desejada
  Dim Num_De_Dias As Long
  Dim Num_Arquivo_Memoria As Integer
'Coloca o número das minibacias nos vetores
  Dt_Minis = Array(Mini_n1, Mini_2, Mini_3, Mini_4, Mini_5, Mini_6, Mini_7, Mini_8, Mini_9, Mini_10)
  Num_De_Dias = ((FileLen(Nome_Arquivo_Bin) / 4) / Numero_De_Bacias)
  ReDim Matriz_Temp(1 To Numero_De_Bacias, 1 To Num_De_Dias) As Single
  Num_Arquivo_Memoria = FreeFile()
  Open Nome_Arquivo_Bin For Binary Access Read As #Num_Arquivo_Memoria
  Get #Num_Arquivo_Memoria, , Matriz_Temp
  Close #Num_Arquivo_Memoria

  Dim a As Integer
  Dim b As Integer
  Dim c As Long
  b = UBound(Dt_Minis)
  For a = 0 To b
    If Dt_Minis(a) > 0 Then
      For c = 1 To Num_De_Dias
        Celula_inicial.Cells(c, a + 1) = Matriz_Temp(Dt_Minis(a), c)
      Next
    Else
      Exit For
    End If
  Next
End Sub
```

## 21 EXEL\_TO\_MGB\_PBI

Public Sub Exel\_to\_MGB\_pbi(Nome\_Bin\_Export As String, Num\_De\_Dias As Long, Numero\_De\_Bacias As Long, Celula\_inicial As Range)

'Este arquivo exporta dados do Excel para o formato binário lido pelo MGB. Normalmente utilizado para os dados de chuva.

```
Dim Num_Arquivo_Memoria_Export As Integer
Dim Caminho As String
Caminho = Nome_Bin_Export & ".pbi"
ReDim Matriz_Temp(1 To Numero_De_Bacias, 1 To Num_De_Dias) As Single
Dim a As Long
Dim c As Long
For a = 1 To Numero_De_Bacias
    For c = 1 To Num_De_Dias
        Matriz_Temp(a, c) = Celula_inicial.Cells(c, a)
    Next
Next
Num_Arquivo_Memoria_Export = FreeFile()
Open Caminho For Binary Access Write As #Num_Arquivo_Memoria_Export
Put #Num_Arquivo_Memoria_Export, Matriz_Temp
Close #Num_Arquivo_Memoria_Export
End Sub
```

## 22 GERAR\_PERMANENCIA

Public Sub Gerar\_Permanencia(Nome\_Bin\_Import As String, Nome\_Bim\_Export As String, data\_inicial As Date, Numero\_De\_Bacias As Long, Permanencia As Integer)

'Faz a conversão dos dados binários para o formato do Excel, calcula a permanência para cada dia do ano para cada minibacia e repõe a série substituindo o dado de cada dia e de cada mini bacia pelo dado encontrado.

```
Application.ScreenUpdating = False
' Cria uma nova aba
Worksheets.Add(After:=Worksheets(Worksheets.Count)).Name = "Temporaria"
Set Temp = Worksheets("Temporaria")
Dim Num_De_Dias As Long
Dim Num_Arquivo_Memoria As Integer
Dim Num_Arquivo_Memoria_Export As Integer
Dim data_fim As Date
Dim Caminho As String
Dim numero_anos As Integer
Num_De_Dias = ((FileLen(Nome_Bin_Import) / 4) / Numero_De_Bacias)
data_fim = data_inicial + Num_De_Dias - 1
numero_anos = Year(data_fim) - Year(data_inicial) + 1
Caminho = Nome_Bim_Export & ".pbi"
Dim a As Integer
Insere os dados em uma tabela com dia e mês usando o ano de 2020, por ser bissexto. Distribui os dados ao longo dos anos que estão no cabeçalho das colunas
For a = 1 To 366
    Temp.Range("G2").Cells(a, 1) = #1/1/2020# + a - 1
Next
For a = 1 To numero_anos
    Temp.Range("H1").Cells(1, a) = Year(data_inicial) + a - 1
Next
For a = 1 To Num_De_Dias
    Temp.Range("D1").Cells(a, 1) = data_inicial + a - 1
    Temp.Range("C1").Cells(a, 1) = Year(data_inicial + a - 1)
    Temp.Range("B1").Cells(a, 1) = Month(data_inicial + a - 1)
    Temp.Range("A1").Cells(a, 1) = Day(data_inicial + a - 1)
Next
ReDim Matriz_Temp(1 To Numero_De_Bacias, 1 To Num_De_Dias) As Single
Num_Arquivo_Memoria = FreeFile()
Open Nome_Bin_Import For Binary Access Read As #Num_Arquivo_Memoria
Get #Num_Arquivo_Memoria, Matriz_Temp
Close #Num_Arquivo_Memoria
Dim b As Integer
Dim c As Long
For b = 1 To Numero_De_Bacias
    Temp.Columns("E:F").ClearContents
    Temp.Range("H2:AV367").ClearContents
```

```

    For c = 1 To Num_De_Dias
        Temp.Range("E1").Cells(c, 1) = Matriz_Temp(b, c)
    Next
    Insere fórmulas do Excel
    Range("H2").FormulaR1C1 =
    "=SUMIFS(R1C5:R14610C5,R1C1:R14610C1,DAY(RC7),R1C2:R14610C2,MONTH(RC7),R1C3:R14610C3,R1C)"
    Range("H2").AutoFill Destination:=Range("H2:AU2"), Type:=xlFillDefault
    Range("H2:AU2").AutoFill Destination:=Range("H2:AU367")
    For a = 1 To numero_anos
        If Range("H61").Cells(1, a) = 0 Then
            Range("H61").Cells(1, a) = ""
        End If
    Next
    Faz o cálculo do percentil para cada dia de acordo com a permanência escolhida
    Range("AV2").FormulaR1C1 = "=PERCENTILE(RC[-40]:RC[-1], " & 1 - (Permanencia / 100) & ")"
    Range("AV2").AutoFill Destination:=Range("AV2:AV367")
    Range("F1").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DATE(2020,RC[-4],RC[-5]),R2C7:R367C48,42,FALSE)"
    Range("F1").AutoFill Destination:=Range("F1:F14610")
    For c = 1 To Num_De_Dias
        Matriz_Temp(b, c) = Temp.Range("F1").Cells(c, 1)
    Next
    Next
    Num_Arquivo_Memoria_Export = FreeFile()
    Open Caminho For Binary Access Write As #Num_Arquivo_Memoria_Export
    Put #Num_Arquivo_Memoria_Export, , Matriz_Temp
    Close #Num_Arquivo_Memoria_Export
    Application.DisplayAlerts = False
    Worksheets("Temporaria").Delete
    Application.DisplayAlerts = True
    Application.ScreenUpdating = True
    If b > Numero_De_Bacias Then
        MsgBox "Simulacao finalizada em " & b - 1 & " minibacias."
    Else
        MsgBox "Simulacao finalizada em " & b & " minibacias."
    End If
End Sub

```

## 23 INSERIR\_DATAS

```

Public Sub Inserir_datas(Dt_Inicial, dt_Final, Primeira_Linha_Data, Coluna_Data)
    'Esta rotina insere todas as datas em ordem crescente entre a inicial (Date) e final (Date) em uma coluna (Iniciada pela célula
    Primeira_Linha_Data(Integer), Coluna_Data (Integer))
    Dim a As Integer
    Dim b As Integer
    If Dt_Inicial < dt_Final Then
        b = dt_Final - Dt_Inicial
        For a = 0 To b
            Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data) = Dt_Inicial + a
        'Por padrão, este código insere só as datas. Para inserir os dias, meses e anos em colunas separadas anteriores à coluna da data é necessário
        retirar a indicação de comentário nas linhas de comando a seguir.
        'Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data - 1) = Year(Dt_Inicial + a)
        'Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data - 2) = Month(Dt_Inicial + a)
        'Cells(Primeira_Linha_Data + a, Coluna_Data - 3) = Day(Dt_Inicial + a)
        Next
    Else
        MsgBox ("Olhe suas datas Iniciais e Finais")
    End Sub
Exit Sub
End If
End Sub

```

## 24 ANOS\_SERIE\_DATA

```

Public Sub anos_serie_data(Dt_Inicial, dt_Final, Primeira_celula)
    'Esta rotina extrai a sequencia de anos entre uma data final e inicial e a coloca numa coluna com início na célula escolhida
    Dim Primeira_Linha As Integer
    Dim Coluna_Data As Integer

```

```
Primeira_Linha = Primeira_celula.Row
Coluna_Data = Primeira_celula.Column
Dim a As Integer
Dim b As Integer
If Dt_Inicial <= dt_Final Then
    b = Year(dt_Final) - Year(Dt_Inicial)
    For a = 0 To b
        Cells(Primeira_Linha + a, Coluna_Data) = Year(Dt_Inicial) + a
    Next
Else
    MsgBox ("Olhe suas datas Iniciais e Finais")
Exit Sub
End If
End Sub
```



ProfÁgua



ProfÁgua - Mestrado Profissional em Rede Nacional em  
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos  
[www.profagua.unir.br](http://www.profagua.unir.br)  
Campus Ji-Paraná da Universidade Federal de Rondônia  
Rua Rio Amazonas, 351 - Jardim dos Migrantes, Ji-Paraná -  
RO, 76900-726