



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO  
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS**

**MOISÉS CORREIA FREITAS**

**PLATAFORMA COMPUTACIONAL INTEGRADA PARA MODELAGEM  
HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COM DADOS GEOESPACIAIS**

**SUMÉ - PB  
2022**

**MOISÉS CORREIA FREITAS**

**PLATAFORMA COMPUTACIONAL INTEGRADA PARA MODELAGEM  
HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COM DADOS GEOESPACIAIS**

**Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.**

**Área de Concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos.**

**Linha de Pesquisa: Ferramentas Aplicadas aos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos.**

**Orientador: Prof. Dr. John Elton de Brito Leite Cunha.**

**SUMÉ - PB**

**2022**



F886p Freitas, Moisés Correia.

Plataforma computacional integrada para modelagem hidrológica e hidrodinâmica com dados geoespaciais. / Moisés Correia Freitas. - 2022.

75 f.

Orientador: Professor Dr. John Elton de Brito Leite Cunha.

Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA.

1. Modelagem hidrológica. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. Plataforma computacional - modelagem. 4. Hidrologia. 5. Dados geoespaciais. 6. Geotecnologias. 7. Modelos hidrodinâmicos. 8. Sensoriamento remoto. 9. Algoritmo computacional. 10. Linguagem MATLAB. 11. Software de modelagem hidrológica. 12. Hidrograma. 13. Método de Muskingum I. Cunha, John Elton de Brito Leite. II. Título.

CDU: 628.1(043.2)

**MOISÉS CORREIA FREITAS**

**PLATAFORMA COMPUTACIONAL INTEGRADA PARA MODELAGEM  
HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COM DADOS GEOESPACIAIS**

**Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Professor Dr. John Elton de Brito Leite Cunha  
Orientador – UAEP/CDSA/UFCG**

---

**Professor Dr. Renato de Oliveira Fernandes.  
Examinador Externo – Universidade Federal do Cariri - URCA**

---

**Professor Dr. Hugo Moraes de Alcântara.  
Examinador Interno – UATEC/CDSA/UFCG**

**Trabalho aprovado em: 09 de agosto de 2022.**

**SUMÉ - PB**

Aos meus pais, familiares, amigos, a minha esposa  
Gésica e minhas três filhas Elloá, Luna e Maya.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, familiares e amigos pelo apoio e compreensão nos momentos de dificuldade.

Ao Prof. Dr. John Elton de Brito Leite Cunha, pela orientação, motivação, dedicação e competência em todas as etapas da elaboração do trabalho, muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Hugo Morais de Alcântara, pela colaboração importante na minha formação durante o curso de Pós-Graduação, muito obrigado.

Aos professores Dr. Gustavo Barbosa Lima da Silva, Profa. Dra. Andrea Brasiliano Silva e Prof. Dr. Clovis Dias, pela amizade e pela importante colaboração em minha formação acadêmica, durante minha graduação na UFPB.

Ao apoio para realização deste trabalho por meio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, em nível de Mestrado, na Categoria Profissional, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Aos professores e servidores do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA), por toda dedicação, empenho, competência e profissionalismo. Muito obrigado.

À Universidade Federal de Campina Grande – UFCG e ao Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido – CDSA pelo apoio técnico.

O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido ficar crianças toda a vida.

Albert Einstein.

## RESUMO

Os avanços tecnológicos, em particular o crescente aumento no poder de processamento dos computadores e difusão do sensoriamento remoto através dos dados geoespaciais, permitiu o desenvolvimento de modelos hidrológicos robustos, eficientes e práticos, criando ferramentas indispensáveis para tomada de decisão. Estas ferramentas tem contribuído para aumentar a eficiência do gerenciamento e regulação dos recursos hídricos. Tradicionalmente, os *softwares* de modelagem hidrodinâmica difundidos no meio acadêmico utilizam formulações da hidrologia e da hidráulica, impondo a utilização de dois ou mais aplicativos nas análises voltadas para tomada de decisão. Tendo em vista o tempo despendido no aprendizado e aplicação destes *softwares*, além dos inúmeros problemas gerados nas conexões e entrelaçamentos das informações geradas, torna-se viável a criação de um aplicativo que integre os dados geoespaciais com os modelos hidrodinâmicos. Assim, o objetivo principal desse estudo foi desenvolver um *software* que possibilite a operação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos com dados geoespaciais. Para esse fim, na criação do algoritmo computacional, utilizou-se a linguagem de programação MATLAB (*MATrix LABoratory*) por possuir uma gama de ferramentas, *toolboxes* que permitem realizar inúmeras operações matemáticas. O *software* construído, processa o modelo numérico do terreno para extrair os parâmetros físicos da bacia hidrográfica. Possibilita o cálculo do tempo de concentração e estima a chuva de projeto aplicando a equação clássica de chuvas intensas. A determinação do hidrograma de projeto é realizada com os métodos do hidrograma unitário sintético triangular do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS). As funções hidrodinâmicas permitem o dimensionamento dos dispositivos hídricos e simulação da onda de cheia em canais naturais ou artificiais. Duas opções são apresentadas ao operador, aplicação da equação de Manning ou método Muskingum. Ao aplicar Manning, é possível escolher uma modelagem que despreza as contribuições laterais e considera o escoamento permanente e uniforme ao longo do trecho observado. O método de Muskingum despreza os efeitos originados pela equação da quantidade de movimento, baseando-se na equação da continuidade e nas relações existentes entre o armazenamento prismático e em cunha durante o avanço da cheia. Ressalta-se, que o usuário também pode realizar as simulações de transformação chuva-vazão na bacia hidrográfica, executando o módulo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) acoplado. O *software* criado demonstra potencial para integrar a modelagem hidrológica com modelos hidrodinâmicos em uma única aplicação, mostrando-se um instrumento de grande valia durante a compreensão dos processos físicos do ciclo da água, tanto na simulação como na previsão dos fluxos d'água em uma bacia hidrográfica. A construção da interface permite uma operação intuitiva, mesmo para usuários com pouco experiência com *software* com modelagem hidrologia e hidrodinâmica que usam dados geoespaciais, exhibe os resultados de maneira compreensível ao usuário e processa diversos cálculos matemáticos intrínsecos.

**Palavras-chave:** Dados geoespaciais; Modelagem hidrológica; Modelos hidrodinâmicos.

FREITAS, Moisés Correia. **Integrated computational platform for hydrological and hydrodynamic modeling with geospatial data**. 2022. 75 f. (Dissertação) Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, PROFÁGUA, Universidade Federal de Campina Grande - Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido – Sumé - Paraíba - Brasil, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/26876>

## ABSTRACT

Technological advances, in particular the growing increase in computer processing power and the diffusion of remote sensing through geospatial data, allowed the development of robust, efficient and practical hydrological models, creating indispensable tools for decision making. These tools have contributed to increasing the efficiency of the management and regulation of water resources. Traditionally, hydrodynamic modeling software disseminated in the academic environment uses formulations of hydrology and hydraulics, imposing the use of two or more applications in analyzes aimed at decision making. Considering the time spent in learning and applying these software, in addition to the numerous problems generated in the connections and intertwining of the generated information, it becomes feasible to create an application that integrates geospatial data with hydrodynamic models. Thus, the main objective of this study was to develop software that allows the operation of hydrological and hydrodynamic models with geospatial data. For this purpose, in the creation of the computational algorithm, the programming language MATLAB (MATrix LABoratory) was used because it has a range of tools, toolboxes that allow performing numerous mathematical operations. The software built processes the numerical model of the terrain to extract the physical parameters of the watershed. It makes it possible to calculate the concentration time and estimate the design rain by applying the classical equation of heavy rains. The determination of the project hydrograph is performed using the Natural Resources Conservation Service (NRCS) triangular synthetic unit hydrograph methods. The hydrodynamic functions allow the dimensioning of water devices and simulation of the flood wave in natural or artificial channels. Two options are presented to the operator, application of the Manning equation or the Muskingum method. By applying Manning, it is possible to choose a model that neglects the lateral contributions and considers the steady and uniform flow along the observed section. Muskingum's method ignores the effects caused by the momentum equation, based on the continuity equation and on the relationships between prismatic and wedge storage during the flood advance. It should be noted that the user can also perform rainfall-runoff transformation simulations in the watershed, executing the coupled SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) module. The software created demonstrates the potential to integrate hydrological modeling with hydrodynamic models in a single application, proving to be a valuable instrument for understanding the physical processes of the water cycle, both in the simulation and in the prediction of water flows in a hydrographic basin. The construction of the interface allows an intuitive operation, even for users with little experience with hydrology and hydrodynamics modeling software that uses geospatial data, displays the results in a user-understandable way and processes several intrinsic mathematical calculations.

**Keywords:** Geospatial data; Hydrological modeling; Hydrodynamic models.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> - Possíveis direções de fluxo.....                                    | 21 |
| <b>Figura 2</b> - Área de Contribuição.....   | 21 |
| <b>Figura 3</b> - Hidrograma Unitário Sintético triangular do NRCS.....               | 28 |
| <b>Figura 4</b> - Hipóteses Método de Muskingum.....                                  | 32 |
| <b>Figura 5</b> - Estrutura e variáveis do modelo SMAP na versão diária.....          | 35 |
| <b>Figura 6</b> - Princípios de Scrum.....  | 37 |
| <b>Figura 7</b> - Planejamento de Sprints.....  | 38 |
| <b>Figura 8</b> - Representação gráfica da calha do rio.....                          | 50 |
| <b>Figura 9</b> - Obtenção da área molhada.....                                       | 52 |
| <b>Figura 10</b> - Obtenção do perímetro molhado.....                                 | 52 |
| <b>Figura 11</b> - Obtenção da área molhada, utilizado pelo algoritmo desenvolvido... | 55 |
| <b>Figura 12</b> - Geração dos rios da imagem SRTM.....                               | 60 |
| <b>Figura 13</b> - Delimitação da bacia hidrográfica.....                             | 61 |
| <b>Figura 14</b> - Cálculo do tempo de concentração.....                              | 62 |
| <b>Figura 15</b> - Seleção da curva IDF.....  | 63 |
| <b>Figura 16</b> - Exportação da bacia hidrográfica para o formato KML.....           | 64 |
| <b>Figura 17</b> - Bacia hidrográfica em KML.....                                     | 64 |
| <b>Figura 18</b> - Exibição do hidrograma de projeto.....                             | 65 |
| <b>Figura 19</b> - Hidrograma de projeto para cada tempo de retorno informado.....    | 66 |
| <b>Figura 20</b> - Tela inicial do software desenvolvido para o módulo SMAP.....      | 67 |
| <b>Figura 21</b> - Iniciando a Calibração do Modelo.....                              | 67 |
| <b>Figura 22</b> - Importar dados de arquivos de Excel(*.xlsx) .....                  | 68 |
| <b>Figura 23</b> - Nova interface aplicação da modelagem hidrodinâmica.....           | 68 |
| <b>Figura 24</b> - Delimitação do trecho do rio analisado e seções transversais.....  | 69 |
| <b>Figura 25</b> - Obtenção dos dados topográficos para cada seção transversal.....   | 70 |
| <b>Figura 26</b> - Áreas inundadas para cada tempo de retorno selecionado.....        | 71 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**APP** – Área de Preservação Permanente

**IDF**– Intensidade Duração e Frequência

**MATLAB** – MATrix LABoratory

**RNA** – Rede Neural Artificial

**NRCS** – Natural Resources Conservation Service

**CDSA** – Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>   | <b>17</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....   | 17        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 17        |
| <b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>18</b> |
| 3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA.....              | 20        |
| <b>3.1.1 Direção do Fluxo.....</b>  | <b>20</b> |
| <b>3.1.2 Área de Drenagem.....</b>  | <b>21</b> |
| 3.2 CÁLCULO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....                                       | 21        |
| 3.3 ESTIMATIVA DA CHUVA DE PROJETO.....   | 23        |
| 3.4 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA.....  | 24        |
| 3.5 HIDROGRAMA DE PROJETO.....  | 26        |
| 3.6 DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE DRENAGEM.....                           | 28        |
| 3.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA SIMPLIFICADA.....                                   | 30        |
| 3.8 MODELO CHUVA VAZÃO SMAP.....  | 34        |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>   | <b>36</b> |
| 4.1 METODOLOGIA ÁGIL SCRUM.....   | 37        |
| 4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA.....              | 39        |
| 4.3 CÁLCULO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....                                       | 39        |
| 4.4 ESTIMATIVA DA CHUVA DE PROJETO.....   | 39        |
| 4.5 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA.....  | 40        |
| 4.6 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMA DE PROJETO.....                                    | 41        |
| 4.7 MODELO CHUVA-VAZÃO SMAP.....  | 41        |
| <b>4.7.2 Escoamento Superficial.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>4.7.3 Evapotranspiração Real.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>4.7.4 Recarga Subterrânea.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>4.7.5 Reservatório de Solo.....</b>  | <b>44</b> |
| <b>4.7.6 Reservatório Superficial.....</b>                                      | <b>45</b> |
| <b>4.7.7 Escoamento Básico (Eb).....</b>  | <b>46</b> |
| <b>4.7.8 Reservatório Subterrâneo.....</b>                                      | <b>46</b> |
| <b>4.7.9 Influência dos Parâmetros do SMAP.....</b>                             | <b>46</b> |
| <b>4.7.10 Str - Capacidade de saturação do solo (mm).....</b>                   | <b>46</b> |
| <b>4.7.11 K2t - Constante de recessão do escoamento superficial (dias).....</b> | <b>47</b> |
| <b>4.7.12 Crec - Parâmetro de recarga subterrânea (%).....</b>                  | <b>47</b> |
| <b>4.7.13 Ai - abstração inicial (mm).....</b>                                  | <b>47</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.7.14 Capc - Capacidade de campo (%).....</b>                          | <b>48</b> |
| <b>4.7.15 Kkt - Constante de recessão do escoamento básico (dias).....</b> | <b>48</b> |
| <b>4.7.16 Algoritmo do Modelo SMAP.....</b>                                | <b>48</b> |
| 4.8 DADOS TOPOGRÁFICOS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.....                        | 48        |
| 4.9 APLICAÇÃO MODELAGEM HIDRODINÂMICA SIMPLIFICADA.....                    | 49        |
| <b>4.9.1 Modelagem Escoamento Permanentes e Uniformes.....</b>             | <b>49</b> |
| <b>4.9.2 Regressão polinomial de grau “n”.....</b>                         | <b>50</b> |
| <b>4.9.3 Procedimentos aplicados e considerações de cálculo.....</b>       | <b>51</b> |
| <b>4.9.4 Problemas na obtenção dos limites de integração a e b.....</b>    | <b>53</b> |
| <b>4.9.5 Modelagem Hidrodinâmica.....</b>                                  | <b>55</b> |
| <b>5 RESULTADOS.....</b>   | <b>59</b> |
| 5.1 PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA.....                          | 59        |
| 5.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....   | 61        |
| 5.3 ELABORAÇÃO DA CHUVA DE PROJETO.....                                    | 62        |
| 5.4 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA.....                                     | 63        |
| 5.5 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMA DE PROJETO.....                               | 64        |
| 5.6 MODELO CHUVA-VAZÃO SMAP.....   | 66        |
| 5.7 DADOS TOPOGRÁFICOS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.....                        | 68        |
| 5.8 MODELAGEM HIDRODINÂMICA SIMPLIFICADA.....                              | 70        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>72</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>74</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos, permitiram ao homem transformar áreas improdutivas e inóspitas, em espaços adequados para o convívio humano, em virtude do desenvolvimento de estruturas que possibilitaram o controle de cheia, retenção de água para uso humano, armazenamento para geração de energia elétrica e dispositivos que retardam o efeito das cheias nas margens de rios (FCTH,1999). Na concepção dessas estruturas tornam-se necessário o estudo de diversas áreas, das quais se destacam os estudos geotécnicos e morfológicos, hidrológicos e topográficos. Estes estudos são fontes de informação para elaborar à caracterização e classificação dos solos, determinar o deflúvio, quantificar precipitação e evaporação (REIS *et al.* 2016).

O geoprocessamento trouxe avanços significativos para os estudos topográficos e morfológicos de bacias hidrográficas. Essas informações são essenciais na otimização do comportamento hídrico dos dispositivos de drenagem, especialmente para avaliar soluções mais econômicas ou áreas que oferecem maior risco a ocupação humana (KURKDJIAN e PEREIRA, 2006).

A utilização e o desenvolvimento de modelos hidrológicos destinados à previsão de variáveis hidrológicas têm se intensificado, principalmente dos modelos estocásticos e determinísticos. Esta tendência na utilização destes modelos, pode ser explicado pela variabilidade espacial e temporal dos processos hidrológicos, inconsistência dos dados disponíveis para análise e pelos sistemas apresentarem comportamento fortemente não-lineares (FORTUNATO, 2010). Os modelos estocásticos tentam entender o funcionamento das séries por relações entre as variáveis de entrada e de saída do sistema, fazendo a previsão com um certo erro estocástico (MORAES, 2003), os modelos determinísticos representam os fenômenos físicos de maior relevância no processo em estudo, por equações matemáticas com variáveis que tentam representar as características condicionantes do processo (CAMPOS, 2009).

Os resultados obtidos pelos dois métodos possuem uma margem aceitável de erro, entretanto, requerem o conhecimento do comportamento e características da bacia em estudo, exigindo experiência do usuário no processo de calibração manual, uma quantidade significativa de dados e técnicas matemáticas avançadas na

calibração automática (COLLISCHONN E TUCCI, 2003). A calibração desses modelos é um processo demorado e subjetivo, que exige, muitas vezes, o levantamento de informações hidrológicas que nem sempre se encontram disponíveis (TUCCI, 2005). Essa ausência de informações pode ser responsável pela adoção de modelos simplificados com formulações empíricas, o que acaba interferindo nos resultados obtidos (SANTOS, 2009).

A utilização de uma metodologia mais precisa, exige o planejamento no monitoramento dos parâmetros físicos da bacia, além é claro, do levantamento das características morfológicas e topográficas da área. O monitoramento da precipitação, evaporação, infiltração e escoamento superficial deve ser realizado ao menos por 10 anos, para que se possa obter dados com representatividade dos fenômenos (TUCCI, 2004). Por outro lado, o levantamento das características morfológicas e morfométricas será mais prolongado, quanto maior for à área de drenagem. A caracterização morfométrica é uma etapa essencial na estimativa da quantidade de água disponibilizada em uma bacia hidrográfica, permitindo o desenvolvimento de cenários que melhor aproveitam os recursos naturais e possibilita identificar as limitações quanto aos usos (SILVA *et al.*, 2014; FRAGA *et al.*, 2014).

O sensoriamento remoto por satélite, aliado às técnicas de processamento de imagens, possibilitou um aumento na eficiência dos métodos automáticos de extração das variáveis morfométricas de bacias (BRITO; PRUDENTE, 2005). Desta forma, tornou-se possível desenvolver ferramentas mais robustas para as análises hidrológicas e ambientais, possibilitando o planejamento do uso e ocupação de solo e o manejo adequado das bacias hidrográficas, otimizando-se o potencial hídrico, garantindo estabilidade e segurança para um desenvolvimento sustentável em consonância com as condições socioambientais e econômicas da região.

A consolidação e popularização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e das ferramentas computacionais, facilitaram o desenvolvimento de aplicativos que almejam conectar os conceitos hidrológicos e as formulações desenvolvidas na hidráulica (KURKDJIAN, 2006). Entretanto, essas modelagens acabam sendo realizadas separadamente, a maioria dos *softwares* existentes não apresentam ferramentas que possibilitem o desenvolvido conjunto da análise hidrológica, hidrodinâmica e suas parametrizações a partir de técnicas de geoprocessamento. Desta forma, no dimensionamento de dispositivos de drenagem, como um simples

bueiro celular, vários *softwares* são utilizados até que se obtenha as informações necessárias para conclusão do projeto.

Desenvolver um *software* de fácil utilização que integra modelos hidrológicos e hidrodinâmicos com dados geoespaciais para modelagem em bacias hidrográficas com pouco monitoramento, torna-se fundamental para a implementação dos Instrumentos da Política de Recursos Hídricos no Brasil. Esta ferramenta é de grande importância para o processo de tomada de decisão do poder público na gestão dos recursos hídricos, permitindo, a identificação das áreas de risco de inundações, delimitação das áreas de preservação permanente e simulação de cheias em zonas urbanas e rurais.

Assim, o desafio desta pesquisa é desenvolver um *software* para usuários não familiarizados com linguagem de programação, possuindo uma interface intuitiva e de fácil utilização, que requer apenas uma padronização nos dados de entrada, para o pleno funcionamento, podendo ser utilizado na obtenção dos dados morfométricos, estimativa de vazões e simulação de uma onda de cheia, auxiliando dimensionamento de dispositivos de drenagem urbana, além de conseguir mapear as áreas de risco de inundações, áreas de preservação permanente e simular os eventos de cheias em rios e canais urbanos e rurais.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Simplificar os procedimentos para modelagem hidrológica e hidrodinâmica com o desenvolvimento de uma interface computacional de preparação e processamento de dados geoespaciais.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Ferramenta computacional para caracterização morfométrica de bacias hidrográficas urbanas e rurais a partir de dados geoespaciais.
2. Ferramenta computacional de simulação hidrológica para eventos de cheia em diferentes períodos de retorno capaz de ser parametrizado com os dados obtido no módulo de caracterização morfométrica.
3. Ferramenta computacional de simulação hidrodinâmica capaz de receber os parâmetros obtidos nos módulos de caracterização morfométrica e simulação hidrológica.
4. Ferramenta computacional de geração de relatórios (tabelas e mapas) para os estudos de hidrologia e hidrodinâmico.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para se determinar o potencial hídrico de uma bacia hidrográfica geralmente utiliza-se o balanço hídrico, metodologia, que necessita de informações como precipitação, vazão, evapotranspiração, infiltração, geralmente na escala mensal. Para obtenção da vazão, por exemplo, é muito comum o uso de modelos Chuva-Vazão em virtude da maior disponibilidade dos dados de precipitação, entretanto para calibração dos modelos torna-se necessário, no mínimo 10 anos de informações de vazões no curso d'água (TUCCI, 2004).

Uma modelagem bem difundida ultimamente no meio científico, são as Redes Neurais Artificiais (RNA). Ferramentas matemáticas inspiradas no comportamento do cérebro humano, a partir do entendimento de que as funções neurais biológicas, incluindo a memória, são armazenadas nos neurônios e nas conexões entre eles, e que o processo de aprendizado consiste em estabelecer novas conexões entre neurônios ou modificar as conexões existentes.

Um dos aspectos que tem motivado o uso frequente de RNA em diversos campos da ciência, particularmente em estudos de modelagem e previsão de séries temporais, é a sua capacidade comprovada de representar adequadamente relações fortemente não-lineares entre variáveis (BRAGA, 2007). Por meio dessa técnica, a dependência entre variáveis de entrada e saída de um sistema pode ser modelada por uma combinação de muitas funções matemáticas não-lineares, o que pode levar a uma representação de sistemas complexos com uma precisão aceitável. Sua utilização assim como no caso dos modelos Chuva-Vazão requer no mínimo 10 anos de informações de vazões, para que se possa treinar e verificar a rede formulada (GOMES, 2010).

No Brasil, as bacias hidrográficas de pequeno e médio porte não possuem, em sua maioria, monitoramento de vazão, evaporação, infiltração, entre outras variáveis hidrológicas. A falta de dados hidrometeorológicos observados impede a utilização de qualquer um dos métodos citados acima, fazendo com que o hidrólogo utilize modelagens simplistas, com formulações empíricas em sua base. Determinado por muitas vezes, uma curva IDF (Intensidade Duração e Frequência), utilizando apenas um posto pluviométrico que possui dados suficiente, valer-se de equações empíricas para determinação do tempo de concentração da bacia e por fim, fazer uso do método

racional ou NRCS (*Natural Resources Conservation Service*) para estimativa das vazões dos rios.

A utilização de uma metodologia mais precisa, exige o planejamento no monitoramento dos parâmetros físicos da bacia, além é claro, do levantamento das características morfológicas e topográficas da área. Por outro lado, o levantamento das características morfológicas e topográficas será mais prolongado, quanto maior for à área de drenagem. Seja em pequenas bacias, com área menor ou igual a 1 km<sup>2</sup>, médias com área de 1 km<sup>2</sup> a 10.000 km<sup>2</sup>, ou mesmo em bacias grandes com área superior a 10.000 km<sup>2</sup> (BECK *et al.*, 2013), a única certeza que se tem no desenvolvimento de um modelo hidrológico que represente com mais precisão os efeitos de uma chuva na bacia, é que o preciosismo requer tempo.

Diante desse cenário, percebe-se que existem duas abordagens comumente utilizadas para simulação de uma onda de cheia em trechos de rios. A primeira modelagem com base empírica (MORIASI, 2012), considera as bacias hidrográficas com o mínimo de monitoramento, a seguinte sequência no fluxo de trabalho pode ser utilizada:

1. Determinação dos Parâmetros Físicos da Bacia Hidrográfica;
2. Cálculo do Tempo de Concentração;
3. Estimativa da Chuva de Projeto;
4. Determinação da Chuva Efetiva;
5. Estimativa do Hidrograma de Projeto;
6. Dimensionamento dos Dispositivos de Drenagem;
7. Modelagem Hidrodinâmica Simplificada;

Já a segunda formulação, consiste em um modelo matemático determinístico e conceitual, que simula os processos hidrológicos possibilitando a estimativa indireta da probabilidade de ocorrência de valores de vazão em função de dados históricos de precipitação, possibilitando o dimensionamento das estruturas hidráulicas (COLLISCHONN;TUCCI, 2005). Nesse caso, pode-se aplicar a seguinte abordagem na nova modelagem:

1. Estimativa da Chuva de Projeto;

2. Determinação da Chuva Efetiva;
3. Calibração e Validação do Modelo;
4. Modelagem Hidrodinâmica Simplificada;

Nas duas situações propostas, os modelos hidrológicos são discretos e pontuais, tais simplificações possibilitam a utilização da ferramenta desenvolvida em pequenas e médias bacias hidrográficas. Desta forma, nesta seção serão observados os fundamentos teóricos destas duas abordagens, como forma de apresentar o fluxo de trabalho requerido.

### 3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA

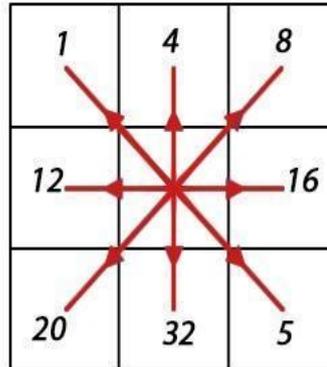
Na modelagem hidrológica torna-se necessário a obtenção dos parâmetros físicos da bacia, comprimentos dos rios, declividade média da bacia, áreas acumuladas de drenagem, desnível entre o exutório e os pontos localizados nas nascentes, caracterização do solo e seu uso. A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), consistiu no acoplamento de um sistema de radar modificado que voou a bordo do ônibus espacial, adquirindo dados de altimetria estereoscópica combinando duas técnicas através de dois sensores, a interferometria e a Radar de abertura sintética (SAR), obtendo um modelo digital do terreno, sendo possível o processamento dos dados topográficos em *softwares* SIG.

A disponibilização das imagens SRTM em paralelo com os avanços tecnológicos, sobretudo no desenvolvimento dos aparatos de *hardware* e *software* componentes do Sistema de Informação Geográfica (SIG), aliados com a popularização e facilidade de utilização permitiu a obtenção dos parâmetros físicos da bacia de maneira rápida e eficiente, derivando diversas informações do modelo numérico do terreno (MNT) (JENSON, 1991).

#### 3.1.1 Direção do Fluxo

A direção do fluxo é encontrada através do MNT, utilizando o algoritmo proposto por Paz *et al.* (2006). No algoritmo, cada pixel drena para um dos oitos vizinhos, direcionando o escoamento para o pixel que possui a maior declividade.

**Figura 1** – Possíveis direções de fluxo.

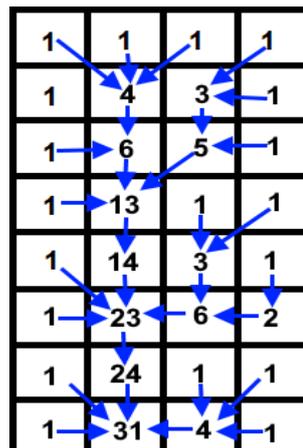


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Área de Drenagem

Para obtenção da área acumulada, registra-se em cada pixel o somatório das áreas de todos os pixels a montante. Esse cálculo é obtido com a soma das áreas de superfícies dos pixels, a área acumulada é definida em cada pixel pela propagação acumulada das áreas de superfície de seus vizinhos.

**Figura 2** – Área de Contribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 CÁLCULO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de concentração ( $t_c$ ) da bacia hidrográfica (TUCCI, 2005), pode ser definido como o tempo que a gotícula de água mais distante da bacia leva para chegar

ao exutório. O tempo de concentração, muitas das vezes é utilizado para definir a duração da chuva, uma vez que igualando o tempo de duração da chuva ao tempo de concentração garante-se que toda a área de drenagem contribui para foz, ao mesmo tempo que se evita simular chuvas com longa duração, o que acaba por diminuir a intensidade das chuvas de projeto. Diversas formulações empíricas foram criadas ao longo do tempo, todas visando correlacionar os parâmetros físicos da bacia hidrográfica com o tempo de percurso das partículas do líquido das nascentes à foz. De todas as formulações existentes, escolheu-se as mais difundidas no meio acadêmico e que estão apresentadas nas equações de 1 a 5.

- Fórmula Califórnia Culverts Practice

$$[REDACTED]$$

(1)

onde:

L – Comprimento do rio principal da bacia (km);

H – Desnível entre o ponto mais elevado da bacia e o exutório (m).

- Fórmula de Dooge

$$[REDACTED]$$

(2)

onde:

A – Área de drenagem da bacia (km<sup>2</sup>);

S – Declividade média da bacia (m/m).

- Fórmula de Kirpich

$$[REDACTED]$$

(3)

onde:

L – Comprimento do rio principal da bacia (km);

S – Declividade média da bacia (m/m).

- NRCS – Método Cinemático



(4)

onde:

L – Comprimento do rio principal da bacia (m);

v – Velocidade média do rio principal da bacia no estirão (m/s).

- Ribeiro



(5)

onde:

L – Comprimento do rio principal da bacia (km);

p – Percentagem da bacia com cobertura vegetal (entre 0 e 1);

S – Declividade média da bacia (m/m).

### 3.3 ESTIMATIVA DA CHUVA DE PROJETO

As chuvas de projetos representam uma distribuição temporal sintética da precipitação nos modelos hidrológicos. Possui papel primordial na modelagem hidrológica, podendo ser a principal variável de entrada, condicionado o volume infiltrado, na bacia hidrográfica em estudo e o hidrograma de escoamento superficial. De acordo com os estudos desenvolvidos por Aron & Adl (1992), trata-se de uma ferramenta de fácil utilização por necessitar de poucos dados para sua aplicação, tendo papel importante em bacias hidrográficas carentes em monitoramento, entretanto conceitualmente simplifica os processos hidrológicos, supondo uma linearidade no sistema, repercutindo em vazões de pico e volumes escoados superestimados.

Com todos os avanços obtidos com a modelagem computacional, as chuvas de projeto ainda são utilizadas, por necessitarem de uma pequena quantidade de informações para obtenção do hietograma e no dimensionamento das estruturas drenantes ser considerado eventos críticos de escoamento e não simulações reais dos eventos climáticos. Para elaboração do hietograma utilizou-se a seguinte formulação matemática:

- Forma clássica da Equação de Chuvas Intensas (IDF)



(6)

onde:

i – Intensidade de chuva (mm/h);

Tr – Tempo de recorrência (anos);

t – Duração (minutos);

k, a, b, c - Parâmetros constantes para cada posto.

As chuvas estimadas pela formulação da curva IDF, considera a chuva constante no tempo, aceitável em bacias pequenas, mas inaplicáveis à medida que se aumenta o tamanho da bacia hidrográfica, tornando-se necessário uma redistribuição temporal da precipitação. Dentre as inúmeras metodologias de simulação dos padrões naturais da variabilidade temporal dos eventos de precipitação, destaca-se os métodos dos Blocos Alternados (citado por ZAHED & MARCELLINI, 1995), hietograma triangular (YEN & CHOW, 1980), método de Chicago (KEIFER & CHU, 1957), método de Pilgrim & Cordery (1975) e Bureau of Reclamation (TUCCI, 1993).

Em virtude da facilidade de aplicação em bacias hidrográficas com baixo monitoramento hidrológico, optou-se por utilizar a metodologia dos Blocos Alternados. O método divide a duração do evento de chuva em intervalos iguais, calcula o total precipitado para cada um destes intervalos e reordena o padrão para as divisões de intervalos utilizados, colocando o intervalo de maior intensidade no intervalo de tempo central do evento, na sequência distribui os outros incrementos em ordem decrescente a esquerda e a direita do intervalo de maior intensidade.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA

Os processos físicos envolvidos na geração de escoamento superficial, são em sua maioria, complexos e de difícil mensuração. Durante um evento de precipitação, observa-se a ocorrência de retenção da chuva na copa das árvores, a chamada abstração inicial, infiltração e percolação no solo, preenchimento das depressões topográficas, saturação do solo, escoamento de base, evapotranspiração todos

variando espacialmente e no tempo, oscilando inclusive na observância de um evento para outro em função das condições iniciais. Memos com os avanços nos modelos hidrológicos, advinda principalmente da evolução computacional das últimas décadas, representar comportamento com tendências caóticas, requer o monitoramento de inúmeros eventos, gerando uma gama de informações em escalas de tempo e espaciais cada vez menores, formando um conjunto de informações com proporção inversa, cada vez maior quanto menores forem as escalas temporais e espaciais, acarretando em uma infinidade de variáveis com infinitas conexões entre elas, aumentando demasiadamente o custo computacional. A simplificação dos modelos torna-se necessária, seja por redução no processamento numérico ou pela ausência de dados da área em estudo. Ao considerar o cenário de escassez de dados monitorados na maior parte das bacias hidrográficas, torna-se pertinente a aplicação dos métodos racional ou do NRCS.

- Método Racional

Método indireto apresentado em 1951 por William Thomas Mulvany, sendo amplamente utilizado em pequenas áreas de drenagem, por sua facilidade de aplicação. Recomenda-se sua utilização em bacias de 2 km<sup>2</sup> (TUCCI, 2005), por considerar o tempo de duração da chuva igual ao tempo de concentração, chuva constante no tempo e distribuída uniformemente em toda bacia. Além de considerar o coeficiente de deflúvio único e constante para toda bacia. Sua formulação é exposta a seguir:

$$Q = C.i.A/360 \quad (7)$$

onde:

Q – Vazão de Cheia (m<sup>3</sup>/s);

C – Coeficiente de escoamento superficial;

i – Intensidade da Chuva de Projeto (mm/hora);

A – Área de bacia hidrográfica de contribuição (ha);

- Método do NRCS (Natural Resources Conservation Service, USDA)

A separação de escoamento no método NRCS, ocorre de maneira semelhante a metodologia utilizada no método racional. Ambos os modelos, consideram as parcelas interceptada pela vegetação, evapotranspiração e infiltração, representados de forma conjunta através de parâmetros, agora denominados de *Curve Number* (CN) e as perdas iniciais  $I_a$ . O parâmetro adimensional CN, pode assumir valores que variam de 0 a 100, onde 0 representa um solo com capacidade infinita de absorção e 100 representa um solo impermeável. As perdas iniciais como será abordado, usualmente representam aproximadamente 20% do valor de S. As equações que definem o método são:

$$\text{[Redacted Equation]} \quad (8)$$

$$\text{[Redacted Equation]} \quad (9)$$

$$\text{[Redacted Equation]} \quad (10)$$

onde:

Q – Chuva efetiva acumulada (mm);

P – Precipitação acumulada (mm);

$I_a$  – Lâmina de abstração inicial (mm);

S – Armazenamento máximo de água na camada superficial do solo (mm);

K – Percentual de S definido como abstração inicial (em geral assumido como igual a 0,2).

### 3.5 HIDROGRAMA DE PROJETO

#### 3.5.1 Hidrograma Unitário

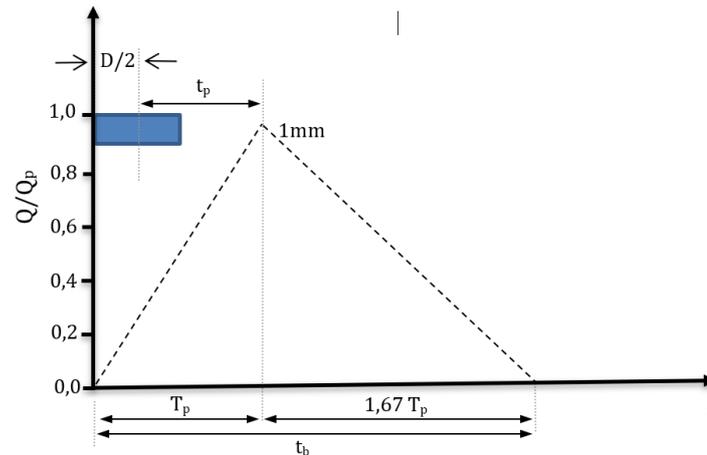
Uma bacia hidrográfica pode ser definida como um sistema de conversão de chuva em vazão (W. COLLISCHONN e F. DORNELLES, 2013), que de forma resumida, comuta a soma precipitada em frações distintas, divididas entre a parcela retida pela vegetação, infiltrada no solo e a chuva que gera o escoamento superficial. A resposta na geração de vazão ocasionada por uma chuva efetiva, varia em função

das características físicas da bacia, intensidade e duração do evento. Sucessivas análises em hidrogramas, revelaram que chuvas de mesma intensidade e duração, tendem a produzir variações de vazão no decorrer do tempo semelhantes, enquanto, chuvas mais intensas tendem a gerar variações de vazão acentuadas, com pico maior, em oposição ao que ocorre na observância das gerações proporcionadas por chuvas de intensidade menores que refletem em hidrogramas atenuados, com pico de vazão menor.

Observada a relação entre a intensidade da chuva e a vazão máxima registrada, admite-se que existe uma relação linear entre a chuva efetiva e vazão gerada, essa consideração torna-se necessária para simplificação na análise e compreensão do fenômeno. Modelar processos naturais esbarram em gamas infinitas de dados e relações não-lineares como mencionado anteriormente, sem as premissas simplificadoras não haveria formulações matemáticas que ao menos tentam compreender e quantificar os eventos naturais. Assim, conceitualmente a teoria do Hidrograma Unitário (HU), considera a existências de uma relação linear entre a chuva efetiva e a vazão, que a precipitação efetiva e unitária possui intensidade de duração constante durante toda sua duração, além de considerar uma distribuição uniforme por toda a área de drenagem. Tais premissas, permitem a utilização dos princípios da proporcionalidade e superposição nas vazões obtidas, sendo possível encontrar o hidrograma do escoamento direto de uma precipitação unitária na bacia.

### **3.5.2 Hidrograma Unitário Sintético triangular do NRCS**

Encontrar bacias hidrográficas que possuam dados consistentes com período expressivos de tempo, que possibilitem a confecção do Hidrograma Unitário raramente acontece. Na prática o hidrólogo utiliza de metodologias que formulam Hidrogramas Unitários Sintéticos, com base nos estudos realizados em diversas bacias hidrográficas com monitoramento, permitindo assim, encontrar padrões entre as variáveis envolvidas nos processos, derivando as formulações matemáticas que tentam representar o comportamento do fenômeno estudado. No presente trabalho, utilizou-se a metodologia do Hidrograma Unitário Sintético triangular do NRCS (*Natural Resources Conservation Service*):

**Figura 3** – Hidrograma Unitário Sintético triangular do NRCS.

Fonte: Adaptada de W. Collischonn e F. Dornelles (2013).

$$t_p = 0,6 \cdot t_c \quad (11)$$

$$T_p = t_p + \frac{D}{2} \quad (12)$$

$$t_b = T_p + 1,67 \cdot T_p \quad (13)$$

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A}{T_p} \quad (14)$$

onde:

$t_p$  – Tempo de pico do hidrograma;

$T_p$  – Tempo de subida do hidrograma (h);

$t_b$  – Tempo de base do hidrograma (h);

$q_p$  – Vazão de pico ( $\frac{m^3}{s} \cdot \frac{1}{mm}$ );

$A$  – Área da Bacia ( $km^2$ );

### 3.6 DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE DRENAGEM

Uma vez estimadas as vazões de cheias de rios, deve-se encontrar alguma formulação matemática que permita avaliar a distribuição da água nas seções transversais dos rios, por consequência, a junção dessas informações ao longo de um percurso, permite a estimativa da repercussão das vazões extremas nas margens do corpo d'água. A modelagem mais simplista que se pode fazer, em virtude da limitação de dados comprovada, é considerar o escoamento permanente e uniforme, com tais exposições é possível utilizar a equação de Manning (equação 15).



(15)

Em que  $Q$ ,  $n$ ,  $A$ ,  $R$  e  $I$  representam os parâmetros de vazão ( $m^3/s$ ), coeficiente de rugosidade, área da seção transversal ( $m^2$ ), raio hidráulico ( $m$ ), declividade média do canal ( $m/m$ ), respectivamente. Em seções transversais de forma planas conhecidas, como por exemplo, retângulos, trapézios, triângulos e círculos a determinação da relação entre o perímetro molhado e a área molhada, necessárias para aplicação da formulação de Manning, é solucionada fixando uma das duas dimensões da figura geométrica, o que possibilita a obtenção da outra, aplicando esse valor arbitrado na formulação matemática que a define. Tal solução resolve a grande maioria dos dimensionamentos de canais, vertedouros, bueiros, calhas, sarjetas, entre outros. Entretanto, as calhas dos rios não possuem uma forma constante e regular, muito menos uma forma definida.

Com o auxílio de softwares como o AutoCAD, AutoCAD Civil 3D e Revit é possível obter tanto a área, como perímetro molhado da seção com a utilização de um ou dois comandos, basta considerar um nível inicial para água na calha do rio e fixar um incremento, que será acrescido repetidas vezes até que toda a seção transversal seja preenchida pelo líquido.

O maior problema com essa sistemática, é de fato, a quantidade significativa de tentativas que serão realizadas antes que se obtenha a vazão desejada. Caso seja necessário realizar tal procedimento, em várias transversais, a gama de informações requer uma grande organização, além de um tempo significativo. A equação de Manning é de fácil aplicação em figuras planas, como mencionado, contudo, quando a seção transversal do canal possui um formato irregular e aleatório, cálculo diferencial e de integral devem ser utilizados na obtenção do raio hidráulico, necessário para sua aplicação. Derivadas e integrais de funções, na maioria das vezes, são de fácil obtenção, raramente torna-se necessário a utilização de métodos numéricos para suas soluções.

Uma rotina computacional, consegue solucionar todos os problemas envolvidos na organização dos dados citados, entretanto desenvolver um algoritmo que

identifique padrões e certas dualidades envolvidas no cálculo científico, onera tempo e dedicação do programador.

### 3.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA SIMPLIFICADA

A propagação de cheia em rios ocorre de maneira rápida se movendo de montante para jusante transportando massa e momentum, perturbando as variáveis hidrodinâmicas como vazões, velocidade e nível d'água. Ao longo do trecho do rio analisado, observa-se a conversão da energia cinética e potencial associada às partículas do fluido em movimento, em basicamente energia térmica e sonoras, provocada principalmente pelas perdas de energia devido a viscosidade do fluido e o atrito existente entre a camada líquida o fundo e as laterais do canal. Em cada seção transversal observada do rio, pode-se verificar a elevação do nível da água em decorrência da onda de cheias, ocorrendo com uma defasagem de tempo (LEITÃO, 2018).

O fenômeno de propagação de cheia em canais naturais é complexo, mesmo considerando que não haja contribuição dos afluentes na simulação, a variabilidade espacial de características como a largura da calha do rio, declividade do canal, rugosidade da superfície de contato, aliadas com a variação temporal da vazão, velocidade, área molhada e perímetro molhado geram um grande banco de informações necessárias para a aplicação das equações gerais de Saint-Venant, além de exigir um considerável esforço matemáticos, tornando-se impraticável (PORTO, 2006).

Na prática, a comprovada ausência de monitoramento das bacias hidrográficas, levam a simplificações das equações Saint-Venant. Em sua maioria, a não contabilizar os efeitos gerados pela equação da quantidade de movimento, desprezando efeitos da gravidade, pressão, inércia e atrito. De fato, a representação do escoamento em um trecho de rio com declividades baixas, apenas considerando a equação da continuidade, representando o fenômeno com os conceitos de prisma de armazenamento e cunha de armazenamento, é razoável. Entretanto nas cabeceiras e regiões de altas declividades, a propagação e atenuação da onda de cheia pelo armazenamento temporário na calha principal e nas áreas de inundação, deixa de ponderar parcelas mais convincentes no escoamento (PAIVA e GETIRANA, 2013).

As simplificações são necessárias, e plausíveis na maioria das situações, fomentando o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos unidimensionais, fazendo com que as variáveis  $y$  e  $z$  do escoamento sejam variáveis dependentes de  $x$ , ou seja, em um escoamento unidirecional as únicas variáveis independentes são a variável  $x$  e o tempo. Sendo considerado as seguintes hipóteses para o escoamento não permanente em canais:

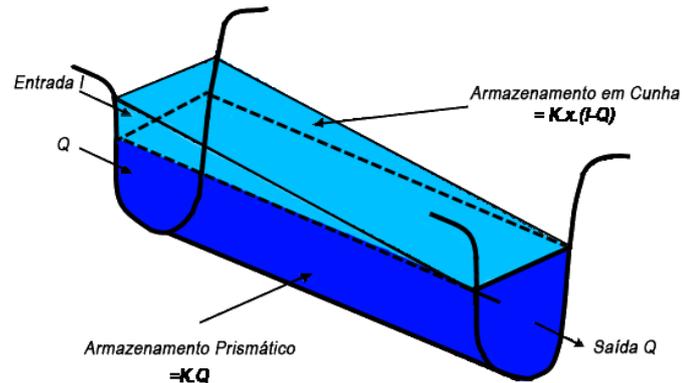
1. Escoamento unidimensional;
2. Distribuição de Pressão Hidrostática, considerando declividade menores do que 10 % (BAPTISTA e LARA, 2010);
3. Canal com declividade menor do que 15 % (FREAD, 1993);
4. Fluido Incompressível e homogêneo;
5. Perda de Carga no regime variado computada pela equação de Manning, definida para um regime permanente e uniforme;
6. Funções contínuas em relação ao tempo  $t$  e o espaço  $x$ ;

Uma modelagem muito utilizada ao simplificar as formulações matemáticas que regem o comportamento do escoamento de um fluido em canais onde o regime é não permanente, em virtude de sua comprovada facilidade de aplicação em bacias hidrográficas com ausência de informação, é o Método de Muskingum (MCCARTHY, 1938).

### **3.7.1 Método de Muskingum**

O método de Muskingum foi desenvolvido por McCarthy em 1938, tendo como base as observações de trabalhos realizados no controle de cheias na bacia do rio Muskingum, derivando assim o seu nome. O método permite a estimativa do hidrograma a jusante de um canal, fornecendo-se como entrada o hidrograma a montante. Sua formulação matemática despreza os efeitos originados pela equação da quantidade de movimento, sendo exclusivamente baseado na equação da continuidade e nas relações existentes entre o armazenamento prismático e em cunha durante o avanço da cheia.

**Figura 4** – Hipóteses do método de Muskingum.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A metodologia proposta por McCarthy parte diretamente da compreensão da equação da continuidade em um volume de controle e da suposição que existe uma relação entre o armazenamento, em um dado instante de tempo, e as vazões de entrada e de saída. Sendo assim:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (16)$$

$$S = f(I, Q) \quad (17)$$

onde:

$\frac{dS}{dt}$  = Variação do armazenamento com o tempo;

I = Vazão de Entrada;

Q = Vazão de Saída;

S = Armazenamento é função de I e Q;

Armazenamento Prismático = K.Q;

Armazenamento em Cunha = K.X.(I-Q);

K e X são parâmetros;

Logo o armazenamento S será a soma entre o armazenamento Prismático e o em Cunha. Simplificando as relações entre o armazenamento (S) e a vazão:

$$S = K. [X.I + (1 - X). Q] \quad (18)$$

As equações propostas no método de Muskingum podem ser resolvidas numericamente através de uma solução por diferenças finitas, onde:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \qquad \frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+\Delta t}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{2} \quad (19)$$

Sendo S:

$$S_{t+\Delta t} = K. [X. I_{t+\Delta t} + (1 - X). Q_{t+\Delta t}] \quad (20)$$

$$S_t = K. [X. I_t + (1 - X). Q_t] \quad (21)$$

Substituindo as expressões encontradas na equação 19, pelas formulações das equações 20 e 21, pode-se representar a vazão de saída pela expressão matemática apresentadas nas equações de 22 a 26.

$$Q_{t+\Delta t} = C1. I_{t+\Delta t} + C2. I_t + C3. Q_t \quad (22)$$

onde:

$$C1 = \frac{\Delta t - 2.K.X}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad (23)$$

$$C2 = \frac{\Delta t + 2.K.X}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad (24)$$

$$C3 = \frac{2.K.(1-X) - \Delta t}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad (25)$$

$$C1 + C2 + C3 = 1 \quad (26)$$

Ao aplicar a formulação apresentada, deve-se garantir que os parâmetros K e o intervalo de tempo  $\Delta t$  tenham a mesma unidade, horas ou dias. Além de respeitar os limites introduzidos pela Equação 27, entre os parâmetros K, X e  $\Delta t$ , de maneira que não se estime vazões com valores negativos.

$$X \leq \frac{\Delta t}{2K} \leq (1 - X) \quad (27)$$

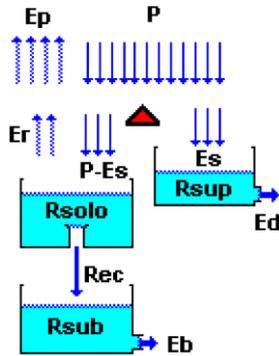
As formulações matemáticas proposta por McCarthy, possibilitam propagar uma onda de cheia em um trecho de rio sendo necessário apenas as vazões de entrada e os parâmetros K e X para um dado intervalo de tempo  $\Delta t$  previamente fixado. Entretanto, conforme explicitado anteriormente, as considerações impostas durante as simplificações de cálculo desconsideram os efeitos de remanso a jusante provocados pelo preenchimento de depressões, obstruções ou barragens.

Outro ponto que chama a atenção é a sensibilidade do método aos valores introduzidos aos parâmetros K e X, que em muitos casos, torna-se mais adequado à obtenção por calibração, caso a bacia possua hidrogramas de entrada e saída. Na ausência de monitoramento, deve-se utilizar as formulações introduzidas por Cunge (1969), que possibilita a estimativas dos parâmetros K e X, com base em características físicas do rio, como rugosidade, declividade, largura do canal e o comprimento do trecho em análise.

### 3.8 MODELO CHUVA VAZÃO SMAP

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) faz a transformação da chuva em vazão em uma bacia hidrográfica por meio matemático, aproximando os eventos físicos de maior relevância envolvidos no processo, dos balanços hídricos em três reservatórios distintos, com base na equação da continuidade. Os reservatórios representam de maneira simplificada o acúmulo de água no solo ( $R_{solo}$ ), na superfície ( $R_{sup}$ ), no subterrâneo ( $R_{sub}$ ) da bacia, ao se exceder a capacidade máxima dos respectivos reservatórios o modelo propõe a formação das parcelas de recarga subterrânea (Rec), escoamento direto ( $E_d$ ) e do escoamento básico ( $E_b$ ) respectivamente. Na Figura 5 pode-se observar a estrutura do modelo e apresenta as variáveis envolvidas em sua versão diária.

**Figura 5** - Estrutura e variáveis do modelo SMAP na versão diária.



Rsolo = Reservatório do solo (zona aerada)  
 Rsup = Reservatório da superfície da bacia  
 Rsub = Reservatório subterrâneo (zona saturada)  
 P = Chuva  
 Es = Escoamento superficial  
 Ed = Escoamento direto  
 Ep = Evapotranspiração potencial  
 Er = Evapotranspiração real  
 Rec = Recarga subterrânea  
 Eb = Escoamento básico

**Fonte:** Adaptada de Fonte Lopes (1982).

De acordo com Lopes (1999), o modelo SMAP faz a simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, de maneira determinística sendo necessário para o seu funcionamento dados de chuva, evaporação e tipo de solo.

## 4 METODOLOGIA

O *software* foi desenvolvido, a partir de rotinas matemáticas que auxiliam os projetistas no dimensionamento dos dispositivos de micro e macrodrenagem urbana, em bacias hidrográficas que não possuem monitoramento dos parâmetros hidrológicos. As rotinas matemáticas são necessárias no desenvolvimento de uma modelagem hidrológica com maior precisão nas estimativas das vazões e compreensão dos fenômenos físicos relacionados no processo de transformação de chuva em vazão. Desta forma, fez-se uso da linguagem de programação MATLAB (*MATrix LABoratory*) em todos os algoritmos criados e na interface gerada.

A plataforma de desenvolvimento disponibilizada no MATLAB, permite a integração simultânea entre a produção da interface e as respectivas rotinas matemáticas intrínsecas em cada botão, caixa de diálogo e todas as demais formas de interação com o usuário, além de possuir bibliotecas com infinitudes de *toolboxes* ou *blocksets* com extensões que possibilitam a resolução de problemas numéricos com poucas linhas de programação e de forma eficiente, poupando tempo de escrita no código fonte e no processamento dos resultados, quando comparado com programas semelhantes em linguagens como *Fortran*, *Basic*, *C*, *C++* ou *C#*.

Neste estudo, uma interface que se comunica com o usuário interagindo durante todas as etapas de utilização do programa foi desenvolvida, na tentativa de reduzir a quantidade de procedimentos e diálogos durante a introdução dos dados e parâmetros de entrada para processamento e representação dos resultados. A interface estabelecida, foi baseada nas telas de comandos utilizadas nos *softwares* mais intuitivos da atualidade, como o *Lumion 11.0*, *Revit 2021*, *SketchUp 2021*, *Google Earth Pro* e o *Canva*, que atuam em áreas distintas, mas apresentam os comandos e ferramentas de utilização de maneira clara e objetiva.

Como padronização para os parâmetros de entrada, estabeleceu-se arquivos do tipo *.xls* ou *.xlsx*, pela familiaridade da comunidade de hidrologia com a plataforma do Excel. Da mesma forma, optou-se por exportar os resultados em arquivos do tipo *shapefile*, *.pdf*, *.dxf* ou *.dwg*, possibilitando assim, compatibilidade com os *softwares* mais utilizados na área de recursos hídricos e geoprocessamento.

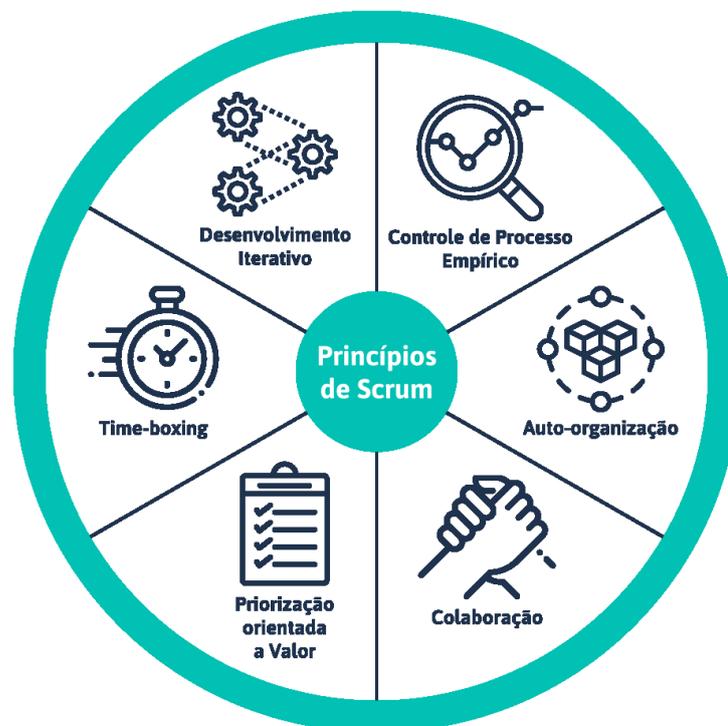
Utilizou-se a metodologia *Scrum* para a gestão de processos durante o desenvolvimento do *software* denominado MH2GEO. Ideal para trabalhar com projetos complexos, a metodologia criada por Ken Schwaber e Jeff Sutherland é

comumente utilizada por desenvolvedores de *softwares* e sistemas. Especialmente, por reduzir o tempo de entrega, produzir ganhos de eficiência e qualidade, comprovada adaptação as mudanças corrigindo eventuais problemas ao longo dos pequenos ciclos de atividades dentro do projeto.

#### 4.1 METODOLOGIA ÁGIL SCRUM

A metodologia *Scrum* é considerada um método ágil para auxiliar a gestão de projeto complexos. Nos últimos anos, tem sido bastante utilizada no desenvolvimento de *software*, por oferecer rapidez, transparência, *feedback* contínuo, eficiência, adaptação e potencializar o trabalho em equipes, otimizando os recursos humanos e materiais (LIBARDI *et al.*, 2010). Trata-se de um conjunto de ações e estratégias para solucionar problemas, em fases simples e ciclos de fácil entendimento, que resumidamente pode ser dividido em seis princípios, conforme Figura 6:

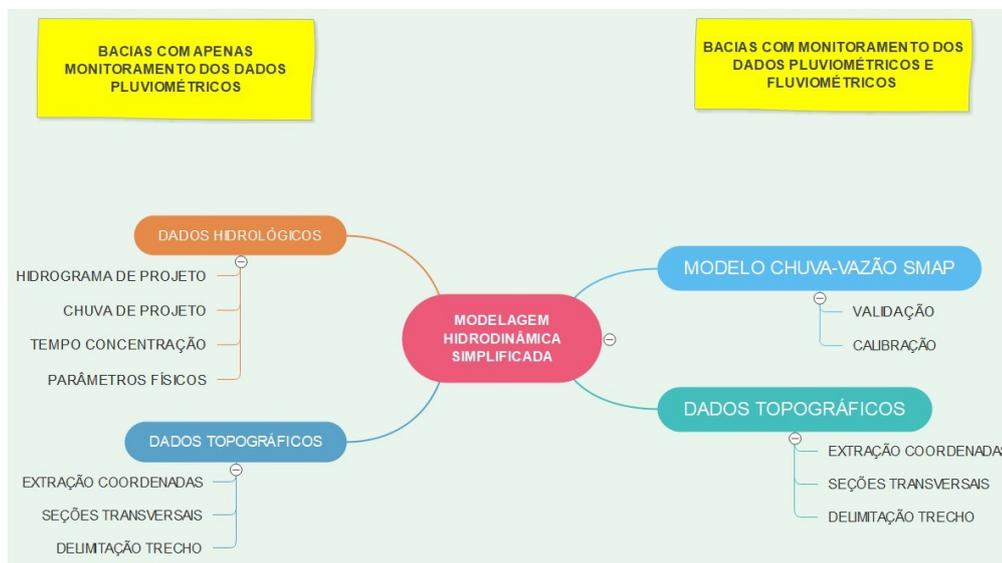
**Figura 6** – Princípios de Scrum.



**Fonte:** Adaptado do Guia SBOK™ (Scrum Body of Knowledge).

Durante o planejamento para aplicação da metodologia *Scrum*, dividiu-se o *software* em dez funcionalidades exibidas na Figura 7. Cada funcionalidade consiste em uma divisão em etapas (*sprint*), onde cada fase possui um tempo definido para o seu desenvolvimento e um conjunto de requisitos e metas a serem alcançados. Outro ponto importante para o desenvolvimento do MH2GEO, foi a padronização dos dados de entrada e as respectivas saída em cada *sprint* aspirada, possibilitando o desenvolvimento simultâneo, eliminando hierarquias, garantido flexibilidade, adaptabilidade e produtividade ao processo.

**Figura 7 – Planejamento de Sprints.**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O desenvolvimento de *softwares* que envolvem muitas variáveis, tecnologias e recursos que podem sofrer mudanças no transcorrer das etapas de aperfeiçoamento, tornam o processo imprevisível e complexo. A metodologia *Scrum*, garante flexibilidade em ambientes repletos de mudanças, além de possibilitar a adição de novas funcionalidade nas *sprints*.

O computador utilizado no desenvolvimento e testes, possuem em sua configuração um processador i7-8750H com 6 núcleos físicos e 12 *threads*, *clock* base de 2.20 GHz com *turbo boost* chegando a 4,10 GHz, 9 MB de *cache* e litografia de 14nm, 16,0 GB e memória *ram* rodando a uma frequência de 2666 GHz, placa de vídeo dedicada *NVIDIA GeForce RTX 2070 Max-Q Design* com 8 GB de memória de vídeo *GDDR6*, rodando *Windows 11 Home* como sistema operacional.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA

A obtenção dos parâmetros morfométricos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) das bacias hidrográficas, é realizado com a *toolbox TopoToolbox do MATLAB* (SHAWANGHART, 2014). Esse conjunto de funções matemáticas realizam análise do relevo e os caminhos de fluxo. A integração dos cálculos matemáticos com os resultados obtidos durante os processos numéricos, são expressos em mapas, gráficos e valores numéricos expressos pela interface criada. Como arquivo de entrada nessa etapa, tem-se a imagem de satélite SRTM que deve ser introduzida em coordenadas do tipo *Universal Transversa de Mercator* (UTM).

## 4.3 CÁLCULO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

De posse de parâmetros morfométricos como, comprimento do rio principal, declividade média do rio, área da bacia hidrográfica, desnível entre o ponto mais distante e o exutório, elaborou-se uma rotina computacional, que possibilita o usuário escolher dentre cinco equações empíricas mais difundidas em meio acadêmico, a que melhor se ajusta as características morfológicas da bacia analisada, permitindo assim a obtenção de resultados mais confiáveis (MATA-LIMA, 2006). De maneira a facilitar a operação do software, utilizou-se um menu *drop-down* ou menu suspenso, que exhibe as opções disponíveis para o cálculo de tempo de concentração. A utilização deste elemento gráfico, libera espaço na tela de desenvolvimento gráfico do software, em virtude da expansão e recolhimento automatizado da lista de opções, implicação do *drop-down* está ativo ou inativo, respectivamente.

Selecionada a equação empírica, é calculado o valor do tempo de concentração aplicando os parâmetros definidos anteriormente, em umas das equações explicitadas, (1), (2), (3), (4) ou (5), de acordo com a seleção do usuário.

## 4.4 ESTIMATIVA DA CHUVA DE PROJETO

Para estimativa da chuva de projeto, considerou-se o tempo de duração da chuva o mesmo do tempo de concentração calculado pela equação selecionada pelo usuário. Utilizando-se da equação da curva IDF clássica (6), criou-se uma lista do tipo

*drop-down*, que fornece as variáveis  $k$ ,  $c$ ,  $b$ , e  $a$  para setenta e quatro cidade brasileiras, permitindo também a introdução manual de tais variáveis, em caixas de diálogo. O tempo de discretização da chuva, é obtido pela divisão entre o tempo de duração da chuva e a quantidade de intervalos de duração, informada pelo operador através do botão gráfico *spinner*, controle giratório que cria um contador numérico, retornando valores numéricos com limite inferior e superior previamente estabelecido. O tempo de retorno  $T_r$  é computado quando uma ou mais, caixas de seleção forem marcadas. Ao todo, são fornecidos dez intervalos de recorrência, habitualmente utilizados no dimensionamento de estruturas que compõem os sistemas de drenagem.

A variação temporal da chuva é simulada através do método dos blocos alternados, por ser uma solução de fácil aplicação e promover condições críticas para o escoamento (TUCCI, 2004).

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA

Na transformação de chuva em escoamento superficial, utilizou-se o método do Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos EUA (*Natural Resources Conservation Service*, EUA) conhecido como Método NRCS. Para execução do método, quatro sub-rotinas com estruturas de repetição foram desenhadas, percorrendo da primeira à última linha de uma matriz, que possui em sua primeira coluna os valores resultantes da multiplicação da intensidade de chuva obtida pela equação clássica da curva IDF clássica (6), por cada passo de tempo encontrado na divisão do tempo de duração da chuva pela quantidade de intervalos informados ao botão *spinner*.

Na sequência, a segunda sub-rotina, acumula a precipitação, enquanto a terceira armazena a precipitação acumulada excedente. Por último, um código de rastreamento localiza a posição de cada bloco de chuva e enumera cada um deles, iniciando na linha em que o volume de chuva supera as perdas iniciais somada a capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo.

## 4.6 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMA DE PROJETO

Na geração do hidrograma sintético do ponto exutório preestabelecido, onde a área sob a curva corresponde ao volume de água escoado superficialmente, aplicou-se a metodologia do Hidrograma Unitário Sintético Triangular do NRCS. Para isso, fez-se necessário criar uma sequência estruturada de códigos computacionais, contendo instruções que aplica as equações já apresentadas, (11), (12), (13) e (14), para cada bloco de chuva identificado. Como resultante do processo, obtém-se um hidrograma unitário para cada bloco de chuva. Posteriormente, o código seleciona cada gráfico unitário gerado, utiliza da semelhança de triângulos para estimar os valores da vazão em cada passo de tempo, em todos os gráficos unitários gerados. Em seguida, aplicando-se as hipóteses do hidrograma unitário:

1. Chuva efetiva unitária tem intensidade constante ao longo de sua duração e distribui-se uniformemente sobre toda área de drenagem.
2. Bacias hidrográficas com comportamento linear, podem ser aplicados os princípios da superposição e da proporcionalidade de hidrogramas.

O algoritmo, realiza a superposição dos valores das ordenadas em cada passo de tempo, ocasionado pelos blocos de chuva. A convolução, permite calcular o hidrograma de um evento complexo usando os princípios da aditividade e proporcionalidade, exibindo através de um gráfico na tela, o hidrograma sintético resultante do processo.

## 4.7 MODELO CHUVA-VAZÃO SMAP

Em bacias hidrográficas que possuem monitoramento dos dados pluviométricos e fluviométricos, torna-se possível a aplicação de modelos que procuram representar e simular o comportamento dos componentes do ciclo hidrológico. Assim sendo, uma abordagem mais robusta para a modelagem hidrológica pode ser aplicada, com a estimativa do hidrograma de projeto através de um modelo chuva-vazão, como SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), por exemplo.

Em sua aplicação o SMAP utiliza séries contínuas de precipitação (P) e o total diário médio do período em estudo de evaporação potencial (tanque classe A), além de necessitar de um período em que se tenha a precipitação e a vazão correspondente (calibração). A seguir apresentam-se os procedimentos de cálculo e as considerações do modelo em sua versão diária.

#### 4.7.1 Inicialização do Modelo

Na inicialização do modelo fornece-se o estado inicial da bacia:

$$R_{\text{solo}}(1) = T_{\text{uin}} \cdot \text{Str}$$

$$R_{\text{sup}}(1) = 0$$

$$R_{\text{sub}}(1) = (E_{\text{bin}} \cdot 86.4) / ((1 - K_k) \cdot A_d)$$

onde:

$T_{\text{uin}}$  = Teor de umidade inicial (ad.)

$E_{\text{bin}}$  = Vazão básica inicial ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A_d$  = Área de drenagem ( $\text{km}^2$ )

$\text{Str}$  = Capacidade de saturação do solo (mm)

$K_{\text{kt}}$  = Constante de recessão do escoamento básico (dias)

$$K_k = 0,5 \wedge (1/K_{\text{kt}})$$

#### 4.7.2 Escoamento Superficial

Na ocorrência de um evento de precipitação a separação do escoamento superficial ( $E_s$ ) é baseada no método do NRCS (*Natural Resources Conservation Service*), parte da chuva será convertida em  $E_s$  que por sua vez contribuirá no  $R_{\text{sup}}$  (Figura 5). A seguinte condição é estabelecida pelo modelo para formação do escoamento superficial:

$$\text{Se } (P(i) > A_i)$$

onde :

$$S = Str - R_{solo}(i)$$

$A_i$  = Abstração Inicial

$S$  = Retenção máxima potencial

$$Es(i) = (P(i) - A_i)^2 / (P(i) - A_i + S)$$

$i$  = Dia em estudo

Caso Contrário:

$$Es(i) = 0$$

Ou seja, caso a lâmina precipitada do dia seja maior do que a lâmina retida pela vegetação predominante da bacia gera-se escoamento superficial com base no método NRCS, caso contrário não ocorre a formação do  $Es$ .

#### 4.7.3 Evapotranspiração Real

A parcela restante da precipitação ( $P(i) - Es(i)$ ) colabora no reservatório de solo, que em seu balanço hídrico também considera a evapotranspiração real ( $Er$ ). Na representação matemática do SMAP tem-se:

$$\text{Se } (P(i) - Es(i)) > E_p$$

onde:

$$Tu = \text{Teor de umidade(ad.)}$$

$$Er(i) = E_p$$

$i$  = Dia em estudo

$$Tu(i) = (R_{solo}(i) / Str)$$

$Str$  = Capacidade de saturação do solo

Saturação do solo Caso Contrário:

$$Er(i) = (P(i) - Es(i)) + (E_p - (P(i) - Es(i))) * (Tu(i)) \quad (28)$$

Como observado na equação descrita acima se o valor acrescido ao  $R_{solo}$  for maior do que a evapotranspiração potencial ( $E_p$ ) a evapotranspiração real ( $Er$ ) será numericamente igual a  $E_p$ , caso a afirmativa não seja satisfeita a expressão (28) representará  $Er$ .

#### 4.7.4 Recarga Subterrânea

De posse dos respectivos acréscimos e decréscimos de cada reservatório, inicia-se o balanço hídrico em cada um deles. Observa-se a ligação (Rec) entre R<sub>solo</sub> e R<sub>sub</sub>, fato este que implica em uma sequência lógica de cálculo onde algumas atualizações dos estados iniciais da bacia serão necessárias.

Se  $R_{solo(i)} > (Capc * Str)$

onde:

Crec = Parâmetro de recarga subterrânea

Rec = Recarga subterrânea

Capc = Capacidade de campo

$Rec(i) = Crec * Tu(i) * (R_{solo(i)} - (Capc * Str))$

Caso Contrário:

$Rec(i) = 0$

As variáveis de estado são atualizadas conforme apresentado nos itens 4.7.5, 4.7.6, 4.7.7 e 4.7.8.

#### 4.7.5 Reservatório de Solo

$$R_{solo(i+1)} = R_{solo(i)} + P(i) - Es(i) - Er(i) - Rec(i) \quad (29)$$

A Equação (29) representa o balanço hídrico no reservatório de solo. Como mencionado deve-se respeitar a sua capacidade máxima de acumulação de água, fato este representado pelo modelo na seguinte condição:

Se  $R_{solo(i+1)} > Str$

onde:

$$Es\_atual(i) = Es(i,1) + Rsolo(i+1) - Str \quad (30)$$

$$Es\_atual = Es \text{ Atualizado}$$

$$Rsolo(i+1) = Str$$

$$Es(i) = Es\_atual(i)$$

Caso contrário:

O SMAP considera que a parcela excedente do  $Rsolo$  converte-se totalmente em escoamento superficial, Equação (30), desprezando uma possível recarga subterrânea.

#### 4.7.6 Reservatório Superficial

A atualização do  $Es$  será contabilizada no reservatório superficial:

$$Rsup\_novo(i) = Rsup(i) + Es(i)$$

$$Rsup(i) = Rsup\_novo(i)$$

Posteriormente calcula-se o escoamento direto ( $Ed$ ) no dia ( $i$ ) em seguida o estado do reservatório superficial no dia seguinte ( $i+1$ ).

$$K2 = 0.5^{(1/K2t)}$$

onde:

$K2t$  = Constante de recessão do escoamento superficial

$$Ed(i) = Rsup(i) * (1 - K2)$$

$$Rsup(i+1) = Rsup(i) - Ed(i)$$

#### 4.7.7 Escoamento Básico (Eb)

$$Eb(i,1) = R_{sub}(i,1) * ( 1 - Kk )$$

onde:

$Kkt$  = constante de recessão do escoamento básico

$$Kk = 0,5 ^ (1/Kkt)$$

Nota-se que as eventuais atualizações do  $R_{sub}$  em consequência da recarga subterrânea, não foram contabilizadas até o presente momento.

#### 4.7.8 Reservatório Subterrâneo

$$R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + Rec(i) - Eb(i) \quad (31)$$

A expressão (31) mostra o balanço hidráulico no reservatório subterrâneo. Posteriormente o modelo calcula a vazão desejada ( $Q_{cal}$ ).

$$Q_{cal\_C}(i) = ((Ed(i)+Eb(i))*Ad)/86.4$$

#### 4.7.9 Influência dos Parâmetros do SMAP

Existem seis parâmetros no modelo SMAP os quais caracterizam a bacia hidrográfica em estudo, a representação física assim como as faixas de variação obtidas na aplicação do modelo em bacias de variadas regiões brasileiras será enunciada a seguir.

#### 4.7.10 Str - Capacidade de saturação do solo (mm)

Representa em termo de lâmina de água, a capacidade máxima de absorção do solo sem que ocorra a formação de escoamento superficial, e/de recarga subterrânea. Em bacias brasileiras ficou compreendido entre os seguintes valores:

$$100 < Str < 2000$$

#### **4.7.11 K2t - Constante de recessão do escoamento superficial (dias)**

Corresponde ao tempo em dias em que o escoamento superficial cai a metade do seu valor, está relacionada com a parcela de água retida pelo reservatório superficial que será convertida em escoamento direto (Ed). Quanto maior o seu valor, menor será a parcela de Ed gerada.

$$0,2 < K2t < 10$$

#### **4.7.12 Crec - Parâmetro de recarga subterrânea (%)**

Estabelece uma relação diretamente proporcional entre a lâmina contida no reservatório de solo e a quantidade transportada para o reservatório subterrâneo (Rec). Quanto maior o Crec maior será a parcela da recarga subterrânea. Possui valores compreendidos entre:

$$0 < Crec < 20$$

#### **4.7.13 Ai - abstração inicial (mm)**

Expressa em lâmina a quantidade de água retida pela vegetação situada na bacia em estudo. Está relacionada de maneira inversamente proporcional com a parcela de água que incide no solo e que posteriormente se transformará em escoamento superficial, ou seja, quanto maior a abstração inicial menor será o Es. Pode ser obtida através das características da cobertura vegetal predominante na região.

Ai = 2,5 mm - Campo

3,7 mm - Mata

5,0 mm - Floresta densa

#### **4.7.14 Capc - Capacidade de campo (%)**

Corresponde à quantidade máxima de água que um solo pode reter em condições normais. Está envolvida com redução da parcela transportada do reservatório de solo para o reservatório subterrâneo, quanto maior o seu valor menor será a recarga subterrânea. Seu valor encontra-se relacionado com as características do tipo de solo.

Capc = 30 % - Solo Arenoso

40 % - Solo Misto

50 % - Solo Argiloso

#### **4.7.15 Kkt - Constante de recessão do escoamento básico (dias)**

Representa a quantidade de dias em que o escoamento básico cai à metade de seu valor. Encontra-se envolvida com o processo de transformação da água retida no reservatório subterrâneo em escoamento básico, quanto maior for o Kkt menor será a parcela de Eb.

$30 < Kkt < 180$  dias

#### **4.7.16 Algoritmo do Modelo SMAP**

Com a finalidade de se aplicar o modelo anteriormente descrito, foi construído um algoritmo através da plataforma MATLAB. O programa foi desenvolvido com a intenção de facilitar a calibração do SMAP, e de simplificar a relação usuário-modelo, exibindo na tela o gráfico superposto real da série de vazão introduzida em conjunto com a série sintética obtida na modelagem, além de expressar o erro quadrático médio.

### **4.8 DADOS TOPOGRÁFICOS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS**

Os dados topográficos, especificamente os dados das coordenadas X, Y e Z das seções transversais, são obtidos através de um algoritmo computacional a partir do

Modelo Numérico do Terreno (MNT). Através de uma interface dedicada, ferramentas de interações foram posicionadas de maneira a otimizar a exibição gráfica da bacia hidrográfica analisada, o trecho do rio selecionado para simulação, assim como a localização e distribuição das seções transversais ao longo do trecho capturado para estudo. O MH2GEO, permite a criação automatizada das seções transversais, solicitando o distanciamento entre as seções, comprimento da margem esquerda e direita.

O processo inicia-se com a criação de retas perpendiculares ao longo do rio selecionado para estudo, conforme distanciamento estabelecido pelo operador. As retas criadas, possuem o coeficiente angular oposto do inverso do segmento de reta  $\overline{AB}$ , que representa o trecho do rio analisado entre o ponto A e B. Em seguida, são gerados diversos pontos que pertencem a reta perpendicular criada, equidistantes a critério do usuário. Por último, o algoritmo de extração, localiza as coordenadas de cada ponto gerado no passo anterior, coleta as coordenadas X, Y e Z a partir do MNT e organiza em uma matriz de dados.

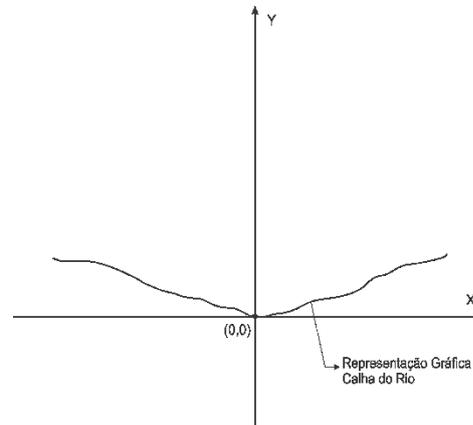
## 4.9 APLICAÇÃO MODELAGEM HIDRODINÂMICA SIMPLIFICADA

### 4.9.1 Modelagem Escoamento Permanentes e Uniformes

Para a modelagem permanente e uniforme, utilizou-se a aplicação da equação de Manning em diversas seções transversais de um trecho de rio, mantendo-se constante todas as variáveis de entrada, desprezando as contribuições laterais e o acréscimo da bacia hidrográfica ao passo em que se executou sequencialmente nas seções de montante para jusante. A rotina computacional desenvolvida, seleciona todos os problemas envolvidos na organização dos dados citados, entretanto desenvolver um código que identifique padrões e certas dualidades envolvidas no cálculo científico, onera tempo e dedicação do programador. Por diversas vezes, torna-se mais fácil desenvolver códigos que resolvam problemas específicos, generalizar sempre é uma dificuldade quando se tenta solucionar problemas com resquícios de não-linearidade nas variáveis. Apesar de ser uma equação de fácil entendimento, a expressão de Manning, quando aplicada em seções transversais (Figura 8) que não possuem uma relação linear entre as variáveis dependentes e

independentes, é resolvida apenas através de um processo iterativo de tentativas e erros.

**Figura 8** – Representação gráfica da calha do rio.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

#### 4.9.2 Regressão polinomial de grau “n”

Regressão é um procedimento matemático que permite encontrar uma expressão algébrica que represente, com uma boa aproximação, a relação entre uma variável dependente com outra independente. Na aplicação dessa técnica, geralmente, plota-se em um gráfico os pontos das abscissas e das ordenadas da série, observa-se o comportamento da figura gerada no plano cartesiano e em seguida verifica-se qual expressão matemática conhecida, mais se aproxima graficamente dos pontos analisados. Caso a relação entre a variável dependente e a independente seja linear, por exemplo, opta-se por uma regressão linear. Nos casos em que a relação entre as variáveis seja não-linear, usa-se regressões exponenciais, logarítmicas, polinomiais, ou até mesmo uma combinação delas.

A escolha de qual regressão é a mais adequada em cada caso, é realizada basicamente, através da análise do coeficiente de correlação e da comparação entre a curva real e a curva sintética gerada com expressão matemática fornecida pela técnica de regressão utilizada. O coeficiente de correlação, expressa através de um valor numérico, o quão a equação algébrica encontrada, consegue fornecer valores da variável independente próximos dos valores observados na série. Quanto mais próximo de 1,00 (um), menor é a diferença entre os valores das ordenadas

encontrados pela técnica de regressão usada.

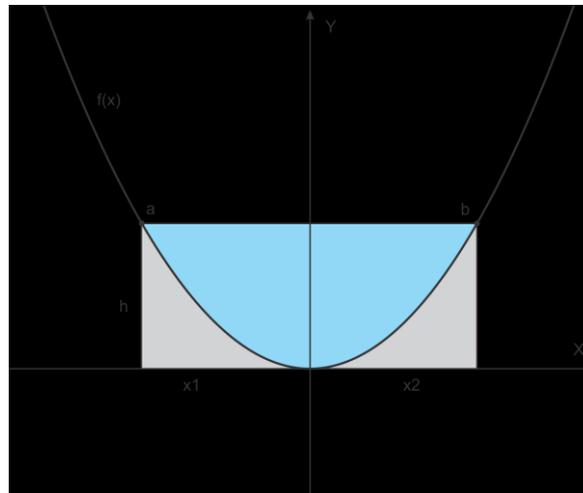
A análise comparativa entre os gráficos sobrepostos da série real com a série sintética, permite uma comparação mais pontual da representatividade dos valores encontrados. Se por um lado, o coeficiente de correlação aponta a precisão dos valores encontrados, a análise comparativa dos gráficos, permite identificar onde melhor, e pior, a regressão se comporta. Esse comportamento pode acontecer nos picos, nos pontos mais baixos ou em pontos médios. Pode-se dizer, que o coeficiente de correlação fornece um resultado geral da aproximação matemática encontrada, e a comparação entre os gráficos fornece um resultado em todas as oscilações do evento estudado.

Praticamente todas as seções transversais de rios, possuem um formato que se aproxima da representação gráfica de uma parábola, fato este, que explica a utilização de um polinômio de grau “n”, a fim de encontrar a melhor relação possível entre as variáveis dependentes e independentes. Assim, garante-se uma representação matemática aceitável, com o maior coeficiente de correlação possível, da curva em questão. Quanto mais se aproxima de 1,00 (um) o coeficiente de correlação, observa-se que a regressão polinomial tende a aumentar o grau do polinômio, o que elevará significativamente o tempo de processamento dos dados, como será explanado em outro momento.

#### **4.9.3 Procedimentos aplicados e considerações de cálculo**

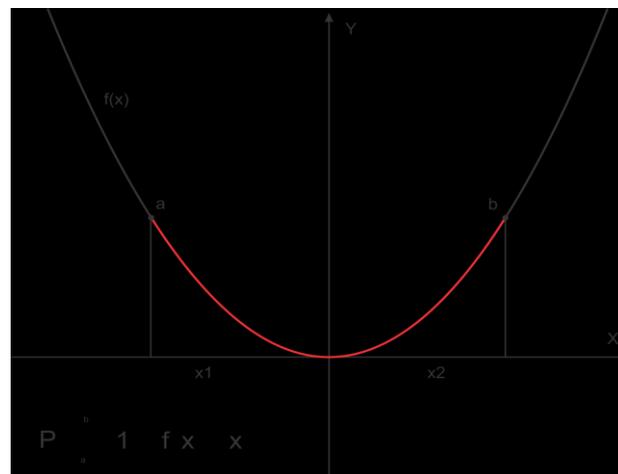
Obtido uma função matemática, com um grau de aproximação aceitável, da curva que representa o comportamento das coordenadas x e y no transcorrer do percurso de uma margem a outra do rio, pode-se utilizar procedimentos simples de cálculo para aplicação da equação de Manning. A integral da função encontrada inicialmente (equação 32), do ponto “a” ao ponto “b” permite obter a área logo abaixo da curva, cor cinza claro da Figura 9. Na formulação matemática sugerida por Manning, a área molhada é representada pela cor azul claro da Figura 9, que pode ser facilmente encontrada, caso seja subtraído do retângulo de altura h e comprimento formado pelo segmento de reta  $\underline{ab}$ , ou seja a soma dos valores absolutos de  $x_1 + x_2$ , a área pintada em cinza claro encontrada anteriormente.

**Figura 9** – Obtenção da área molhada.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 10** – Obtenção do perímetro molhado.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

$$f(x) = ax^n + bx^{n-1} + cx^{n-2} \dots \quad (32)$$

$$A = \int_a^b f(x) dx \quad (33)$$

$$P = \int_a^b \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (34)$$

Conforme demonstrado na Equação 34, o valor do perímetro molhado é um

pouco mais trabalhoso, entretanto, como trata-se de uma equação polinomial, tampouco a integral, muito menos a derivada é de difícil obtenção (Figura 10). Em consequência, a raiz quadrada de um polinômio é resolvida através do processo de fatoração polinomial que requer mais de tempo de processamento computacional do que o simples cálculo da integral, como acontece na definição da área molhada. De fato, o tempo necessário para o cálculo do perímetro molhado é significativamente superior ao da área molhada. O processo de fatoração polinomial requer mais processamento quanto maior for o grau do polinômio.

#### **4.9.4 Problemas na obtenção dos limites de integração a e b**

O algoritmo desenvolvido, utiliza um processo iterativo que arbitra um valor inicial para a altura da lâmina d'água no leito do rio, em sequência encontra os limites de integração, calcula a área e o perímetro molhado com o procedimento citado anteriormente e verifica se esta vazão encontrada é igual ou superior a vazão requerida informada. Caso a vazão seja inferior, o passo seguinte continua com a adição de um incremento na altura da lâmina d'água do leito do rio e todo o processo é repetido até que a vazão estimada seja superior ou igual a requerida.

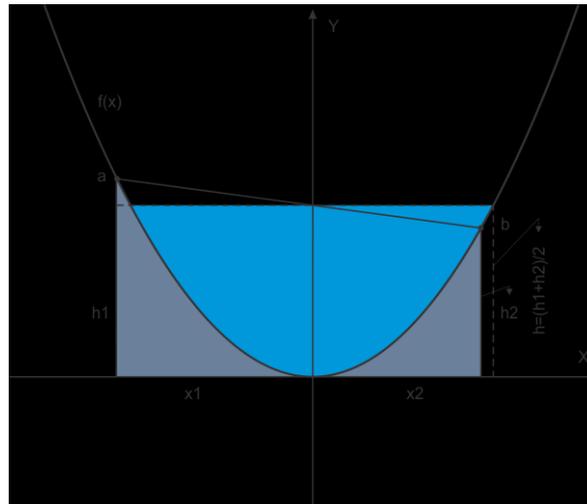
Aparentemente, a obtenção dos limites de integração deveria ser uma tarefa simples, bastando apenas encontrar as raízes do polinômio que fornecem os valores das abscissas dos limites de integração do ponto "a" e até o ponto "b". O problema, encontra-se na aproximação matemática realizada para se estimar a equação que representa a calha natural do rio. Caso seja aplicado o método numérico de Newton-Raphson, para determinação dos valores das coordenadas x que garantem os valores de y para cada ponta pé inicial e respectiva adição de incremento, por se tratar de uma equação polinomial de grau "n", obtém-se "n" valores de x. Ou seja, se o polinômio obtido, conforme recomendado seja do sexto grau, seis valores de x acarretam um único valor de y. Aliado a este fato, verifica-se que os valores estimados de x, diferem pouquíssimo dos valores reais advindos da topografia, diferença está, suficiente para acarretar acúmulos de erros nos cálculos. Trata-se de uma regressão polinomial com coeficiente de correlação, que em média se aproxima de 0,98.

Como descrito, a qualquer momento o usuário poderia simplesmente aumentar o grau do polinômio, visando obter um coeficiente de correlação de 1,00. Tal

procedimento exigiria mais tempo de processamento da obtenção do perímetro molhado, conforme explanado, e em algumas ocasiões poderia levar o computador ao travamento. Como se não bastasse, os valores das abscissas encontradas pelo processo de Newton-Raphson, em sua maioria, pertencem ao conjunto dos números complexos. Definitivamente, o método numérico desenvolvido por Isaac Newton e Joseph Raphson, para estimar as raízes de uma função, converge de forma magnífica e é de fácil aplicação, mas não consegue suprir esta demanda. A solução adotada para contornar os problemas citados, foi desenvolver um algoritmo que encontrasse valores das coordenadas  $y$ , que mais se aproximam dos valores adotados para lâmina d'água no leito do rio, e que ao mesmo tempo tivessem os valores no eixo das abscissas negativo e positivo, respectivamente. Desta forma, dois valores no eixo das ordenadas seriam encontrados, ambos bem próximos dos valores adotados para a lâmina d'água no leito.

A utilização do método numérico de Newton-Raphson, no algoritmo desenvolvido para esta etapa, solucionou todos os problemas relacionados com a obtenção dos limites de integração, no entanto, a metodologia aplicada em seu desenvolvimento alterou o processo de obtenção da área molhada. Desta vez, optou-se por fazer uma média aritmética entre a altura  $h_1$  e altura  $h_2$ , ordenadas dos pontos  $a$  e  $b$  respectivamente (Figura 11). Com esta média aritmética, alcança-se o valor de  $h$ , criando um retângulo imaginário, que possui comprimento formado pelo segmento de reta ( $ab$ ), ou seja, a soma dos valores absolutos de  $x_1 + x_2$ , linha tracejada na Figura 11. Ao utilizar a definição de integral, com limites de integração  $a$  e  $b$ , encontra-se a área abaixo da curva gerada pela função  $f(x)$ , que subtraída do retângulo imaginário, fornece a área colorida na cor azul escuro da Figura 11. Tal procedimento, foi utilizado na obtenção da área molhada, necessária para aplicação de Manning, é comedido que existe um erro associado aos valores das áreas obtidas. Vale ressaltar, que a diferença entre as coordenadas encontradas é ínfima, mas de toda forma existe uma distorção dos resultados, com o uso desta simplificação de cálculo, que utiliza a média dos valores encontrados. De fato, as aproximações utilizadas na estimativa das vazões máximas em rios e riachos, são inúmeras, o que de certa forma viabiliza este procedimento, uma vez que os erros associados tendem a hiperdimensionar a área ocupada pelo fluido, majorando os resultados a favor da segurança.

**Figura 11** – Obtenção da área molhada, utilizado pelo algoritmo desenvolvido.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

#### 4.9.5 Modelagem Hidrodinâmica

Os cálculos matemáticos, relacionados na propagação de ondas de cheia resolvendo numericamente as equações de Saint-Venant, são obtidos com certa facilidade nos dias atuais, haja vista os avanços computacionais obtidos na última década. Os modelos hidrodinâmicos, geralmente, representam bem os efeitos do amortecimento e translação da onda de cheia, efeitos de jusante e a planície de inundação, utilizando-se das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento, seja na sua forma completa ou simplificada. Entretanto, a grande quantidade de dados envolvidos no processo e até mesmo o custo computacional, atrelado as simulações em vários períodos de tempo, justificam a utilização de modelos simplificados, mais eficientes computacionalmente e menos exigentes nas informações de entrada.

Dentre os modelos simplificados mais aplicados e com relevância, destaca-se o modelo de Muskingum, proposto inicialmente em 1939 por MacCarthy e modificado posteriormente em 1969 por Cunge, possibilitando a variação dos parâmetros  $K$  e  $X$  com o tempo, passando a ser conhecido como modelo Muskingum-Cunge não linear (MCNL) (TUCCI, 2005). As modificações propostas por Cunge ao modelo de Muskingum, possibilitaram a estimativa dos parâmetros  $K$  e  $X$ , com base em características físicas do rio, como rugosidade, declividade, largura do canal e o comprimento do trecho em análise. Tais parâmetros, são obtidos pelo o código

computacional criado, através das informações introduzidas pelo usuário, como distância entre as seções e comprimento das margens esquerda e direita, permitindo a extração da declividade média e coordenadas X e Z das respectivas seções transversais.

O algoritmo descrito no item 4.2, apenas aplica as ferramentas desenvolvidas na *toolbox TopoToolbox* (SHAWANGHART, 2014). Tais ferramentas, derivam diversas informações do Modelo Numérico do Terreno (MNT), informando apenas como dado de entrada, a imagem de satélite do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

De posse dos parâmetros morfométricos do trecho de rio em estudo, aplicou-se o algoritmo descrito anteriormente no item 4.6, considerando a vazão requerida como sendo 70 % da vazão de pico do hidrograma sintético (Equação 35), obtido pelo convolução dos hidrogramas unitários do método NRCS, para cada curva IDF e tempo de retorno previamente estabelecido. A aplicação da equação de Manning através do processo iterativo descrito, repercute na obtenção dos limites de integração  $a$  e  $b$ , que correspondem as coordenadas geográficas das margens direita e esquerda, respectivamente, que satisfazem a área e perímetro molhado da equação 15, para uma vazão  $Q_0$ .

Em seguida, aplicando-se a equação da continuidade, obtém-se a velocidade média do fluido na seção transversal estudada:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (35)$$

A velocidade de propagação da onda de cheia, chamada de celeridade da onda de cheia, é estimada como sendo aproximadamente 1,30 e 1,70 vezes maior do que a velocidade média do fluxo na seção. Para Corbett (1945), essa proporção seria de 1,30 vezes, enquanto para Collischonn e Dornelles (2013), o valor da celeridade aproxima de 5/3 da velocidade média. No código computacional desenvolvido, utilizou-se a proporção sugerida por Collischonn e Dornelles (Equação 37).

$$c = \frac{5}{3}v \quad (36)$$

De posse da distância entre as seções transversais consecutivas, informada anteriormente, combinada com a valor da celeridade da onda de cheia, estimou-se o parâmetro  $K$  do método, que é considerado o tempo de propagação da onda de cheia dentro do trecho estudado, aplicando-se diretamente tais valores na equação 38.

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (37)$$

A largura do rio foi obtida pela diferença entre as coordenadas  $x$  dos limites de integração  $b$  e  $a$ , nessa ordem. Cunge (1969) demonstrou em seu trabalho, que o valor do parâmetro  $X$ , que controla a atenuação da onda de cheia, que melhor representa a atenuação real, pode ser obtido pela seguinte expressão matemática:

$$X = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{Q}{B \cdot c \cdot S_o \cdot \Delta x} \right) \quad (38)$$

Onde  $B$  é a largura do rio (m);  $S_o$  é a declividade média de fundo do rio ( $m \cdot m^{-1}$ );  $c$  é a celeridade da onda de cheia ( $m \cdot s^{-1}$ );  $Q$  é a vazão de referência ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $\Delta x$  é o comprimento do trecho do rio (m). Conforme abordado anteriormente, os valores estipulados para  $\Delta x$  e  $\Delta t$  devem ser definidos, de maneira a garantir os limites estabelecidos na equação 27. Na sequência, utiliza-se as equações 23, 24 e 25 na obtenção dos valores de  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$ . O algoritmo escrito, executa a rotina descrita e aplica o método de Muskingum-Cunge em cada seção transversal gerada pelo operador, sendo a primeira seção localizada no ponto inicial do trecho de estudo e a final, localizada nas coordenadas geográficas informadas para o ponto final do trecho observado. Para primeira seção transversal, o hidrograma sintético é adquirido, pela metodologia descrita no método NRCS, enquanto os demais hidrogramas, são obtidos de maneira sequencial aplicando o método de Muskingum-Cunge na seção transversal posterior até atingir-se a seção final.

A repercussão da onda de cheia em cada seção transversal, é obtida pela representação gráfica da área inundada em cada uma delas, expressa no plano cartesiano  $X$  e  $Y$ , pelos limites de integração  $a$  e  $b$ , onde  $Z$  expressa a profundidade do canal. Para isso, executou-se a rotina matemática que aplica a equação de Manning em seções transversais, obtendo-se a área e o perímetro molhado, para

cada seção, dada a declividade  $l$  e coeficiente de rugosidade  $n$ . A área e o perímetro molhado estimado, através do processo iterativo, devem garantir a passagem da vazão máxima do hidrograma de projeto correspondente a cada seção, confeccionado para um tempo de retorno atribuído, e sua respectiva propagação da onda de cheia estimada pelo modelo Muskingum-Cunge não linear (MCNL). Desta forma, o algoritmo representa graficamente o resultado estimado, interligando as coordenadas geográficas obtidas para cada uma das margens esquerda e direita de cada seção. Tendo como ponto inicial, a margem direita da primeira seção transversal, interligando todos os pontos das margens direita. Em seguida, conecta todos os pontos da margem esquerda, iniciando das coordenadas da última seção transversal até atingir a coordenada da margem esquerda da primeira seção, ou seja, desenhando uma poligonal no sentido horário, considerando o observador posicionado na direção do fluxo.

## 5 RESULTADOS

Seguindo o fluxograma estabelecido na Figura 7, desenvolveu-se nove códigos computacionais, unidos por uma *interface* gráfica limpa, rápida e com muitos recursos que integra todos os algoritmos, oferecendo ao usuário uma experiência ágil e veloz na obtenção dos resultados, comumente relacionados na modelagem hidrológica e hidrodinâmica.

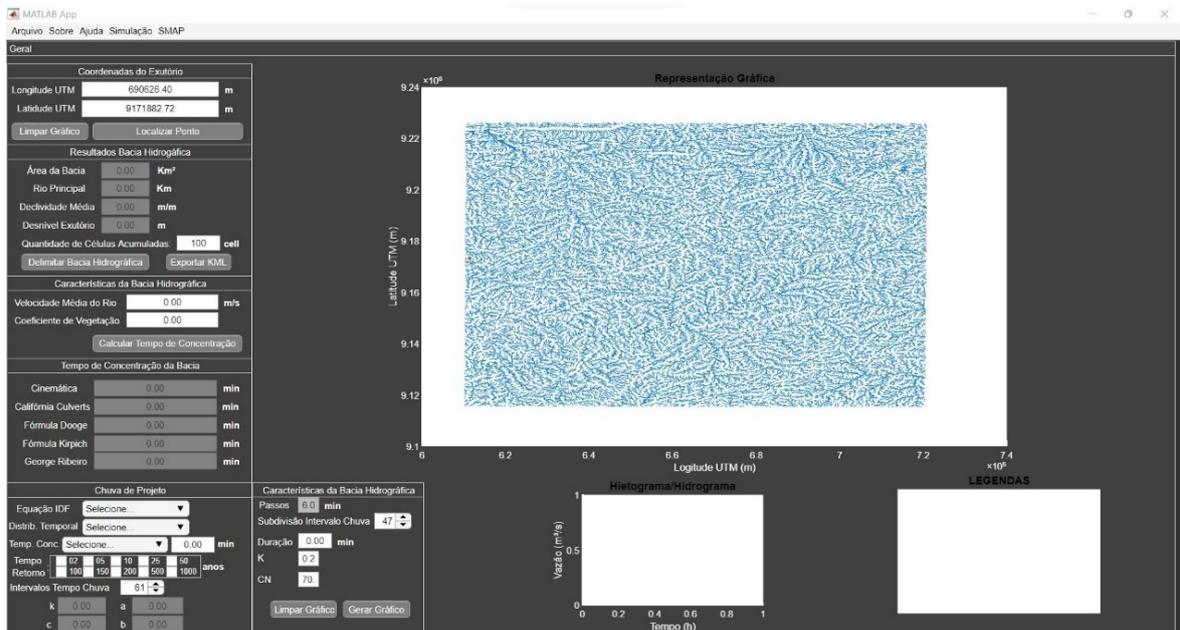
Os resultados obtidos durante o desenvolvimento do MH2GEO demonstraram lentidão da representação gráfica nas janelas de mapas, quando as bacias hidrográficas possuem área superior a 1.000,00 km<sup>2</sup>. Da mesma forma, identificou-se retardos na geração das seções transversais e simulação da propagação de onda de cheia quando as seções transversais são superiores a 25,00 km, ou mesmo, quando mais de cinquenta seções transversais são solicitadas. Obviamente, quanto maior o poder de processamento da máquina a qual o *software* é carregado, menos travamentos, lentidão e retardos na entrega dos resultados serão relatados.

A seguir, os resultados obtidos em cada etapa são demonstrados através da exibição das imagens obtidas, durante a utilização do MH2GEO.

### 5.1 PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA

A primeira sub-rotina desenvolvida calcula os parâmetros físicos da bacia hidrográfica a partir de um MNT (Figura 12). Em seguida, o *software* MH2GEO calcula o tempo de concentração do trecho de rio selecionado para análise, apresentando na tela o resultado numérico em minutos para cada formulação empírica discretizada anteriormente.

**Figura 12 – Geração dos rios da imagem SRTM.**

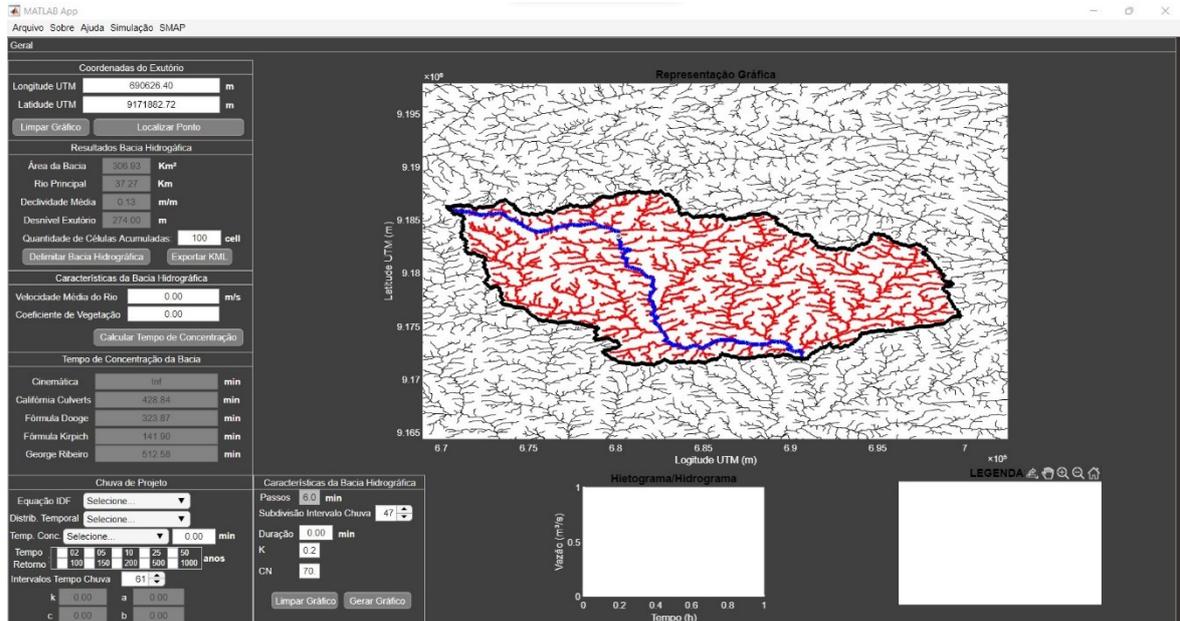


**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Para o funcionamento da rotina, basta clicar em arquivo e em seguida abrir um MNT no formato “.tif”. Na sequência, o software apresenta na aba de representação gráfica (Figura 13) todos os talvegues. Posteriormente, o usuário deve digitar as coordenadas do exutório da bacia hidrográfica em análise, para que a rotina introduza o ponto exutório no rio. Ao digitar as coordenadas geográficas no formato UTM, o código computacional procura as coordenadas localizadas dentro de todos os rios traçados anteriormente, que mais se aproxime da latitude e longitude digitada. Desta forma, o ponto exutório sempre será posicionado dentro da célula de *pixel* que representa o rio, não ocorrendo erros ao se acumular as áreas de drenagem que direcionam o fluxo para esse ponto.

Após a localização do ponto exutório, o usuário deve clicar em “Delimitar Bacia Hidrográfica” (Figura 13), para que seja traçado o rio principal, exibido na cor azul, e todos os outros afluentes apresentados na cor vermelha. Na continuação são extraídos os parâmetros; área da bacia, comprimento do rio principal, declividade média, desnível do exutório e calculado o tempo de concentração da bacia hidrográfica, que acumula água a montante das coordenadas geográfica introduzidas.

**Figura 13 – Delimitação da bacia hidrográfica.**

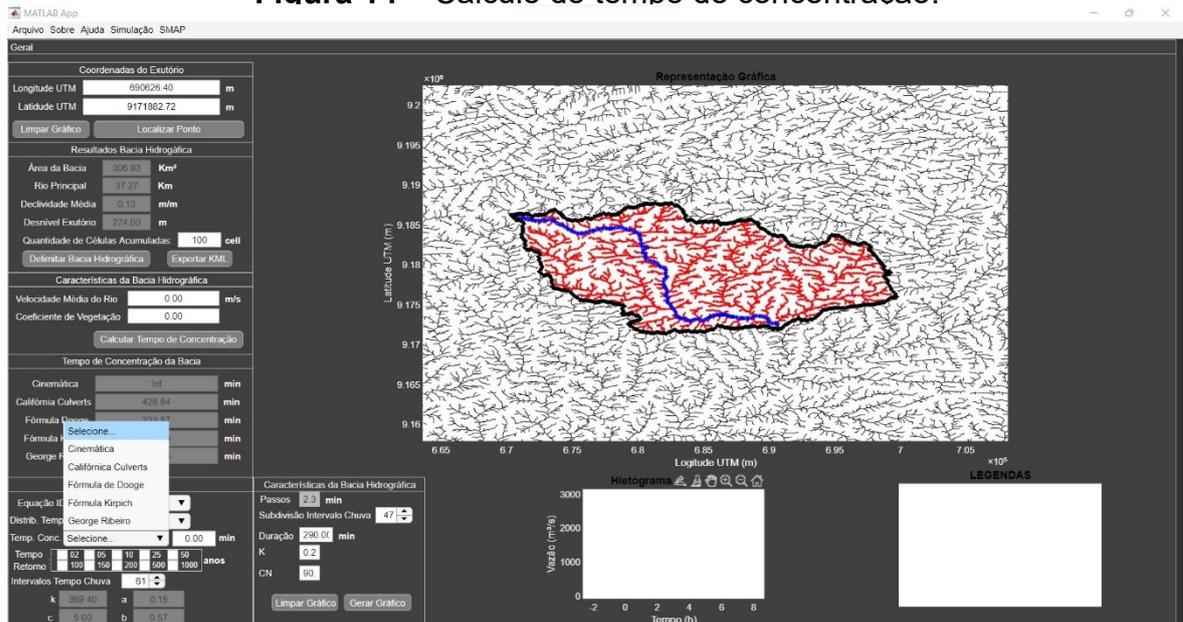


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O software MH2GEO disponibiliza cinco formulações empíricas para estimativa do tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo. Exibindo na interface gráfica do programa, os resultados obtidos pela aplicação das equações da Cinemática, Califórnia Culverts, Fórmula de Dooge, Fórmula de Kirpich e George Ribeiro, deixando a critério do usuário a escolha da mais adequada para o seu estudo (Figura 14). Existe também, a possibilidade de se digitar o valor do tempo de concentração, caso seja necessário arredondamentos, ou mesmo, arbitrar um valor em bacias hidrográficas menores. Para isso, basta clicar dentro da caixa de exibição do tempo de concentração, deletar o valor informado e digitar o valor desejado.

**Figura 14 – Cálculo do tempo de concentração.**

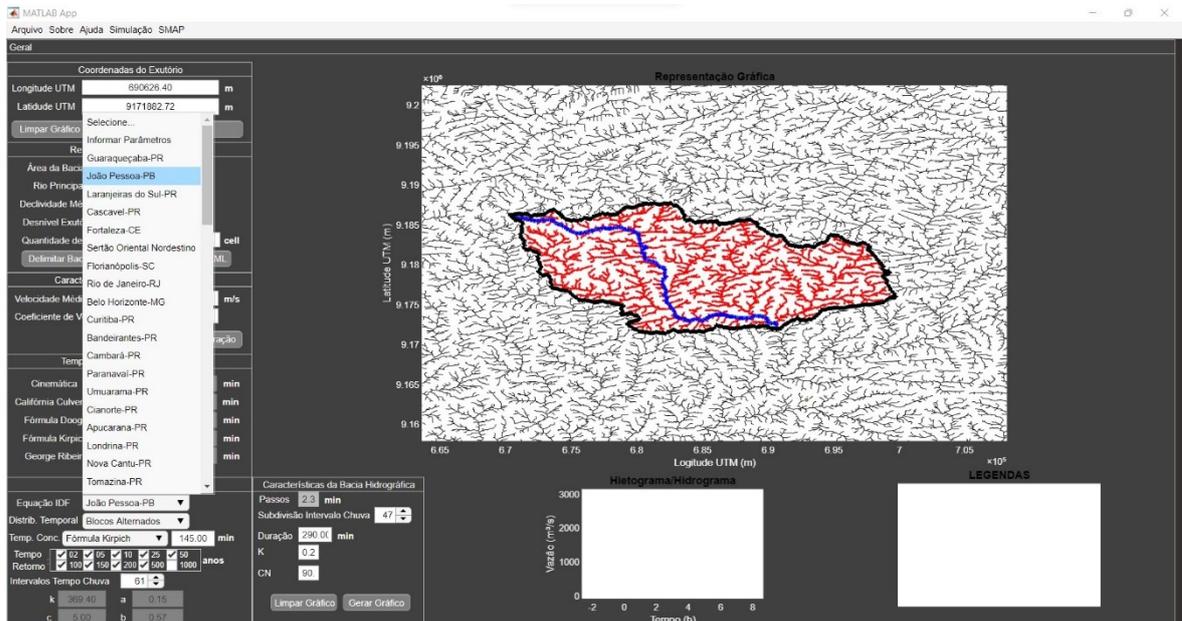


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3 ELABORAÇÃO DA CHUVA DE PROJETO

As chuvas de projeto são representações simplificadas da distribuição temporal da precipitação. Para representação da distribuição temporal da chuva, utilizou-se o método dos blocos alternados, por representar as condições mais crítica possível da degradação temporal, conseqüentemente gerar hidrogramas críticos (TUCCI, 2004). Além da distribuição temporal, o operador deve escolher uma das 74 (setenta e quatro) curvas IDF conhecidas, podendo introduzir tais parâmetros manualmente (Figura 15). A quantidade de intervalo de tempo e subdivisões de tais intervalos, possui valores predefinidos de 61 e 47, respectivamente, com a possibilidade de alteração em combinações infinitas.

Figura 15 – Seleção da curva IDF.

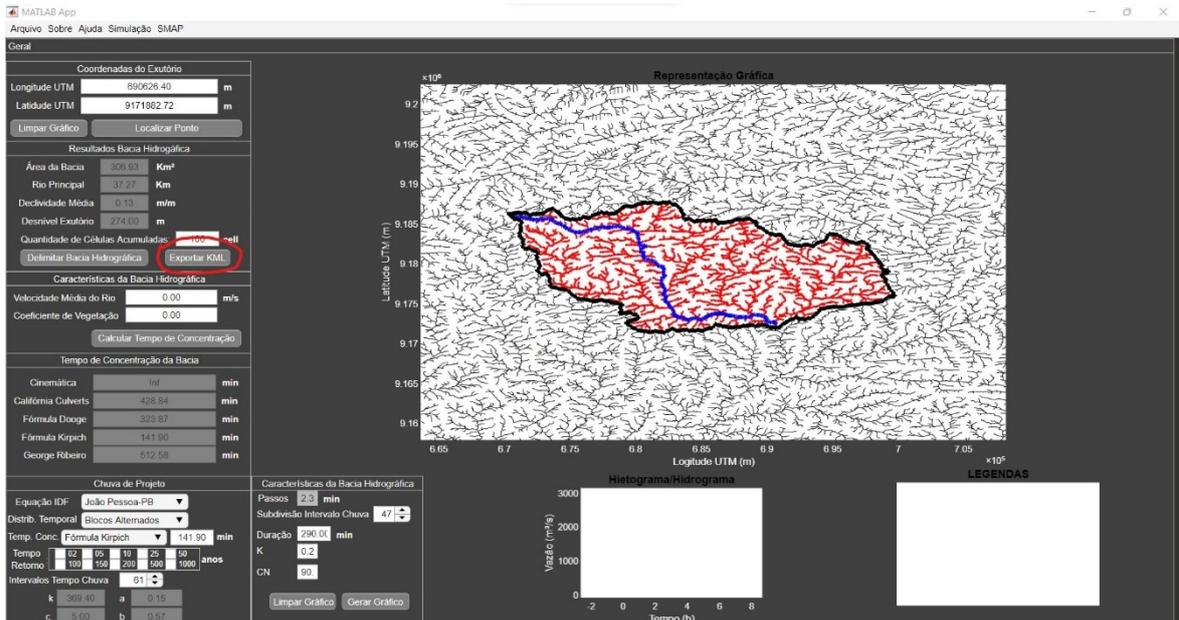


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA

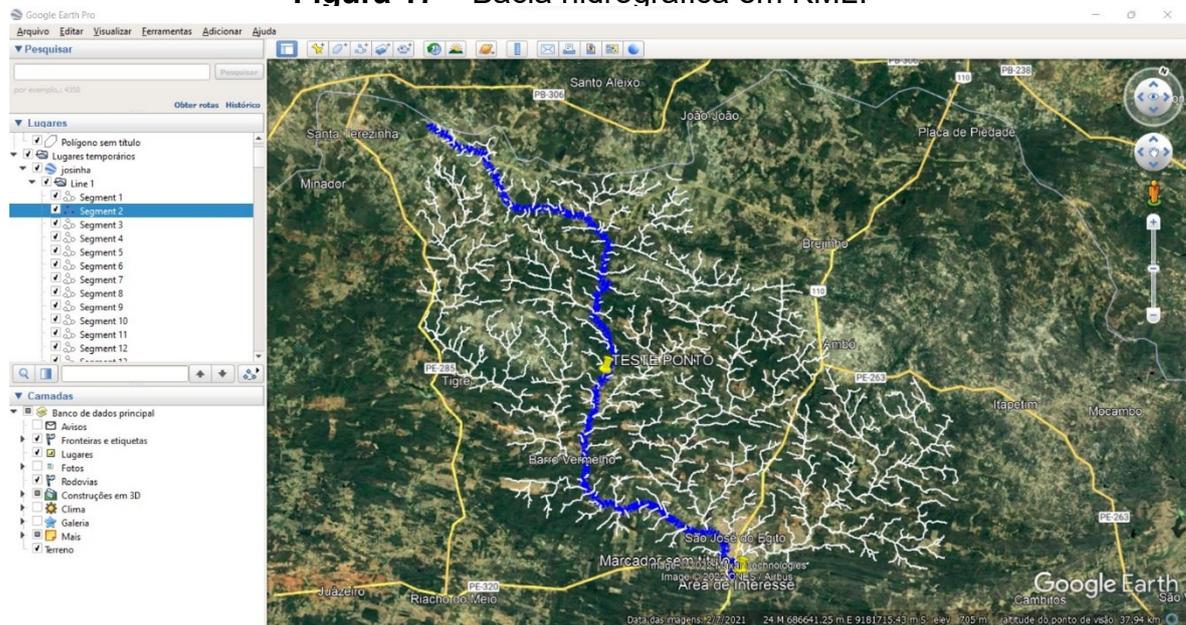
Para transformar a chuva em escoamento superficial, torna-se necessário eliminar as perdas decompondo a chuva total acumulada em chuva efetiva. Utilizou-se as formulações matemáticas do Método NRCS, em virtude da facilidade de aplicação e por possuir uma generosa quantidade de trabalhos publicados que ajustam o seu principal parâmetro *Curve Number* (CN), em quatro tipos de solo em diversos padrões de ocupação. Para facilitar a determinação do CN médio da bacia hidrográfica em estudo, criou-se um botão, “Exportar KML”, que converte a bacia hidrográfica delimitada pelo software desenvolvido, em um arquivo no formato .KML (Figura 17). Podendo ser aberto em aplicações semelhantes ao *Google Earth*, possibilitando a visualização da bacia hidrográfica sobreposta com o uso do solo, vegetação em diferentes estações do ano e períodos distintos da ocupação antrópica.

**Figura 16** – Exportação da bacia hidrográfica para o formato KML.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 17** – Bacia hidrográfica em KML.



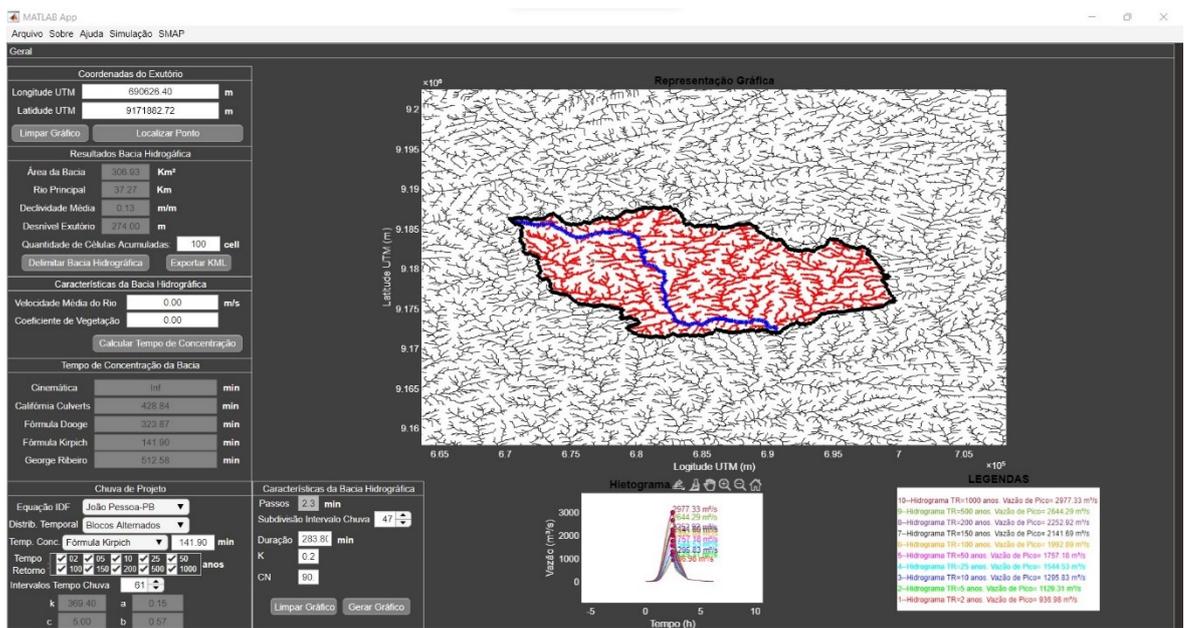
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.5 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMA DE PROJETO

Na estimativa do hidrograma sintético do ponto exutório da bacia hidrográfica em estudo, fez-se a convolução dos gráficos obtidos pelo Método NRCS para cada

intervalo de tempo. Para utilização do algoritmo, o usuário deve selecionar ao menos um dos períodos de retorno sugeridos, possibilitando a simulação de vários hidrogramas para cada tempo de recorrência selecionado. O *software* MH2GEO apresenta na área branca na parte inferior esquerda da tela, os hidrogramas obtidos para cada tempo de retorno selecionado, diferenciando por cores (Figura 18).

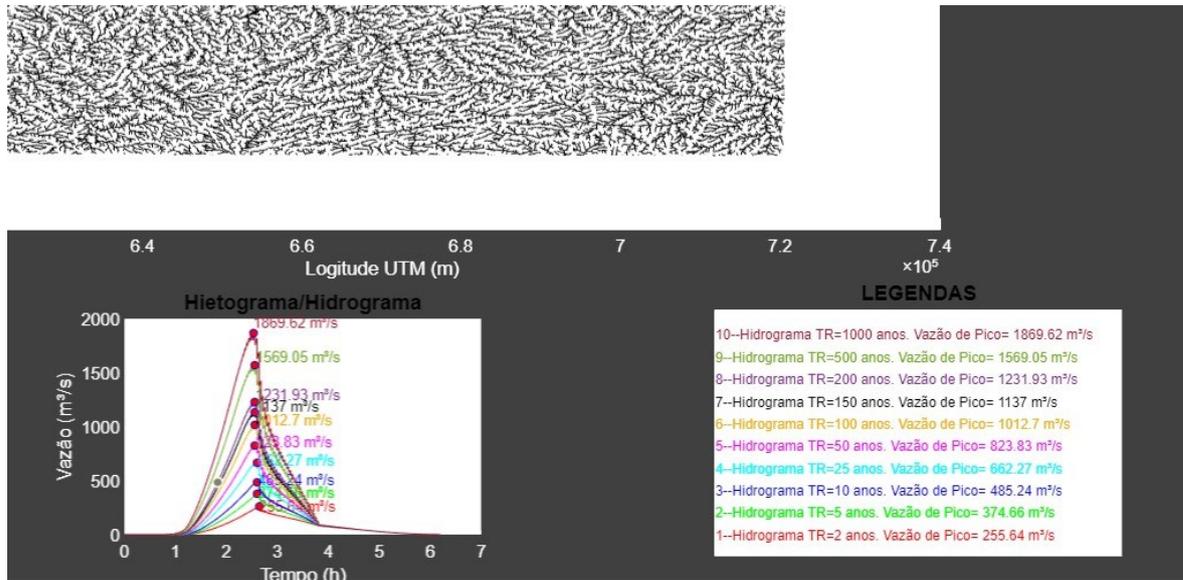
**Figura 18** – Exibição do hidrograma de projeto.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Observa-se, que a legenda foi introduzida ao lado dos hidrogramas sintéticos, abaixo em branco de exibição gráfica inferior à direita (Figura 19). Tal separação, tornou-se necessário em virtude da quantidade de informações existentes nos gráficos que representam os hidrogramas e as vazões máximas, para cada tempo de retorno solicitado. Desta forma, a inclusão da legenda minimiza a quantidade de dados exibidos em uma mesma área da tela, facilitando a compreensão e correlação das cores utilizadas para diferenciar cada tempo de retorno e o respectivo hidrograma confeccionado.

**Figura 19** – Hidrograma de projeto para cada tempo de retorno informado.

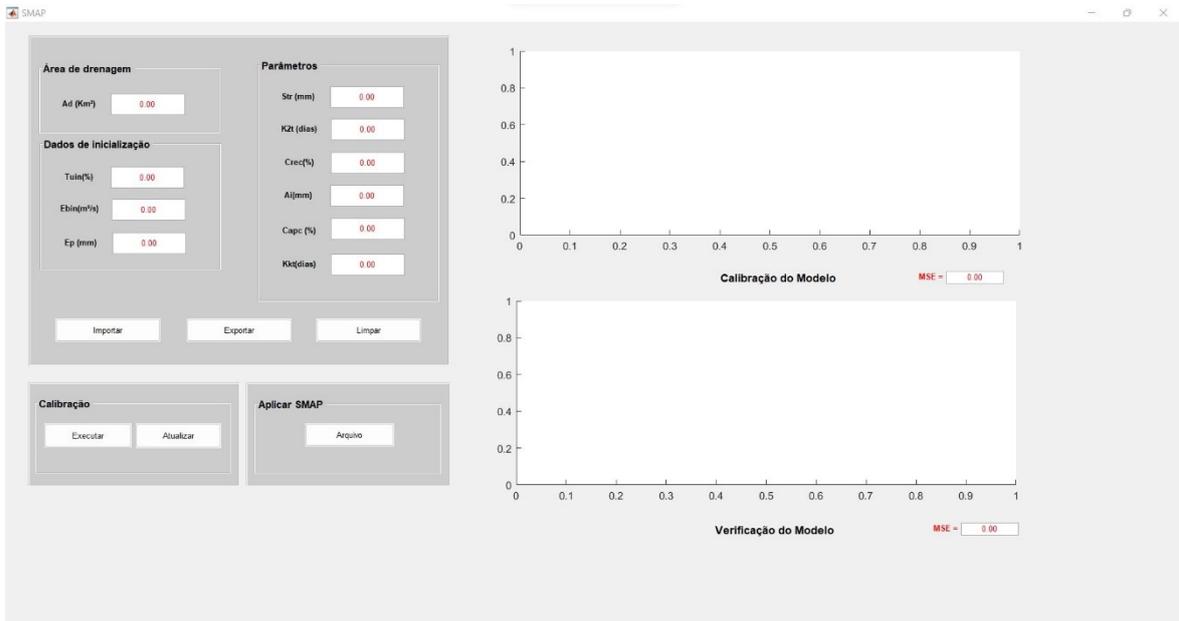


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.6 MODELO CHUVA-VAZÃO SMAP

Para utilização da modelagem hidrológica através do SMAP, fez-se necessário o desenvolvimento de um algoritmo em MATLAB que possibilitasse uma padronização dos dados de entrada e uma *interface* (Figura 20) que permitisse a calibração e validação do modelo de maneira intuitiva. A rotina criada, permite a exportação dos parâmetros calibrados em uma planilha no formato Excel, que posteriormente pode ser introduzida novamente no modelo.

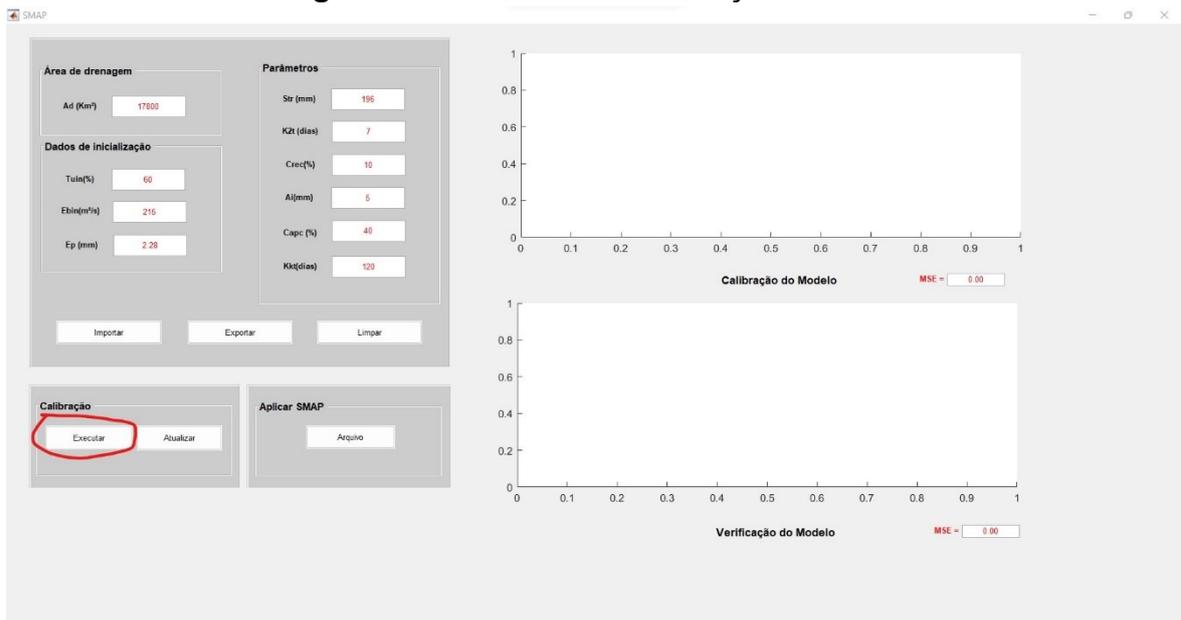
**Figura 20** – Tela inicial do software desenvolvido para o módulo SMAP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

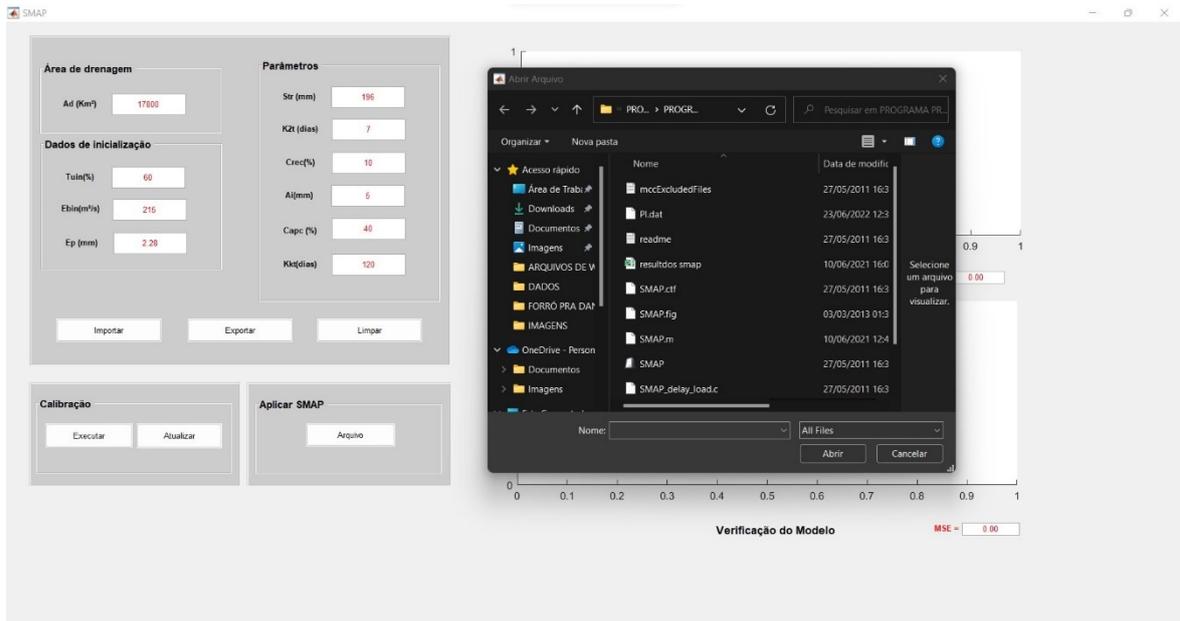
O primeiro passo para utilização do SMAP é inserir os dados de precipitação e de vazões, para um mesmo período, necessários na calibração do modelo (Figura 21). O padrão do programa mostra os arquivos das versões mais antigas do Excel (.xls), entretanto ao clicar em “tipo” e modificar a seleção para “All Files” (Figura 22) que as planilhas na versão mais recente (.xlsx) serão aceitas (Figura 21).

**Figura 21** – Iniciando a Calibração do Modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 22** – Importar dados de arquivos de Excel(\*.xlsx).

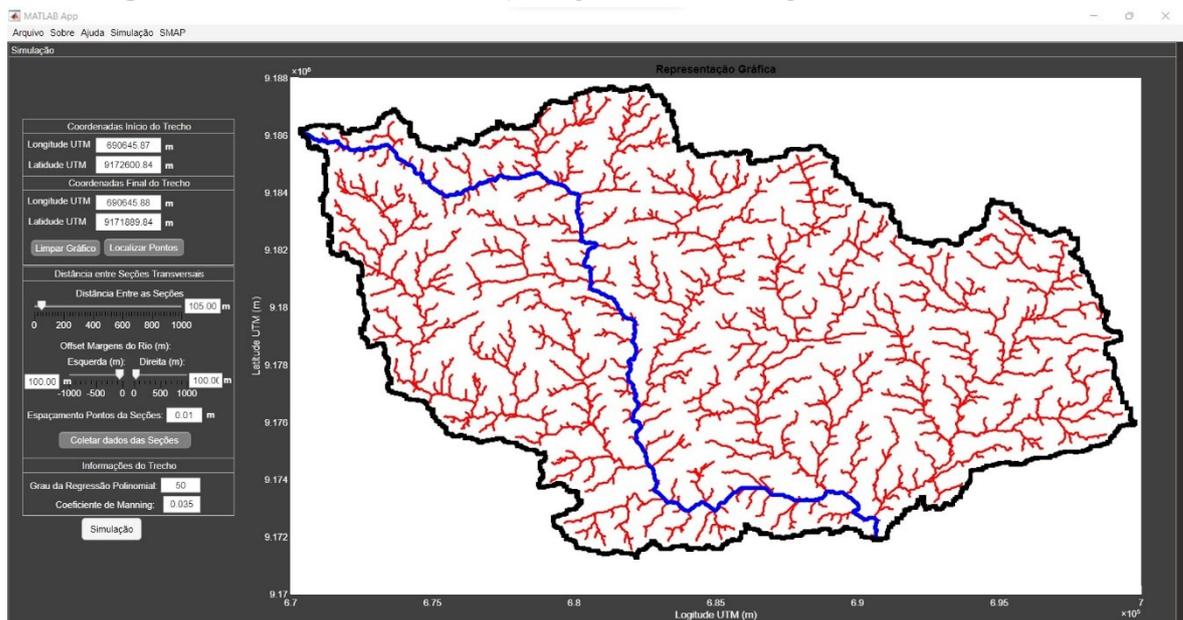


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.7 DADOS TOPOGRÁFICOS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

O trecho em estudo é feito em uma nova janela de *interface*, que rerepresenta as peças gráficas da bacia hidrográfica em estudo, ao mesmo tempo que apresenta novas ferramentas que possibilitam a demarcação do trecho de rio analisado (Figura 23).

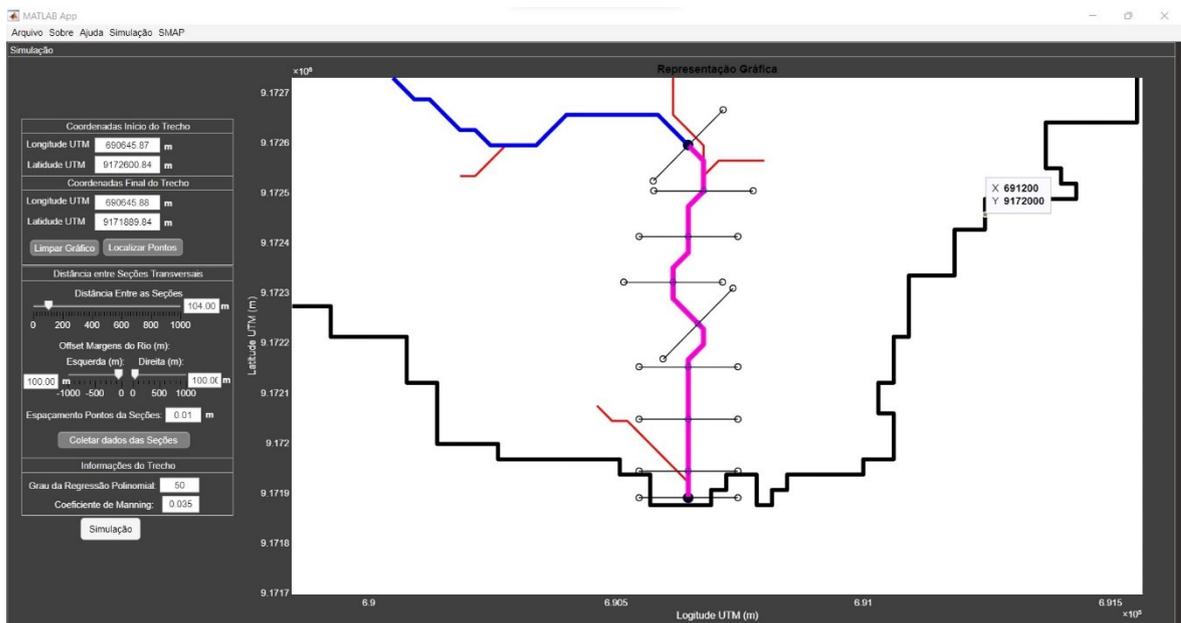
**Figura 23** – Nova interface aplicação da modelagem hidrodinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

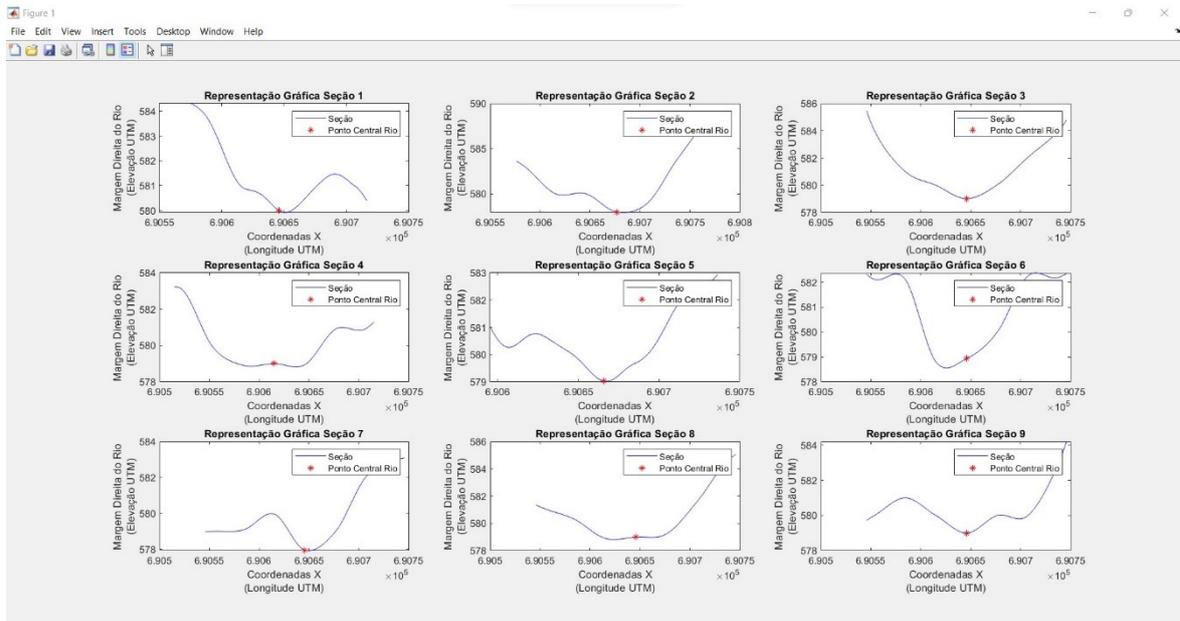
Informadas as coordenadas geográficas de início e fim de cada trecho, configurando parâmetros da largura do rio e distanciamento entre cada seção transversal (Figura 24), obtêm-se os dados topográficos estimados através do MNT introduzido previamente, para cada seção transversal selecionada (Figura 25). A exibição gráfica das seções transversais, torna-se necessário para verificação das coordenadas geográficas que são calculadas. Em ocasiões distintas, as coordenadas podem ser extraídas equivocadamente no algoritmo interpolador dos valores solicitados, que possuem espaçamentos relativos inferiores aos da resolução espacial do MNT. A posição da seção transversal no trecho de rio analisado pode ocasionar erros numéricos nos valores estimados para camada *raster*, ocasionando falhas na obtenção dos pontos que compõem a seção transversal. Esse erro, pode ser facilmente contornado, relocando as seções transversais que possuem falhas na exibição das seções transversais.

**Figura 24** – Delimitação do trecho do rio analisado e seções transversais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 25** – Obtenção dos dados topográficos para cada seção transversal.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

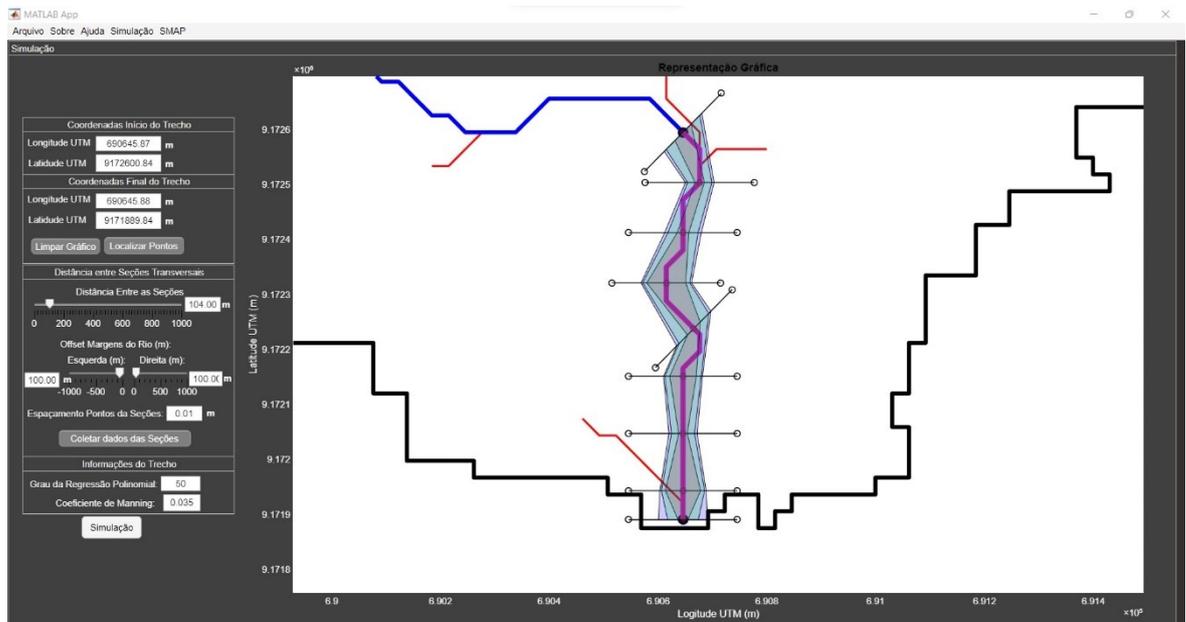
## 5.8 MODELAGEM HIDRODINÂMICA SIMPLIFICADA

A etapa final de modelagem é aplicação do método de Muskingum. O software desenvolvido, simula a propagação da onda de cheia em cada seção transversal, a partir do hidrograma sintético obtido pelo Método NRCS, estimando a vazão máxima gerada pela bacia hidrográfica em estudo, correspondente para cada tempo de retorno preestabelecido. O sentido de propagação da onda de cheia, se dá da primeira seção transversal, que fica localizada no ponto inicial do trecho informado, para a última seção transversal gerada, localizada no ponto final introduzido na demarcação do trecho analisado.

A representação gráfica das áreas inundadas é exibida por polígonos coloridos, onde cada cor impressa, corresponde ao acréscimo estimado para a área inundada, em virtude do aumento da vazão máxima alcançada para cada tempo de retorno selecionado, que conseqüentemente, eleva o nível da água em cada seção transpassada, ocasionando um maior distanciamento numérico das coordenadas geográficas do talvegue. Quanto maior a vazão do fluxo, maiores serão as áreas molhadas e perímetros molhados, por seguinte, observa-se maiores valores para as abscissas e as ordenadas dos limites de integração “a” e “b”, na aplicação da equação

de Manning. As cores definidas para os polígonos representados no gráfico, corresponde as cores definidas para cada tempo de retorno selecionado (Figura 26).

**Figura 26** – Representação gráfica para áreas inundadas para cada tempo de retorno selecionado.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Desta forma, o hidrólogo pode acompanhar o avanço da onda de cheia no trecho de rio analisado, ao mesmo tempo, que observar o aumento das áreas inundadas em decorrência do aumento de tempo de retorno considerado nas simulações.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa desenvolveu uma plataforma integrada de modelagem hidrológica e hidrodinâmica utilizável em pequenas bacias hidrográficas. O ambiente computacional desenvolvido em MATLAB (C) é capaz de ler informações topográficas disponibilizadas nos arquivos do SRTM, delimitar bacias hidrográficas, obter as características morfométricas, determinar uma chuva de projeto, estimar um hidrograma de projeto, simular a propagação de onda de cheia através do método de Muskingum. Além de estimar as vazões máximas através de uma modelagem do modelo hidrológico SMAP, com intuito de auxiliar os hidrólogos no dimensionamento de dispositivos de drenagem em bacias hidrográficas, que possuem pouco, ou nenhum, monitoramento dos parâmetros hidrológicos.

O *software* MH2GEO, foi desenvolvido com uma *interface* pensada de maneira a minimizar a quantidade de operações necessárias para obtenção das variáveis, indispensáveis nos cálculos hidrológicos. Como resultados, destaque-se a possibilidade de elaborar mapas gráficos e a exportação da bacia hidrográfica no formato *kml*. A integração de diferentes ferramentas em um único ambiente, sem dúvidas, é uma das suas melhores características. Geralmente, o hidrólogo tem que utilizar ao menos dois, até três programas, para dispor de tais informações.

Outro ponto relevante, encontra-se na velocidade do processamento dos dados geoespaciais e facilidade na obtenção dos parâmetros morfométricos, quando comparado com estudos disponíveis na literatura técnica. Observa-se ainda, que para delimitação de uma bacia hidrográficas, identificação do rio principal, determinação da extensão e declividade média do rio, desnível entre o exutório e cume mais distante, assim como obtenção da área da bacia hidrográfica, são obtidos com a execução de poucos comandos.

As configurações acima da média da máquina utilizada para testes, alertam para a necessidade de otimização dos algoritmos dos cálculos matemáticos e dos códigos computacionais, responsáveis pela exibição das peças gráficas no *display*. As inconsistências do produto e inconfiabilidades registradas, estão relacionadas com a implantação equivocada dos códigos computacionais, reflexo da inexistência de testes de *software*, em decorrência do cronograma de entrega. Ficando para uma outra etapa a identificação dos defeitos, erros, falhas e seus respectivos tratamentos.

Torna-se imperativo, a alocação dos processos gráficos do MH2GEO ao *hardware* de vídeo, sejam eles integrados ou dedicados, de maneira melhorar o tempo de processamento, desempenho de exibição e manuseio durante a operação. Um outro ponto que requer atenção, são os testes do protótipo em diversas plataformas, onde todas funcionalidades das ferramentas são testadas. Os testes de usabilidade são fundamentais no aprimoramento da ferramenta, acessibilidade e na integração entre o usuário e o produto.

Contudo, o *software* em desenvolvimento MH2GEO, mostrou-se eficiente na delimitação e extração dos parâmetros morfométricos de uma bacia hidrográfica, estimativa do hidrograma sintético, simulação da transformação de chuva em vazão (SMAP) e na propagação de uma onda de cheia ao longo de um trecho de rio aplicando o Método de Muskingum, em bacias hidrográficas com áreas inferiores a 1.000,00 km<sup>2</sup> e trecho de rios com extensão máxima de 25,00 km com até cinquenta seções transversais. Mostrando-se uma ferramenta com potencialidade para ser utilizada nos processos de planejamento, dimensionamento, avaliação dos riscos e controle de enchentes das obras de drenagem.

O sistema é uma ferramenta que se encontra em fase de desenvolvimento, necessitando de uma série de aprimoramentos e novas implementações, de modo que possa atingir todo seu potencial. Dentre as modificações e implementações, recomenda-se o aprimoramento da *interface* gráfica, interação com usuário através de janelas informativas com orientações e dicas de utilização, desenvolvimento de base mais sofisticada de simulação, incorporação de uma maior quantidade de equações para obtenção do tempo de concentração, expansão do catálogo de curvas IDF, introdução de mais métodos de distribuição temporal da chuva e acoplamento de um módulo de dimensionamento de bueiros celulares, canais, orifícios, calhas e vertedouros.

## REFERÊNCIAS

BECK, H.E.; BRUIJNZEEL, L.A.; van DIJK, A.I.J.M.; McVICAR, T.R.; SCATENA, F.N.; SCHELLEKENS, J. The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.17, p.2613-2635, 2013.

BRAGA, A.P.; LUDEMIR, T.B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Redes neurais artificiais: Teoria e aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

Bravo, J. M.; Pedrollo, O. C.; Collischonn, W.; Paz, A. R.; Uvo, C. B. Previsões de Curto Prazo de Vazão Afluente ao Reservatório de Furnas Utilizando Redes Neurais Artificiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, Volume 13 n.2 Abr/Jun 2008, pp.77-88.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em Modelos e Simulação Hidrológica**. Fortaleza: Astef/Expressão Gráfica, Fortaleza, 2009. 166p.

FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais**. São Paulo: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano, 2012.

FORTUNATO, O.M. **Análise da Variabilidade Espacial e Temporal de Atributos Hidrológicos em Diferentes Escalas na Bacia do Rio Capibaribe (PE)**. 17p-138p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2010.

GOMES L. F. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VALENÇA, M. J. S. Modelo Baseados na Técnica de Redes Neurais para Previsão de Vazões na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, Volume 15 n.1, pp. 05-15, Jan/Mar 2010.

KURKDJIAN, M. L. N.; PEREIRA, N. M. O Desenvolvimento das Geotecnologias e suas Aplicações no Planejamento Urbano e Plano Diretor. **Revista Infogeo**, Curitiba-PR, Edição Especial: Cidades, nov 2006.

LEITÃO, F. T. P. **Modelagem Hidrodinâmica 1d, 1d/2d e 2d do Efeito de Maré no Rio Cocó**. 138p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade

Federal do Ceará, Programa de PósGraduação em Engenharia Civil. Fortaleza 2018.

LIBARDI, P. L. O.; BARBOSA, V. **Métodos ágeis**. 35 p. Monografia (Graduação em Ciência da Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2010. Disponível em: [https://www.ft.unicamp.br/liag/Gerenciamento/monografias/monografia\\_metodos\\_ageis.pdf](https://www.ft.unicamp.br/liag/Gerenciamento/monografias/monografia_metodos_ageis.pdf). Acesso em: 16 ago. 2022.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP: A simplified hydrologic model**. In: Applied Modeling in Catchment Hydrology. Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA. 167–176,1982.

MATA-LIMA, H.; SILVA, E.; RAMINHOS, C. Bacias de retenção para gestão do escoamento: métodos de dimensionamento e instalação. **REM: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p.97-109. doi: 10.1590/S0370- 44672006000100013, 2006.

MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 8(1):61-70, 2003.

MORIASI, D. B. *et al.* Hydrologic and Water Quality Models: Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, Mich., v. 55, n. 4, p. 1241-1247, 2012.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. **São Paulo: EESC/USP**, 4 ed., 540p, São Carlos 2006.

REIS, J. B. C. dos; PONS, N. A. D.; LOPES, E. S. S. Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) por regressão polinomial. **Geociências**,v. 35, n. 1, p.134- 148, 2016. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9002/8267>

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Vol. 2. Nº 03, pp.01-19, 2009.

SCHWANGHART, W. AND SCHERLER, D. Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surf**, 2014. Disponível em: <https://topotoolbox.wordpress.com/>

SCRUM STUDY. **Um guia para o conhecimento em SCRUM (Guia SBOK™)**.

Edição 2017. Disponível em:

<https://www.scrumstudy.com/SBOK/SCRUMstudySBOKGuide 2017-Portuguese.pdf>.

Acesso em: 10/08/2022

Tokar, A. S.; Markus, M. Precipitation. Runoff Modeling Using Artificial Neural Networks and Conceptual Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, 5(2), pp. 156-161, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Ed. UFRGS, 3 ed, Porto Alegre, 944p, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Ed. UFRGS, 2 ed., Porto Alegre, 669p, 2005.