



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
PRÓ REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Hugo Lopes Pereira

**ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL
PARA DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA
DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE UM MDE**

Palmas-TO
2018

HUGO LOPES PEREIRA

**ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL
PARA DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA
DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE UM MDE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Tocantins, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Modelagem hidráulica e hidrológica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio José Catalunha

**Palmas-TO
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

P436e Pereira, Hugo Lopes.

Elaboração e avaliação de uma ferramenta computacional para delimitação automática e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas a partir de um MDE. / Hugo Lopes Pereira. – Palmas, TO, 2018.

200 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2018.

Orientador: Márcio José Catalunha

1. Bacia hidrográfica. 2. Modelo Digital de Elevação. 3. Caracterização morfométrica. 4. Ferramenta computacional. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

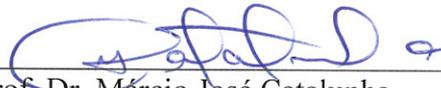
FOLHA DE APROVAÇÃO

HUGO LOPES PEREIRA

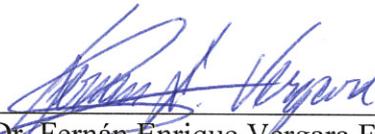
ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL
PARA DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA
DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE UM MDE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental,
Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca
Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

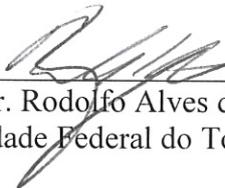
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Márcio José Catalunha
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



Prof. Dr. Fernán Enrique Vérgara Figueroa
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Dr. Rodolfo Alves da Luz
Universidade Federal do Tocantins

Aprovada em: 20 de abril de 2018
Local de defesa: sala 201 do bloco J
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

“Será que é proveitoso gastar tempo para desenvolver e estender habilidades em programação? Sim, porque o investimento pode “contribuir” com sua habilidade em formular questões e na confiança que você terá nas respostas”.

John Chambers

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos:

A Jesus Cristo, pela inspiração proporcionada e por ajudar a superar os momentos mais difíceis durante a elaboração deste trabalho.

A Universidade Federal do Tocantins e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela oportunidade de desenvolver este projeto.

Ao meu orientador, Dr. Márcio José Catalunha, pelos valiosos conselhos, apoio e paciência principalmente pelos atendimentos aos finais de semana.

Aos membros da minha banca, Dr. Fernán Enrique Vergara e Dr. Rodolfo Alves da Luz, pela disposição em contribuir com o trabalho.

A minha esposa Simone, por ouvir por tantas horas meus desabafos, medos e inseguranças.

RESUMO

PEREIRA, H. L. **Elaboração e avaliação de uma ferramenta computacional para delimitação automática e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas a partir de um MDE**. 2018. 199f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental). Fundação Universidade Federal do Tocantins, TO, 2018.

A bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema integrado entre todos os seus elementos constituintes, solo, água, vegetação e fauna, onde toda perturbação natural ou antrópica provoca reações na dinâmica natural da bacia, forçando-a a adaptar-se a este novo ambiente. As ações antrópicas estão relacionadas a atividades socioeconômicas, que diante de um planejamento e gestão ambiental inadequados, se dissociam dos aspectos ambientais entrando em conflito com a capacidade de suporte do ecossistema. Diante deste panorama, vários países têm buscado reequilibrar a dinâmica integrada das bacias hidrográficas, incorporando princípios e normas para a gestão e planejamento de recursos hídricos, utilizando a bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento, além de monitorar os efeitos oriundos do desequilíbrio do sistema. O projeto e planejamento de recursos hídricos, necessita de informações que permitam a avaliação do comportamento hidrológico da bacia. Para isso, é necessário quantificar todas as características morfométricas das bacias, pois, ao se estabelecerem relações e comparações entre tais características e os dados hidrológicos conhecidos, pode-se determinar indiretamente os valores hidrológicos em locais nos quais faltam dados. Comumente, para se iniciar uma análise hidrológica ou ambiental, preliminarmente procede-se a delimitação da bacia hidrográfica, que em até pouco tempo era realizada através de métodos analógicos. Com o advento dos softwares SIG e da representação digital do relevo a partir de técnicas de sensoriamento remoto, tornou-se possível automatizar esta tarefa. A partir disso, buscou-se com este trabalho elaborar uma ferramenta computacional, utilizando a linguagem computacional R, para delimitação e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) globais, de forma automática, que permita fornecer rapidamente os parâmetros morfométricos, proporcionando ao usuário concluir também pelo modelo que mais se adequa a sua necessidade. Buscou-se avaliar a ferramenta elaborada com um estudo de caso comparativo em quatro sub-bacias hidrográficas do estado do Tocantins, com características de relevo distintas, apresentando uma alternativa para validação hidrológica de modelos digitais de elevação a partir de dados altimétricos do SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária). Com o estudo de caso, concluiu-se que a ferramenta proposta funciona satisfatoriamente para o que se propõe. Quando comparada com o programa *r.basin.py* a partir do software Grass GIS, a ferramenta apresentou resultados similares em relação aos valores da maioria dos parâmetros morfométricos; apresentando, contudo, um detalhamento inferior da rede de drenagem, associado a diferenças no algoritmo de preenchimento de dados espúrios, no entanto este problema pode ser contornado ajustando os valores das configurações iniciais do *threshold*.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica, Caracterização morfométrica, Modelo Digital de Elevação, R, Shell Script.

ABSTRACT

PEREIRA, H. L. **Elaboration and evaluation of a computational tool for automatic delimitation and morphometric characterization of watersheds from a DEM.** 2018. 199f. Dissertation (Professional Master's in Environmental Engineering). Fundação Universidade Federal do Tocantins, 2018.

The watershed can be understood as an integrated system among all its constituent elements, soil, water, vegetation and fauna, where every natural or anthropic disturbance causes reactions in the natural dynamics of the basin, forcing it to adapt to this new environment. Anthropic actions are related to socio-economic activities, that in the face of inadequate environmental planning and management, dissociate from environmental aspects getting to conflict with the ecosystem's capacity to support. Facing this panorama, several countries have sought to rebalance the integrated dynamics of watersheds, incorporating principles and norms for the management and planning the effects deriving of the unbalance of the system. The project and planning of hydric resources need information that allows the evaluation of the hydrological behavior of the basin. For this, it is necessary to quantify all the morphometric characteristics of the basins, because, when establishing relationships and comparisons among such characteristics and the known hydrological data, one can indirectly determine the hydrological values in places where data are missing. Commonly, to initiate a hydrological or environmental analysis, preliminarily the delimitation of the watershed is proceeded, which until recently it was carried out by analogical methods. With the advent of GIS softwares and the digital representation of relief from remote sense techniques, it became possible to automate this task. From this, it sought with this work to elaborate a computational tool, using R computational language, for the delimitation and morphometric characterization of watersheds from global Digital Elevation Models (DEM), in automatic way, that permits provide quickly the morphometric parameters, offering to the user also to conclude by the model that best suit it need. The objective of this study is to evaluate the elaborated tool with a study of comparative in four river sub-basins in the state of Tocantins, with different relief characteristics, presenting an alternative for hydrological validation of digital elevation models from the SIGEF (Portuguese abbreviation of System of Land Management) altimetric data. With the case study, it was concluded that the proposed tool works satisfactorily for what is proposed. When compared with the `r.basin.py` program from the Grass GIS software, the tool presented similar results in relation to the values of most of the morphometric parameters; however, a lower drainage network detail, associated with differences in the spurious data filling algorithm, though, this problem can be circumvented by adjusting the initial threshold values configurations.

Keywords: Watershed, Morphometric Characterization, Digital Elevation Model, R, Shell Script.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação do método de Simpson para cálculo de áreas de bacias hidrográficas, através de aproximação parabólica.	34
Figura 2 - Classificação de uma bacia de 4ª ordem (A) e duas bacias de 2ª ordem (B e C)	41
Figura 3 – Perfis longitudinais esquemáticos, exemplificando o índice de gradiente de canais. Em A, perfil convencional em escala aritmética, e em B, perfil semi logarítmico.	42
Figura 4 - Curva hipsométrica de uma bacia hidrográfica	48
Figura 5 - Diferença entre as representações de altitude dos modelos digitais de superfície (DSM) e modelos digitais do terreno (DTM).	51
Figura 6 - Esquema de como funciona a ferramenta flow direction no Arc GIS, determina a direção de fluxo de cada célula no raster.	58
Figura 7 - Esquema de como funciona a ferramenta flow accumulation no Arc GIS, determina o fluxo acumulado de todas as células no raster.	58
Figura 08: Principais etapas realizadas para delimitação de bacias hidrográficas a partir de dados SRTM.	62
Figura 9 - Fluxograma de funcionamento da ferramenta computacional.	67
Figura 10 - Principais etapas realizadas em R através do script base para a ferramenta proposta.	70
Figura 11 - Árvore de diretórios e arquivos da pasta de instalação da ferramenta computacional proposta.	72
Figura 12 - Código em Shell Bash utilizado no script de instalação para verificar se um programa já está instalado no sistema, caso contrário o programa é instalado.	72
Figura 13 – Fluxo de diálogos do funcionamento da ferramenta computacional.	74
.....	74
Figura 14 - Código em Shell Bash utilizado para editar os arquivos de textos que serão importados pelos softwares R e texlive para processamento e edição do relatório final da bacia em pdf.	75
Figura 15 - Código utilizado para delimitação de um buffer de 500 m em torno do ponto adotado como exutório, para que seja tomado como novo exutório o ponto sobre a rede de drenagem mais próximo.	77
Figura 16 – Exemplo numérico de um Modelo Digital de Elevação hipotético (A), dos rasters de direção de fluxo (B), área de contribuição (C) e Fluxo acumulado (D).	78
Figura 17 - Procedimento de suavização do perímetro da bacia a partir do comando gSimplify em R.	79
Figura 18 – Exemplo hipotético de uma rede de drenagem, demonstrando o critério utilizado para definição do canal principal.	81
Figura 19 - Tabela de atributos do arquivo <i>shapefile</i> da rede de drenagem da bacia gerada pelo código <i>rsaga.geoprocessor("ta_channels", module=5,...)</i>	82
Figura 20 - Algoritmo para definição do canal principal da bacia.	83

Figura 21 - Algoritmo para definição das inclinações aparente (linhas 1 a 12), média (linhas 14 a 18) e equivalente (linhas 20 a 23) do canal principal da bacia.	84
Figura 22 - Algoritmo gerar o mapa de relevo sombreado em R.	86
Figura 23 - Algoritmo para extração da curva hipsométrica de bacias hidrográficas a partir de R	86
Figura 24 – Desenho esquemático de um perfil hipotético de um MDE, representando as cotas definidas para contagem dos píxeis do MDE menores ou iguais a elas para plotagem da curva hipsométrica.	88
Figura 25 - (a) Mapa de elevação e (b) relevo sombreado de uma sub-bacia do Ribeirão Taquarussuzinho em Palmas-TO, gerados automaticamente pela ferramenta proposta.....	92
Figura 26 - (c) Mapa de declividade e (d) direção de fluxo de uma sub-bacia do Ribeirão Taquarussuzinho em Palmas-TO, gerados automaticamente pela ferramenta proposta.....	92
Figura 27 - (e) Curva hipsométrica e (d) perfil longitudinal do terreno e inclinações aparente, média e equivalente do canal principal de uma sub-bacia do Ribeirão Taquarussuzinho em Palmas-TO, gerados automaticamente pela ferramenta proposta.	93
Figura 28 – Fluxo de funcionamento de uma aplicação web construída a partir de R e Shiny.	95
Figura 29 – Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os <i>widgates</i> de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição dos mapas de elevação, relevo sombreado, aspecto e declividade. Note logo acima na coluna à direita os <i>action buttons</i> para que o usuário possa baixar os arquivos vetoriais da bacia e rede de drenagem.	96
Figura 30 - Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os <i>widgates</i> de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição com a tabela com as características morfométricas calculadas.....	96
Figura 31 - Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os <i>widgates</i> de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição com a curva hipsométrica e o gráfico do perfil longitudinal do canal principal.....	97
Figura 32 - Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os <i>widgates</i> de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição com o conteúdo de ajuda.....	97
Figura 33: Mapa de localização da área de estudo.	100
Figura 34 - Representação da malha fundiária dos imóveis certificados pelo SIGEF da região Sudeste.....	104
Figura 35 - Representação da malha fundiária dos imóveis certificados pelo SIGEF no estado do Tocantins.....	104
Figura 36 - (a) Imóveis certificados pelo SIGEF pertencentes à bacia do Rio Soninho, (b) distribuição dos pontos de controle adotados para validação dos MDE's.....	106
Figura 37 - Exemplo da disposição dos dados dos vértices das parcelas no SIGEF.	107
Figura 38 - Mapa de elevação da sub-bacia do Ribeirão Taquarussu (a) e do Ribeirão dos Mangues (b).....	117
Figura 39 - Mapa de elevação da sub-bacia do Ribeirão Curicaca (a) e do Rio Soninho (b).	118

Figura 40 – Diálogos para inserção dos dados de entrada na ferramenta r.basin do Grass GIS (esquerda) e da ferramenta proposta (direita).....	119
Figura 41 – Exemplo do funcionamento do processo de simplificação de linhas do algoritmo de Douglas e Peucker 1973.	124
Figura 42 – Sobreposição dos divisores obtidos pelos processos de suavização pela ferramenta proposta (azul), Pit-Remove/Arc GIS (verde) e r.basin (vermelho).....	126
Figura 43 - Diferença entre as suavizações dos contornos das bacias gerados pela ferramenta propositas e por r.basin (Grass GIS).	126
Figura 44 – Desenho esquemático comparando o preenchimento de dados espúrios de um MDE em seu estado bruto (a), a partir dos algoritmos de Wang e Liu (2006) (b) e do algoritmo de Jensen e Domingue (1988) (c).....	128
Figura 45 - Curva hipsométrica da sub-bacia do Ribeirão Taquaruçuzinho geradas automaticamente pela ferramenta proposta (a) e pelo programa r.basin (b). E curva hipsométrica gerada automaticamente para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues pela ferramenta proposta (c) e pelo programa r.basin (d).....	130
Figura 46 - Gráfico gerado automaticamente por r.basin, demonstra o número de células que drenam para cada ponto do canal principal.	131
Figura 47 – Mapas de direção de fluxo para a bacia do Ribeirão Taquarussu a partir do MDE SRTM1 (a) e TOPODATA (b).	134
Figura 48 – Mapas de relevo sombreado para a bacia do Ribeirão Taquarussu a partir do MDE SRTM1 (a) e TOPODATA (b).	134
Figura 49 – Gráfico da Densidade de drenagem (Dd) x threshold (T), para uma determinada declividade média de uma bacia.	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferentes conceitos de bacias hidrográfica encontrados na literatura.	29
Quadro 2 - Diferentes conceitos de sub-bacias hidrográfica encontrados na literatura.	30
Quadro 3 - Diferentes conceitos de microbacias hidrográfica encontrados na literatura.....	30
Quadro 4 - Exemplo de cálculo da declividade média usando o método das quadrículas.....	50
Quadro 5 - Principais regras do Padrão de Exatidão Cartográfico para as escalas de 1:50.000 e 1:100.000.....	56
Quadro 6 – Alguns softwares que podem ser usados para extração de dados fisiográficos do relevo.....	60
Quadro 7 - Características morfométricas geradas automaticamente pela ferramenta proposta.....	85
Quadro 8 - Equações para estimar o tempo de concentração em horas, a partir de parâmetros físicos.....	90
Quadro 9 - Arquivos gerados no processamento da ferramenta, disponíveis na pasta output.	90
Quadro 10 – Tecnologias e recursos utilizados para desenvolvimento da aplicação web.....	94
Quadro 11 - Relação dos MDE's utilizados por bacia.....	105
Quadro 12 - Valores do EMQ para o MDE SRTM3 em diversas pesquisas.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ocorrência das variáveis morfométricas em 20 documentos analisados.	36
Tabela 2 - Classificação da drenagem da bacia a partir da densidade de drenagem proposta por Carvalho e Silva (2003).	40
Tabela 3 - Classificação da drenagem da bacia a partir da densidade de drenagem proposta por Beltrame (1994).	40
Tabela 4 - Resultado da relação entre o comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação de uma bacia.	45
Tabela 5 - Características morfométrica geradas pelo módulo r.basin.py do software livre GRASSGIS.	61
Tabela 6 - Erros verticais por classe de uso da terra para o MDE ASTER, segundo estudos da USGS EUA.	64
Tabela 7 - Relação entre a área dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das Unidades da Federação da região Sudeste do Brasil.	103
Tabela 8 - Relação entre o número de vértices dos polígonos dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das Unidades da Federação da região Sudeste do Brasil.	103
Tabela 9 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu.	112
Tabela 10 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do ribeirão dos Mangues.	112
Tabela 11 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do ribeirão Curicaca.	113
Tabela 12 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do Rio Soninho.	113
90% dos pontos $C < 15$ m.	113
Tabela 13 - Verificação quanto o Erro Médio Quadrático.	116
Tabela 14 - Resultados do teste de tendência para os MDE's em estudo.	117
Tabela 15 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Ribeirão Taquarussu. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).	120
Tabela 16 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).	120
Tabela 17 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Ribeirão Curicaca. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).	121
Tabela 18 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Rio Soninho. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).	121

Tabela 19 – Quantidade de pontos e perímetro dos divisores da sub-bacia do Ribeirão dos Mangues	125
Tabela 20 – Diferença percentual do MDE TOPODATA em relação ao SRTM1 para os parâmetros: Comprimento total dos cursos d'água (Lt), número total dos cursos d'água (Nt), comprimento dos canais de 1ª ordem (L1), número de canais de 1ª ordem (N1), textura topográfica (T) e coeficiente de manutenção (Cm).	132
Tabela 21 - Comparação entre os parâmetros morfométricos gerados automaticamente pela ferramenta proposta em diferentes MDE's para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu. (*) Características com diferenças significativas.	132

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues.....	108
Gráfico 2 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu.	108
Gráfico 3 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do Rio Soninho.....	109
Gráfico 4 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do Ribeirão Curicaca.....	109
Gráfico 5 – Boxplot's das diferenças entre os MDE's e as altitudes coletadas no SIGEF, para as sub-bacias do Ribeirão Taquarussu (a), Ribeirão dos Mangues (b), Ribeirão Curicaca (c) e Rio Soninho (d).	111
Gráfico 6 – Tolerância vertical considerando a escala 1:100.000 classe A, para os MDE's: SRTM1, SRTM3, ASTER e TOPODATA; para as bacias em estudo.	113
Gráfico 7 – Tolerância vertical considerando a escala 1:50.000 classe C, para os MDE's: SRTM1, SRTM3, ASTER e TOPODATA; para as bacias em estudo.	114
Gráfico 8 - Variabilidade dos parâmetros lineares (Comprimento total dos canais, comprimento dos canais de 1ª ordem, textura topográfica e coeficiente de manutenção) obtidos automaticamente pela ferramenta proposta, para o MDE TOPODATA, em relação aos MDE's SRTM1, SRTM3 e ASTER.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área da Bacia

Af – Assimetria da bacia

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

B – Maior largura da bacia

BASH - Bourne-Again SHell

CAD – Computer Aided Design

Cr – Coeficiente de rugosidade

Dd – Densidade de drenagem

DEM - Digital elevation model

Dh – Densidade hidrográfica

Dm – Declividade média da bacia

Eps – Extensão do percurso superficial

ENVI - Environment for Visualizing Images

EPSG - European Petroleum Survey Group

ESRI - Environmental Systems Research Institute

Fb – Forma da bacia

Fr – Frequência dos rios

Fr₁ – Frequência dos canais de primeira ordem

Fs – Densidade de segmentos da bacia

Gcp – Gradiente de canais do canal principal

GDEM - Global Digital Elevation Model

GPS - Global Positioning System

GRASS - Geographic Resources Analysis Support System

GIS - Geographic Information System

H_{max} – Amplitude altimétrica máxima da bacia

IC – Índice de circularidade

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Ir – Índice de rugosidade

IS – Índice de sinuosidade

Kc – Coeficiente de compacidade

Kf – Fator de forma

\bar{L} – Largura média da bacia

L – Comprimento da bacia

L_{\max} – Maior comprimento da bacia

L_a – Comprimento axial do curso d'água

Lat – Latitude

LIDAR - Light Detection And Ranging

L_m – Comprimento médio dos canais de cada ordem

L_{mt} – Comprimento médio dos segmentos

Long – Longitude

L_p – Comprimento do canal principal

L_t – Comprimento total dos cursos d'água

L_u – Comprimento dos canais por trecho

MDA – Ministério do Desenvolvimento Agrário

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDEHC – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital do Terreno

METI - Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NIMA - Imagery and Mapping Agency

N_t – Número total de canais

N_u – Número total de canais para cada ordem

OSGEO - Open Source Geospatial Foundation

P – Perímetro da bacia

P_1 – Altitude do ponto mais alto da bacia

P_2 – Altitude do ponto de desembocadura da bacia

PNHR – Política Nacional de Recursos Hídricos

R - Project for Statistical Computing

R_b – Índice de bifurcação

R_{ib} – Relação entre o comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação

RLM – Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem

R_r – Relação de relevo da bacia

R_{rp} – Relação de relevo do rio principal

S₁ – Declividade aparente do canal principal
S₂ – Declividade média do canal principal
S₃ – Declividade aparente do canal principal
SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SIGEF – Sistema de Gestão Fundiária
SPRING – Sistema de Processamento de Informações georreferenciadas
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
SRTM1 – SRTM res. 1 arc-segundo
SRTM3 – SRTM res 3 arc-segundo
T – Textura topográfica
T_c – Tempo de concentração
TIFF - Tagged Image File Format
TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil
u – Ordem da bacia
UFT – Universidade Federal do Tocantins
UHE – Usina Hidrelétrica de Energia
UTM – Universal Transversa de Mercator
VNIR - Visible and near-infrared
WGS - World Geodetic System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Principais vantagens da ferramenta proposta	23
2 OBJETIVOS.....	25
2.1 Objetivo Geral	25
2.2 Objetivos Específicos	25
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1 A bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento.	26
3.2 Bacia hidrográfica, definições	27
3.2.1 Relação entre os conceitos de bacia hidrográfica e ecossistema	31
3.3 Evolução das técnicas de delimitação de bacias hidrográficas.....	32
3.3.1 Método de Simpson.....	33
3.4 Variáveis morfométricas	35
3.4.1 Parâmetros básicos	38
3.4.2 Parâmetros lineares.....	39
3.4.3 Parâmetros zonais	46
3.4.4 Parâmetros hipsométricos.....	48
3.5 Modelos digitais de elevação.....	50
3.6 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC).....	53
3.7 Delimitação, extração da rede de drenagem e caracterização morfométrica de bacias a partir de softwares SIG e MDE's	57
3.7.1 Procedimentos para delimitação de bacias a partir do software Arc GIS	62
3.8 Limitações dos Modelos Digitais de Elevação.....	63
4 MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.1 Ferramentas computacionais e softwares utilizados.....	65
4.1.1 SAGA GIS.....	67
4.1.2 R e a biblioteca Rsaga	68
4.2 Principais etapas a serem executadas no script em R.....	69
4.3 Descrição da ferramenta computacional.....	70
4.3.1 Instalação	71
4.3.2 Interface	73
4.3.3 Cálculos executados a partir de R.....	75
4.3.3.1 Algoritmo adotado para eliminação dos dados espúrios	76
4.3.3.2 Delimitação da bacia e rede de drenagem	76

4.3.3.3 Determinação do canal principal	80
4.3.3.4 Cálculo dos parâmetros básicos.....	83
4.3.3.5 Cálculo das inclinações do canal principal e declividade da bacia	83
4.3.3.6 Tabela de características morfométricas	84
4.3.3.7 Gráficos e mapas gerados	85
4.3.3.8 Hipsometria	86
4.3.3.9 Dados morfométricos do canal principal.....	88
4.3.3.10 Cálculo dos tempos de concentração.....	89
4.3.3.11 Produtos gerados.....	90
5 VERSÃO WEB	94
6 AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA E RESULTADOS	98
6.1 Área de estudo	98
6.2 Coleta de pontos de controle no SIGEF	100
6.2.1 Sobre o SIGEF.....	102
6.2.2 Modelos digitais de elevação utilizados	105
6.2.3 Metodologia adotada para coleta dos pontos de controle pelo SIGEF.....	105
6.2.4 Escolha dos MDE's mais adequados para o estudo de caso.....	107
6.2.4.1 Verificação quanto a tolerância vertical.....	111
6.2.4.2 Verificação quanto o EMQ	114
6.2.4.3 Verificação quanto a existência de tendências.....	116
6.3 Delimitação e caracterização morfométrica das bacias	117
6.4 Comparação entre a ferramenta elaborada e o programa r.basin do Grass GIS	118
6.4.1 Análise entre os algoritmos de simplificação das linhas dos divisores.	122
6.4.2 Análise quanto aos algoritmos de eliminação de dados espúrios.	127
6.4.3 Análise quanto à hipsometria	128
6.4.4 Comparação entre MDE's	131
7 CONCLUSÕES	137
8 TRABALHOS FUTUROS	140
8.1 Primeira proposta.....	140
8.2 Segunda proposta.....	140
9 REFERÊNCIAS	142
10 APÊNDICE A: Script de instalação do Bacia Fácil	152
11 APÊNDICE B: Script para instalação dos pacotes necessários no R	156
12 APÊNDICE C: Shell script para coleta e armazenamento dos dados de entrada através de interface gráfica utilizando Zenity.	157

13 APÊNDICE D: Script em R para delimitação automática e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas	159
14 APÊNDICE E: Script em Latex para edição do relatório final da bacia	174
15 APÊNDICE F: Lançador desktop para Ubuntu.....	177
16 ANEXO A: Instalação e primeiros passos com R+SAGA (Hengl et al. 2010)	178
17 ANEXO B: Relatório da bacia gerado automaticamente	183

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é definida como uma área delimitada por fatores topográficos, que funciona como área de captação natural da água de precipitação afluindo para um único ponto denominado, exutório. Todos os seus componentes naturais – solo, água, vegetação e fauna – funcionam como um sistema e convivem em permanente e dinâmica interação, reagindo a interferências naturais (CARDOSO, DIAS, *et al.*, 2006). Além disso, o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica também é afetado por ações antrópicas, visto que, ao interferir no meio natural, o homem causa um desequilíbrio dinâmico da bacia, interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TEODORO, TEIXEIRA, *et al.*, 2007).

Dentre essas interferências antrópicas, pode-se citar impactos ambientais, como ocupação indevida do solo, uso indiscriminado da água, desmatamento de matas ciliares, sedimentação, assoreamento, construção de barragens, desvios de cursos d'água, erosão, salinização, contaminação, impermeabilização, compactação, diminuição da matéria orgânica contida nos solos dentre outras degradações (ORTEGA, 2011).

Diante do nível de expansão econômica atual, não se pode coibir a expansão da ocupação dos espaços, reorganização dos já ocupados e fatalmente a ampliação do uso dos recursos naturais. Nesse contexto, se é imperativo ao homem como ser social expandir-se, tanto demograficamente como técnica e economicamente, torna-se evidente que apareçam, nesse processo, os efeitos contrários. Restando inequívoco que qualquer interferência na natureza, pelo homem, necessita de estudos que levem ao diagnóstico, ou seja, a um conhecimento do quadro onde se vai atuar. (ROSS, 2017)

Devido a característica integradora das bacias hidrográficas, é possível acompanhar as mudanças introduzidas pelo homem e as respectivas respostas da natureza, dessa forma as bacias hidrográficas são consideradas excelentes unidades de gestão dos elementos naturais e sociais. Nos países mais desenvolvidos, a bacia hidrográfica também tem sido utilizada como unidade de planejamento e gerenciamento, compatibilizando os diversos usos e interesses pela água e garantindo sua qualidade e quantidade. (GUERRA e CUNHA, 1996)

No Brasil, A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão e planejamento de recursos hídricos, devendo ser realizada no âmbito da área da bacia hidrográfica, justificando ainda a coerência territorial para a gestão, tornando-se mais eficiente o planejamento e a aplicação de

ações para o uso adequado da água numa determinada bacia.

O projeto e planejamento de recursos hídricos, necessita de informações que permitam a avaliação do comportamento hidrológico da bacia. Para isso, é necessário quantificar todas as características de forma, de processos e de suas inter-relações, pois, ao se estabelecerem relações e comparações entre tais características e os dados hidrológicos conhecidos, pode-se determinar indiretamente os valores hidrológicos em locais nos quais faltem dados (VILLELA & MATTOS, 1975). Tonello (2005) ressalta ainda que nenhum desses índices, isoladamente, deve ser entendido como capaz de simplificar a complexa dinâmica da bacia, a qual inclusive tem dimensão temporal.

A delimitação de bacias hidrográficas é o primeiro e mais comum procedimento executado em análises hidrológicas ou ambientais. Inicialmente essa delimitação era feita fundamentada em dados de relevo analógicos de forma manual, baseando-se em mapas e cartas, o que compromete a confiabilidade e a reprodução dos resultados devido à carga de subjetividade inerente aos métodos manuais. Com o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e de formas digitais consistentes de representação do relevo, que são os Modelos Digitais de Elevação (MDE's), métodos automáticos para este procedimento vêm sendo desenvolvidos desde então. O elemento básico para derivar mapas morfométricos é o modelo digital de elevação (MDE), podem ser provenientes de interpolação a partir de pontos ou contornos dispersos, seja em formato *raster* ou vetor; também é possível usar MDE's oriundos de sensoriamento remoto como da *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) da NASA, com 30m de resolução de terra, que a pouco tempo foram disponibilizados gratuitamente para praticamente todo o globo. (GARBRECHT & MARTZ, 1999 apud CARDOSO & DIAS, et al., 2006; GROHMANN, 2004 & NETELER, 2005)

Como exemplo da utilização de softwares SIG para delimitação e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, destacam-se os produtos ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) que são utilizados pela grande maioria dos profissionais de geoprocessamento, em especial o software Arc Gis, que conforme Medeiros et al. (2009), por meio da extensão "*Watershed Delineation Tools*" demonstrou para delimitação automática de bacias hidrográficas, bons resultados e boa simetria comparada aos limites das sub-bacias delimitadas manualmente, concluindo nesse trabalho que os métodos tradicionais apresentam limitações e restrições de uso. Porém essa ferramenta apresenta valor de aquisição elevado e envolve diversos procedimentos para obtenção dos resultados.

Nesse contexto, Catalunha (2004) argumenta que a obtenção de características físicas e de drenagem de bacias hidrográficas é uma das ações que tem limitado muito a gestão de uso da água em microbacias, pois trata-se de uma atividade técnica e que atualmente, apenas softwares de sistemas de informações geográficas proprietários, são mais difundidos no meio técnico para esta tarefa, como é o caso do ArcView©.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem permitir a obtenção de parâmetros morfométricos com um certo grau de velocidade e precisão, mas a metodologia aplicada variará de acordo com as ferramentas disponíveis e o grau de conhecimento de cada profissional ou pesquisador sobre o software envolvido (GROHMANN, 2004). Além do mais, a obtenção dos parâmetros morfométricos diretamente em ambientes SIG's, caracteriza-se por exigir hardware eficiente; pessoal especializado em sistemas de informações geográficas para operação e sistema operacional específico para instalação e configuração do software (CATALUNHA, 2004).

Análogo ao Arc Gis, diversos softwares livres ou uma combinação deles podem ser usados para delimitação automática de bacias hidrográficas. Porém os parâmetros morfométricos só podem ser obtidos através da utilização das demais ferramentas dos softwares separadamente. Tornando os processos trabalhosos requerendo grande conhecimento em geoprocessamento e informática, levando o profissional a muitas vezes negligenciar a obtenção de dados necessários.

Criar uma ferramenta computacional precisa e capaz de trazer resultados de maneira prática, auxilia os pesquisadores e técnicos na gestão de águas pluviais a enfrentarem os problemas causados pela chuva e seu escoamento. Por isso, o objetivo principal deste trabalho, foi desenvolver uma ferramenta computacional para delimitação automática e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, objetivando auxiliar em várias situações, como: previsão e interpretação da variação na quantidade e qualidade das águas naturais, projetos e construção de obras hídricas, drenagem e recuperação de áreas, regularização dos cursos d'água, controle de inundações e até mesmo contribuir para a definição de vazões mínimas de locais onde não existam dados para o processo de outorga de recursos hídricos. Pretende-se também auxiliar a gestão ambiental, uma vez que os dados gerados fornecem referenciais básicos e dão subsídio para um melhor direcionamento das ações de planejamento.

A ferramenta desenvolvida foi testada em quatro sub-bacias hidrográficas com características de relevo distintas, utilizando os Modelos Digitais de Elevação: SRTM1

(precisão ~1 arcseg), SRTM3 (precisão ~3 arcseg), TOPODATA e ASTERGEDEM. Para validação da ferramenta, os resultados foram quantificados, comparados e verificada sua equivalência com os resultados dos algoritmos utilizados pelo software GRASS GIS e sua extensão *r.basin.py*, que utiliza o mesmo algoritmo que o Arc GIS para eliminação de dados espúrios dos MDE's, também foram testados os algoritmos para simplificação dos perímetros das bacias por meio de métodos comumente utilizados no Arc GIS e GRASS GIS. A seguir serão apresentadas as principais vantagens apercebidas na avaliação da ferramenta elaborada.

1.1 Principais vantagens da ferramenta proposta

Como principais vantagens a serem inseridas pela ferramenta proposta na rotina de tarefas para delimitação de bacias hidrográficas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE's), extração da rede de drenagem, definição do canal principal e caracterização morfométrica, podem-se citar:

- A ferramenta é de fácil instalação, pois foi elaborado um Shell script executável via terminal Linux que verifica se já estão instaladas e instala automaticamente todos as aplicações necessárias para o funcionamento da ferramenta. Todo o processo de instalação é executado com um único clique. Diminuindo prováveis dificuldades e necessidade de amplos conhecimentos em informática para a instalação. Pensando nisso, também foi desenvolvida uma versão web da ferramenta;
- A ferramenta é alimentada por um único arquivo em formato GeoTIFF, que corresponde ao Modelo Digital de Elevação escolhido para o processamento.
- São necessários poucos dados de entrada, bastando digitar em campos específicos via interface gráfica simplificada, as coordenadas do exutório com a respectiva zona UTM e o código EPSG do Sistema de Referência de Coordenadas adotado. Também será necessário especificar o ângulo mínimo entre as células do MDE (*minslope*) para o procedimento de eliminação dos dados espúrios e gerar o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e também informar o grau de detalhamento requerido para a rede de drenagem (*threshold*).

- A interface gráfica é simplificada com caixas de diálogo subsequentes, diminuindo prováveis dificuldades em aprendizagem com a entrada de dados, evitando retrabalho.
- Todas as etapas para delimitação da bacia hidrográfica, extração da rede de drenagem, definição do canal principal e caracterização morfométrica da bacia é feita de forma automática. O usuário terá acesso a todos os produtos derivados do processamento em um único diretório e poderá ver os resultados organizados em um relatório em pdf, contendo: Quadro com 43 características morfométricas; mapa de elevação da bacia com a rede de drenagem e canal principal; mapas de relevo sombreado, aspecto e declividade; curva hipsométrica; gráficos do perfil longitudinal do canal principal, inclinação média, aparente e equivalente. Fornecendo ao usuário uma visão facilitada dos parâmetros físicos da bacia.
- Para delimitação automática de bacias a partir de MDE's é necessário que o ponto do exutório seja definido exatamente sobre a rede de drenagem matricial, o que muitas vezes causa transtornos na definição do exutório. Por isso na ferramenta proposta é definido um buffer de 500m em torno do exutório digitado pelo usuário, que o muda para o ponto mais próximo pertencente à rede de drenagem matricial diminuindo o número de possíveis tentativas na definição do exutório.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Elaborar uma ferramenta computacional para delimitação automática e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas que possa auxiliar na gestão ambiental e na gestão dos recursos hídricos.

2.2 Objetivos Específicos

- Validar a ferramenta computacional desenvolvida, delimitando 04 (quatro) bacias hidrográficas em situações topográficas distintas, utilizando a ferramenta computacional, a partir de diferentes Modelos Digitais de Terreno (SRTM1, SRTM3, TOPODATA e ASTER GEDEM);
- propor um método de validação hidrológica de Modelos Digitais de Elevação a partir de pontos de controle com dados altimétricos de GPS geodésico, extraídos dos vértices dos imóveis certificados no SIGEF;
- analisar a variação dos atributos morfométricos das bacias a partir dos diferentes MDE's através da ferramenta desenvolvida e do programa *r.basin.py* para o software GRASS GIS;
- realizar uma análise comparativa dos produtos gerados a partir dos diferentes MDE's, comparando a eficácia da ferramenta desenvolvida em relação ao programa *r.basin.py*.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A pesquisa bibliográfica apresentará aspectos relacionados à importância da obtenção de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas para a gestão ambiental. Foi feita uma abordagem sobre a conceituação e a utilização da área da bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento de recursos hídricos, passando pela evolução das técnicas de delimitação de bacias até os métodos atuais. Foi realizada pesquisa sobre os conceitos e aquisição de MDE's abordando pontos que convergem para a consistência hidrológica dos mesmos. Foi apresentada a metodologia de trabalhos que utilizaram de softwares de geoprocessamento, livres ou pagos, para delimitação automática e extração da rede de drenagem de bacias hidrográficas, definindo os métodos existentes de caracterização morfométrica, dando fundamentação teórica para elaboração da ferramenta computacional proposta.

3.1 A bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento

A concepção da utilização da bacia hidrográfica como unidade de gestão e planejamento de recursos hídricos, foi apresentado como um dos princípios básicos da Carta Europeia da Água de 6 de maio de 1968, proclamada pelo Conselho da Europa (GRANZIERA, 1993 apud SANTILLI, 2001). A Carta Europeia da Água (1968) foi um dos primeiros documentos que marcaram a preocupação da sociedade com a qualidade da água doce do planeta, trazendo consigo 12 princípios básicos até hoje adotados na legislação ambiental de diversos países.

Com os princípios de Dublin no início dos anos 90, que tratam sobre a água e o desenvolvimento sustentável, a gestão de recursos hídricos baseada na região delimitada pela área de bacias hidrográficas, ganhou força. Já no seu princípio número 1, a gestão da água é vinculada ao conceito de desenvolvimento sustentável, que relaciona a qualidade da água para com o desenvolvimento social e econômico, atribuindo a eficácia da gestão dos recursos hídricos, para quando esta é feita em toda a área da bacia hidrográfica. (PORTO & PORTO, 2008; GNADLINGER, 2017)

A bacia hidrográfica vem sendo adotada por diversos instrumentos como unidade de gestão. Esta óptica é aceita mundialmente, uma vez que a bacia hidrográfica é um sistema natural bem delimitado geograficamente, onde os fenômenos, interações e recursos naturais se integram. Além disso a bacia hidrográfica constitui uma unidade espacial de fácil reconhecimento e hierarquização, e utilizá-la como unidade de gestão e planejamento é a

maneira mais lógica do ponto de vista ambiental, apesar das burocracias geradas pela divisão em fronteiras administrativas. (CUSTODIO, 2002; CASTRO & CARVALHO, 2009)

No Brasil, este entendimento foi consolidado com a Lei N° 9.433 de 08 de janeiro de 1997 que institui a política nacional de recursos hídricos. O inciso V do artigo 1º, tem a bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e o inciso II do artigo 3º como unidade territorial de planejamento e gerenciamento. Como consequência, diversos Estados implementaram na sua Política Estadual de Recursos Hídricos a bacia hidrográfica como unidade de Gestão.

Conforme o estudo de Santilli (2001) antes mesmo da Lei 9.433/97, este princípio já estava consagrado em algumas Leis Estaduais. Como exemplo, a Lei 7.663/91, que estabelece a Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Ela já estabelecia que a bacia hidrográfica é a unidade físico-territorial de planejamento e gerenciamento das águas.

No Estado do Tocantins, através da Lei 1.307, de 22 de março de 2002, a bacia hidrográfica também é adotada como unidade físico-territorial para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

3.2 Bacia hidrográfica, definições

Apesar da Lei 9433/97 não estabelecer propriamente um conceito de bacia, diversos autores versão como definição que ela é uma área de drenagem que alimenta uma determinada rede hidrográfica (SANTILLI, 2001). Mesmo assim a Lei incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão, sendo de grande importância para gestores e pesquisadores, a compreensão do conceito de bacia hidrográfica e suas subdivisões (TEODORO et al. 2007).

Conceitualmente, a bacia hidrográfica tem sido utilizada como unidade de gestão da paisagem nas áreas relacionadas ao planejamento ambiental, especialmente na gestão dos recursos hídricos. Destaca-se que o conceito tem sido ampliado ao longo dos anos, sendo a bacia hidrográfica compreendida como um sistema biofísico complexo, que evidencia sistemas hidrológicos e ecológicos coesos. (MACHADO et al. 2011)

O estudo de Teodoro et al. (2007), traz consigo diversas definições de bacias

hidrográficas de vários autores que podem ser verificadas nos quadros 01, 02 e 03. Dessas definições percebe-se a tendência de alguns autores, onde a preocupação está voltada para os problemas causados pelas chuvas torrenciais, em concentrar a definição de bacias hidrográficas, relacionando-as ao escoamento superficial. Já que a precipitação é a fonte mais importante de entrada de matéria de uma bacia (ZAVOIANU, 1985). Nesse sentido destaca-se a definição de Borsato e Martoni (2004):

Definida como uma área limitada por um divisor de águas, que a separa das bacias adjacentes e que serve de captação natural da água de precipitação através de superfícies vertentes. Por meio de uma rede de drenagem, formada por cursos d'água, ela faz convergir os escoamentos para a seção de exutório, seu único ponto de saída.

Do mesmo modo, para Silva (1995), a bacia hidrográfica é o principal elemento a ser considerado na análise do ciclo hidrológico, principalmente durante o escoamento e a infiltração superficial. Ela pode ser entendida como uma área delimitada pelos divisores de água, que é por sua vez, uma peça limítrofe entre bacias adjacentes. A bacia hidrográfica é então uma área de captação de águas de precipitação através de superfícies vertentes, por meio de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que fazem convergir o escoamento a um exutório em comum.

No entanto, quando se pretende avaliar as características físicas das bacias, tendo em vista a variação dessas características com o passar do tempo, onde estão envolvidos diferentes fatores que vão além do escoamento superficial, deve-se considerar outros fatores contundentes na formação do relevo. Zavoianu (1985) esclarece que a área da bacia hidrográfica está sujeita a fluxos contínuos de troca de matéria e energia. A precipitação responde pela maior entrada de matéria, juntando-se a impactos devidos à ação humana, *inputs* subterrâneos provenientes de outras bacias e os devidos ao vento. Não podendo confundir dessa forma, que haverá apenas um “ponto de saída” na bacia hidrográfica, devendo-se então considerar não só as perdas pelo escoamento superficial, mas também as perdas da evaporação e da ação do homem por exemplo.

As bacias hidrográficas ainda podem ser subdivididas de acordo com a sua área de extensão, Faustino (1996, apud TEODORO, TEIXEIRA, et al. 2007) classifica as bacias com área entre 100 e 700 km² como “sub-bacias” e as bacias com área inferior a 100 km² como “microbacias”, desde que estejam diretamente ligadas ao canal principal da sub-bacia a qual

faz parte. Porém não existe um fator que determine um tamanho exato para classificar uma bacia como microbacia ou sub-bacia. Pois, os termos que designam e subdividem as bacias hidrográficas podem se tornar relativos, visto que uma bacia hidrográfica pode ser também uma sub-bacia de outra bacia de ordem hierarquicamente superior.

De uma maneira geral, Souza e Fernandes (2002) e Santana (2003, apud TEODORO, TEIXEIRA, et al. 2007) estabelecem que os conceitos de bacia e sub-bacias se relacionam a ordens hierárquicas dentro de uma determinada malha hídrica e que o termo microbacia, apesar de muito utilizado nacionalmente, constitui uma denominação empírica, imprópria e subjetiva.

Quadro 1 - Diferentes conceitos de bacias hidrográficas encontrados na literatura.

Referência	Conceito de bacia hidrográfica
LIMA, W.P.; ZAKIA M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000	São sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão e, desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico. Assim qualquer modificação na forma do sistema, ocorrerá uma mudança compensatória que tende minimizar o efeito da modificação e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico.
FERNANDES, M. R. Vegetação ciliar no contexto de bacias hidrográficas. In: Simpósio Mata Ciliar. Ciências e Tecnologia, Belo Horizonte, 1999.	O termo bacia hidrográfica refere-se a uma compartimentação geográfica natural delimitada por divisores de água. Este compartimento é drenado superficialmente por um curso d'água principal e seus afluentes
BORSATO, F.H; MARTONI, A.M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no município de Maringá, estado do Paraná. rev. Acta Scientiarum. Maringá - PR.v.26, n.2,p 273 – 285.2004.	Definida como uma área limitada por um divisor de águas, que a separa das bacias adjacentes e que serve de captação natural da água de precipitação através de superfícies vertentes. Por meio de uma rede de drenagem, formada por cursos d'água, ela faz convergir os escoamentos para a seção de exutório, seu único ponto de saída.
BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.	Conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático. As águas superficiais escoam para as partes mais baixas do terreno, formando riachos e rios, sendo que as cabeceiras são formadas por riachos que brotam em terrenos íngremes das serras e montanhas e à medida que as águas dos riachos descem, juntam-se a outros riachos, aumentando o volume e formando os primeiros rios, esses pequenos rios continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, formando rios maiores até desembocar no oceano.

Fonte: Adaptado de (TEODORO, TEIXEIRA, et al., 2007)

Quadro 2 - Diferentes conceitos de sub-bacias hidrográficas encontrados na literatura.

Autores	Definição de sub-bacias
FAUSTINO, J. Planificación y gestión de manejo de cuencas. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.	Sub-bacias são bacias com áreas maiores que 100 km ² e menores que 700 km ² .
SANTANA, D.P. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).	As bacias podem ser desmembradas em um número qualquer de sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor. Cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. Portanto, os termos bacia e sub-bacias hidrográficas são relativos.
ATTANASIO, C.M. Planos de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade. 2004. Tese.	Unidade física caracterizada como área de terra drenada por um determinado curso d'água e limitada, periféricamente, pelo chamado divisor de águas.
ROCHA, J. S. M. da. Manual de projetos ambientais. Brasília: MMA, 1997. 446 p.	Sub-bacias são áreas entre 20.000 ha e 30.000 ha (200 km ² e 300 km ²).

Fonte: Adaptado de (TEODORO, TEIXEIRA, *et al.*, 2007)

Quadro 3 - Diferentes conceitos de microbacias hidrográficas encontrados na literatura

Referência	Definição de microbacias
FAUSTINO, J. Planificación y gestión de manejo de cuencas. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.	A microbacia possui toda sua área com drenagem direta ao curso principal de uma sub-bacia, várias microbacias formam uma sub-bacia, sendo a área de uma microbacia inferior a 100 km ²
BRASIL Programa Nacional de microbacias hidrográficas – manual operativo. Brasília, Ministério da Agricultura, Comissão Nacional de Coordenação do Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas. 1986, 60p.	As microbacias são áreas fisiográficas drenadas por um curso d'água ou para um sistema de cursos d'água conectados e que convergem, direta ou indiretamente, para um leito ou para um espelho d'água, constituindo uma unidade ideal para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais do meio ambiente por ele definido.
MOLDAN, B. CERNY, J Small Catchments Reserch. In MOLDAN, B. CERNY. Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research. Chicester: John Wiley, 1994. P. 1-29.	As microbacias são as menores unidades de paisagem capaz de integrar todos os componentes relacionados com a disponibilidade e qualidade de água como: atmosfera, vegetação natural, plantas cultivadas, solo, rochas subjacentes, corpos d'água e paisagem circundante.
MOSCA, A.A.O. Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental de manejo de florestas plantadas. 2003.96p.	Considera a microbacia como a menor unidade do ecossistema onde pode ser observada a delicada relação de interdependência entre os fatores bióticos e abióticos, sendo que perturbações podem comprometer a dinâmica de seu funcionamento, sendo assim, esse conceito visa à identificação e o monitoramento de forma orientada dos impactos ambientais.

Referência	Definição de microbacias
LEONARDO, H.C.L. Indicadores de qualidade de solo e água para avaliação do uso sustentável da microbacia hidrográfica do rio Passo CUE, região oeste do Estado do Paraná. 2003. 121p. Dissertação	A microbacia hidrográfica é um elemento de escala de análise ambiental muito singular, pois representa o elo entre a escala micro, correspondente àquele nível de análise, verificação, medição, monitoramento e intervenção <i>in' loco</i> e a macroescala de análise, que corresponde à paisagem, região, bacia hidrográfica, nação ou até mesmo uma escala global, de onde são emanadas as normas, a legislação e as políticas públicas. Dessa forma a mesoescala de análise da sustentabilidade é a própria escala espacial da microbacia hidrográfica.
ATTANASIO, C.M. Planos de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade. 2004. 193p. Tese	A microbacia é a unidade básica de planejamento para compatibilização da preservação dos recursos naturais e da produção agropecuária. As microbacias hidrográficas características ecológicas, geomorfológicas e sociais integradoras, possibilita a abordagem holística e participativa, envolvendo estudos interdisciplinares para o estabelecimento de formas de desenvolvimento sustentável inerentes ao local e região onde foram implementados.
SANTANA, D.P. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).	O termo microbacia, embora difundido em nível nacional, constitui uma denominação empírica, sugerindo o autor a sua substituição por sub-bacia hidrográfica.
CALIJURI, M.C.; BUBEL, A.P.M. Conceituação de Microbacias. In: LIMA, W de P.; ZAKIA, M.J.B. (Orgs.) As florestas plantadas e a água. Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: Ed. RiMA, 2006. 226p.	Microbacias são áreas formadas por canais de 1ª e 2ª ordem e, em alguns casos, de 3ª ordem, devendo ser definida como base na dinâmica dos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. As microbacias são áreas frágeis e frequentemente ameaçadas por perturbações, nas quais as escalas espacial, temporal e observacional são fundamentais.

Fonte: Adaptado de (TEODORO, TEIXEIRA, *et al.*, 2007)

3.2.1 Relação entre os conceitos de bacia hidrográfica e ecossistema

O conceito de bacia hidrográfica vai além de uma mera delimitação geográfica, envolve conhecimentos além dos aspectos hidrológicos, caracterizando-se como um ecossistema. Seu estudo pode determinar o tipo e a densidade de espécies da fauna e da flora que habitam aquela região. Neste mesmo sentido Schiavetti e Camargo (2002) destaca que vários autores ressaltam a importância do uso do conceito de bacia hidrográfica equivalente ao de Ecossistema.

Isso significa que a bacia hidrográfica apresenta relevante interação com outros recursos naturais, como: materiais de origem do solo, topografia, vegetação e clima. Dessa forma, qualquer curso d'água é sempre resultante de uma região delimitada topograficamente que é a

bacia hidrográfica (BRIGANTE & ESPÍNDOLA, 2003). Por isso, o ecossistema que compreende determinado curso d'água, é um resultado de fatores que abrangem todas as suas bacias de contribuição e certamente qualquer alteração que venha a ocorrer nesse ambiente devido a atividades antrópicas, influenciará em seu equilíbrio natural.

Conforme Santos et al. (2007), para avaliar o possível efeito de qualquer interferência numa bacia hidrográfica, antes de tudo deve-se conhecer as características do ecossistema em suas condições naturais de equilíbrio, a fim de estabelecer comparações entre as condições hidrológicas e de qualidade da água no ecossistema natural e os ecossistemas nos quais ocorrem ação direta do homem. Essas interferências podem comprometer a integridade do ecossistema, carecendo assim de um manejo sustentável que garanta o funcionamento e perpetuação dos processos hidrológicos, mantendo a capacidade natural de suporte produtivo, da manutenção da diversidade ecológica e também da qualidade da água para fins de abastecimento público.

Para análise de ecossistemas, pode-se citar algumas características que contribuirão para a quantificação do processo hidrológico das bacias e deverão ser relacionadas àquelas concernentes à quantidade, qualidade e dinâmica da água, como o clima, solo, vegetação, deflúvio, evapotranspiração e geomorfologia (ANIDO, 2002).

3.3 Evolução das técnicas de delimitação de bacias hidrográficas

Inicialmente, para a análise morfométrica de bacias hidrográficas, os parâmetros necessários eram extraídos de fontes analógicas (cartas topográficas e cálculo manual). Com o advento da computação, a obtenção dos parâmetros necessários foi otimizada a partir do uso dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), rede hidrográfica digitalizada, ortofotos e imagens de sensores orbitais (SALLES, 2010).

Segundo Gribbin (2014), o delineamento da bacia era executado manualmente em uma planta topográfica impressa. O primeiro passo para delinear a bacia pretendida, é determinar o ponto no curso d'água onde a bacia começa. Esse ponto é o ponto de saída do escoamento, também denominado de exutório da bacia e pode estar localizado em qualquer lugar do curso d'água. Seguindo esta metodologia, os princípios mais importantes para se delinear uma bacia de drenagem são:

- Desenhar o divisor perpendicular às linhas de contorno (quando as linhas de contorno representam uma curva de nível e a respectiva cota topográfica);

- o divisor deve ser desenhado ao longo das cristas de elevações (colinas ou montanhas);
- o desenho do divisor nunca deve estar ao longo de ou através de uma baixada;
- em curvas de nível de uma mesma cota topográfica o desenho do divisor deve estar entre e paralelo a elas.

Essa mesma metodologia também pode ser aplicada em plantas topográficas direto em softwares CAD (*Computer-aided design*), que por sua vez só foram popularizados nos anos 2000, mesmo assim ainda se torna uma tarefa praticamente manual. (SOUZA, COELHO, 2003)

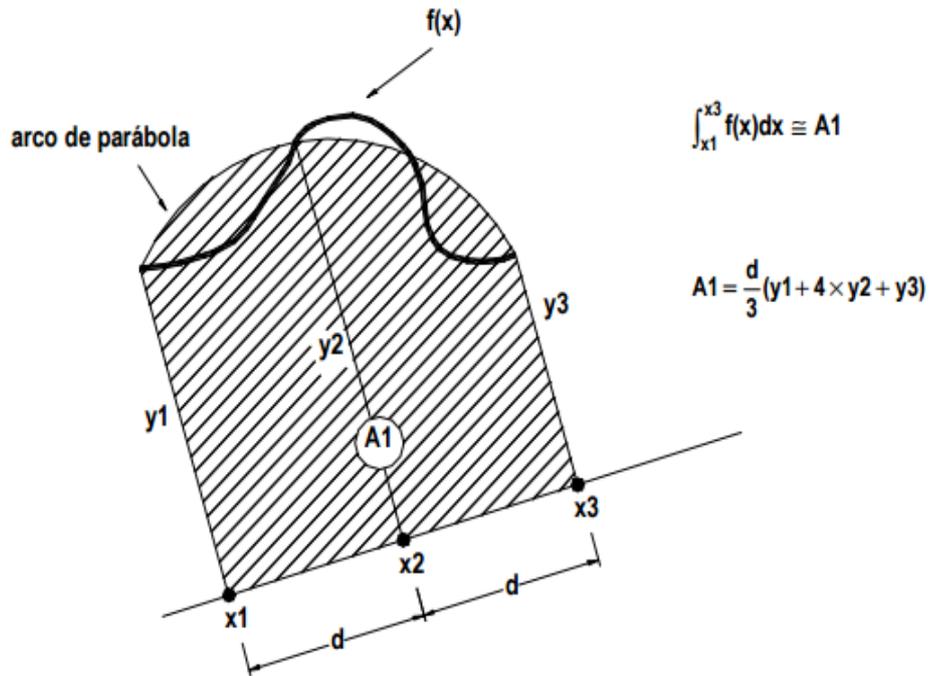
Dessa forma o conjunto de características que poderiam ser extraídas tornavam-se limitadas. As plantas topográficas são projeções horizontais, então as distâncias e áreas medidas sobre elas são distâncias em projeção horizontal, afetadas pelo valor da escala no mapa. Distâncias em linha curva eram medidas por aproximação poligonal ou pelo método mais cômodo, que é pela utilização de um Curvímetro. Não muito diferente, para medição das áreas das bacias utilizava-se diversos métodos analíticos e geométricos, podendo destacar por sua precisão o Método de Simpson. (PESTANA, 2006)

Outro método muito usado para o cálculo das áreas de bacias hidrográficas, além dos métodos analíticos e geométricos era o método da pesagem. Nesse método a forma planimétrica da bacia era desenhada em papel vegetal ou cartolina e recortada com muito cuidado e posteriormente pesada em balança de precisão, comparando essa massa com a massa de outro recorte de uma figura geométrica conhecida. (SCARTAZZINI, SILVA e CONSUL, 2005)

3.3.1 Método de Simpson

No método de Simpson, o contorno da área a medir é aproximado por uma linha descontínua composta por arcos de parábola. Como a parábola é um elemento de segundo grau, serão necessários sempre três pontos para definir cada arco. Estes pontos são obtidos a partir da subdivisão do eixo das abcissas num número par de intervalos iguais de amplitude “d”. A figura abaixo exemplifica o método para um único par de parábola. (PESTANA, 2006)

Figura 1 – Aplicação do método de Simpson para cálculo de áreas de bacias hidrográficas, através de aproximação parabólica.



Fonte: Pestana (2006).

A equação (01) representa a fórmula geral para um número “n” de pares adjacentes:

$$A = \int_{x_1}^{x_{n+1}} f(x) dx = \frac{d}{3} [y_1 + y_{n+1} + 2(y_3 + y_5 + \dots + y_{n-1}) + 4(y_2 + y_4 + y_n)] \quad (1)$$

Não menos importante, o uso do planímetro para cálculo da área de bacias hidrográficas, apresentou-se como um importante método com aproximações mais precisas que os métodos geométricos.

Inventado em 1824 pelo matemático suíço Jacob Amsler, o planímetro é um dispositivo mecânico capaz de medir a área de regiões planas limitadas, baseado nos princípios matemáticos do Teorema de Green¹, que é usado para encontrar a área de uma região plana limitada por uma curva. (RABELO & MANSO, 2004)

Atualmente, a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas é feita com a integração de informações de relevo em ambiente de Sistema de Informações Geográficas

1 O Teorema de Green diz que: se $F(x, y) = (f(x, y), g(x, y))$ é um campo de vetores no plano, C uma curva fechada e R a região cercada por essa curva, sem que haja singularidades do campo em R; então a integral de linha em uma curva de um campo $F(x,y)$ é igual a integral dupla, na região cercada pela curva, da diferença das derivadas parciais das componentes do campo, $f(x,y)$ e $g(x,y)$, em relação a y e x respectivamente.

(SIG's) que pode ser feita de maneira manual ou automática. As informações de relevo são representadas por uma estrutura numérica de dados correspondentes a estrutura espacial de altitude e da superfície do terreno, denominada modelo digital de elevação (MDE). Esses modelos são obtidos, hoje, por interpolação automática de curvas de nível extraídas de uma carta ou através de imagens de sensores remotos. Este assunto será tratado aqui de maneira mais detalhada posteriormente. (OLIVEIRA et al. 2007)

3.4 Variáveis morfométricas

Na geografia quantitativa, o emprego de dados precisos sobre formas da terra é um pré-requisito para pesquisa fundamental nas leis que regem o desenvolvimento do relevo, para modelos matemáticos elaborados e para aplicações práticas como previsão de vazão e modelagem regional de características hidrológicas. Assim a medição de formas, ou seja, morfometria, é de importância crescente. É igualmente fundamental para todas as ciências que estudam as formas do mundo natural. Não podendo realizar estudos completos sem antes recorrer a dados morfométricos e naturalmente nenhum estudo geomorfológico ou hidrológico pode ignorar os quantitativos morfométricos. (ZAVOIANU, 1985)

A análise morfométrica objetiva estabelecer as relações entre os parâmetros mensuráveis de uma bacia hidrográfica e os seus condicionantes. As redes de drenagens fluviais e as características físicas e bióticas de uma bacia hidrográfica desempenham um papel central nos estudos hidrológicos, exercendo influência na infiltração, no deflúvio, na evapotranspiração e nos escoamentos e procuram compreender a ocorrência, distribuição, movimentação da água e de suas propriedades, assim como nos estudos geomorfológicos, pois se constituem em um dos processos morfogenéticos mais ativos na composição das paisagens terrestres. (MACHADO et al. 2011) (STIP et al. 2010)

A geomorfologia e o relevo propriamente ditos agem sobre a taxa de deflúvio, isto é, sobre o regime de produção de água, conseqüentemente sobre a taxa de sedimentação. O padrão de drenagem da bacia, ou seja, o caráter e extensão de seus canais vão exercer influência sobre a disponibilidade de sedimentos e a taxa de formação do deflúvio. A estrutura geológica também exerce influência e controle sobre as características físicas da bacia hidrográfica. (STIPP, CAMPOS e CAVIGLIONE, 2010)

Neste assunto, a topografia é o principal fator determinante para caracterização

morfométrica das bacias hidrográficas. Tais como, limites da bacia e sub-bacias, inclinação, comprimento, largura, forma de declive, orientação das vertentes, características dos planos e dos canais de drenagem. Esses atributos podem ser computados através de um MDE (modelo digital de elevação) (MOORE, et al, 1991 apud SOUZA, et al, 2013). Para isso faz-se da utilização dos SIG's os quais são considerados como uma das principais ferramentas de geoprocessamento, os SIG's permitem a obtenção qualitativa e quantitativa de dados computacionais geográficos possibilitando a gestão de recursos e aplicação de técnicas otimizadas baseadas em diagnósticos georreferenciados (CAVALLARI, et al, 2007).

As características morfométricas podem ser divididas em três categorias principais: a linear, a zonal e a hipsométrica. Os parâmetros lineares quantificam a rede de drenagem por meio de seus atributos e também da relação existente entre eles. Os parâmetros zonais, retornam índices quantitativos da correlação dos atributos das bacias hidrográficas e da rede de drenagem com formas e parâmetros ideais. Os hipsométricos correlacionam a variação altimétrica com a área e a rede de drenagem de uma mesma bacia (CARDOSO, et al. 2012). Há também características básicas da bacia de drenagem, como: área, perímetro, maior largura, comprimento e amplitude altimétrica da bacia; que podem ser entendidos como parâmetros primários, obtidos pela mensuração direta da bacia hidrográfica servindo de base para as relações dos parâmetros: linear, zonal e hipsométrico.

Na pesquisa de Machado et al. (2011), foi feito um levantamento das principais características morfométricas de bacias hidrográficas, foram utilizados 20 documentos com conteúdo técnico e científico avaliados dentre teses dissertações e artigos científicos, que versão sobre análise morfométrica. A avaliação a qual descreve os autores se deu segundo a observância de critérios específicos, tais como a clareza com relação aos objetivos apresentados, relevância conceitual ou metodológica e consistência nas discussões e resultados. Posteriormente foram sistematizadas as características encontradas por ocorrência nos documentos pesquisados, que aqui serão apresentados em ordem decrescente de ocorrências na tabela 1.

Tabela 1 - Ocorrência das variáveis morfométricas em 20 documentos analisados.

Ordem	Variáveis	Ocorrência em 20
1	Densidade de drenagem	18
2	Área da bacia	16
3	Comprimento total dos canais	13

Ordem	Variáveis	Ocorrência em 20
4	Perímetro da bacia	12
5	Amplitude altimétrica máxima da bacia	11
6	Declividade média da bacia	9
7	Relação de relevo da bacia	8
8	Comprimento do rio principal	7
9	Densidade hidrográfica	7
10	Índice de circularidade	7
11	Índice de sinuosidade	7
12	Maior comprimento da bacia	7
13	Largura média da bacia	7
14	Coefficiente de manutenção	6
15	Relação de bifurcação	6
16	Coefficiente de compacidade	6
17	Comprimento dos canais por ordem	6
18	Fator de forma	6
19	Número total dos canais de drenagem por ordem	5
20	Coefficiente de rugosidade	4
21	Extensão do percurso superficial	4
22	Gradiente de canais	4
23	Maior largura	4
24	Número total dos canais de drenagem	4
25	Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem	4
26	Comprimento médio dos canais de cada ordem	4
27	Declividade média do curso d'água principal	4
28	Comprimento da bacia	3
29	Forma da bacia	3
30	Padrões de drenagem	3
31	Textura topográfica	3
32	Índice de rugosidade	3
33	Comprimento médio dos segmentos	2
34	Frequência de rios	2
35	Hipsometria	2
36	Razão de textura	2
37	Relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação	2
38	Relação de relevo do rio principal	2
39	Relação de relevo relativo	2
40	Assimetria	1
41	Comprimento axial do curso d'água	1
42	Densidade de segmentos da bacia	1
43	Dissecação vertical	1
44	Dissecação horizontal	1
45	Frequência dos canais de primeira ordem	1

Ordem	Variáveis	Ocorrência em 20
46	Grau de controle	1
47	Grau de continuidade	1
48	Grau de interação	1
49	Ordem da bacia	1
50	Orientação das vertentes	1
51	Orientação	1
52	Ordem dos cursos d'água	1
53	Perfil topográfico	1
54	Relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia	1
55	Relação ponderada de bifurcação	1
56	Relação de relevo das sub-bacias	1

Fonte: adaptado de Machado et al. (2011)

Não é objetivo deste trabalho especificar o uso de cada característica elencada na tabela 1, já que cada característica morfométrica tem um uso específico a depender do objetivo e da área de pesquisa. Por exemplo, a densidade de drenagem pode ser usada tanto para fins hidrológicos para estimar a suscetibilidade a enchentes de uma bacia, como para entender a geomorfologia da região, podendo ser utilizada para detecção do padrão de infiltração das rochas., Ou seja, nas rochas onde a infiltração encontra maior dificuldade há condições melhores para o escoamento superficial, gerando maiores possibilidades para a esculturação de canais considerando o mesmo clima (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A seguir, serão apresentados os conceitos das características morfométricas apresentadas na tabela 1. Estes conceitos foram extraídos de diversos documentos, sendo selecionados aqueles que apresentaram maior objetividade dentro da óptica deste trabalho, ou seja, foram selecionadas as características que não apresentam limitações para o cálculo computacional de forma automática.

3.4.1 Parâmetros básicos

Área da bacia (A): É a área plana em projeção horizontal da região entre os divisores topográficos da bacia hidrográfica, é o elemento básico para o cálculo de outras características físicas. (CARVALHO & SILVA, 2003)

Perímetro da bacia (P): “Comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas” (TONELLO, 2005).

Maior Largura (B): É a maior largura em linha reta medida transversal à direção do

canal principal entre as divisórias da bacia. (FELTRAN FILHO & LIMA, 2007)

Comprimento da bacia (L): Para Marcuzzo et al. (2012), existem várias maneiras para se definir este parâmetro, sendo citadas quatro maneiras em seu trabalho. Como será considerado neste trabalho também o parâmetro de maior comprimento da bacia, optou-se por considerar como comprimento da bacia, a distância em linha reta entre a foz e o ponto mais alto situado ao longo do perímetro. Essa escolha, foi devido a melhor objetividade para o cálculo computacional.

Amplitude altimétrica máxima da bacia (H_{max}): É a diferença altimétrica entre o ponto de desembocadura (P_1) e a altitude do ponto mais alto situado em qualquer lugar da divisória topográfica (P_2). (MARCUIZZO, 2012)

$$F_m = P_2 - P_1 \quad (2)$$

Maior comprimento da bacia (L_{max}): O maior comprimento da bacia é também conhecido como comprimento axial da mesma, que significa o comprimento medido do exutório da bacia até o seu ponto mais remoto. (PORTO, 1999)

3.4.2 Parâmetros lineares:

Comprimento do Rio principal (L_p): “Distância da foz até a nascente mais distante da mesma.” (STIPP, et al. 2010; TUCCI, 2004)

Comprimento total dos cursos d’água (L_t): É o comprimento de todos os cursos d’água da bacia hidrográfica, sejam eles efêmeros, intermitentes ou perenes, medidos em projeção horizontal.

Densidade de drenagem (D_d): Indica o grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem. É a relação entre o comprimento total dos cursos d’água (L) (sejam eles efêmeros, intermitentes ou perenes) e a área total (A) de uma bacia. (CARVALHO & SILVA, 2003)

$$D_d = \frac{\sum L}{A} \quad (3)$$

Christofolletti (1980) esclarece que a densidade de drenagem está diretamente ligada à propensão da bacia apresentar uma maior tendência a picos e cheias. “À medida que aumenta o valor numérico da densidade há diminuição quase proporcional do tamanho dos componentes fluviais das bacias de drenagem”, indicando que a água da chuva chegará mais rapidamente ao

ponto de saída da bacia.

Strahler (1945, apud LIMA, 2008 e SOUZA, 2015), classificou a densidade de drenagem em faixas, onde é possível estimar a tendência de a drenagem ser formada por canais perenes, concluindo que bacias com Dd menor que 5 km/km^2 tendem a perenidade. Considerando essa faixa, alguns autores vieram a classificar as bacias quanto a Dd . Na tabela 2 está presente a classificação proposta por Carvalho e Silva (2003) e na tabela 3 a classificação de Beltrame (1994, apud SANTOS et al 2012)

Tabela 2 - Classificação da drenagem da bacia a partir da densidade de drenagem proposta por Carvalho e Silva (2003).

Classificação da drenagem da bacia	Limites da Dd
Pobre	$< 0,5 \text{ km/km}^2$
Regular	$0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$
Boa	$1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$
Muito boa	$2,5 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$
Bem drenada	$Dd \geq 3,5 \text{ km/km}^2$

Fonte: Carvalho e Silva (2003).

Tabela 3 - Classificação da drenagem da bacia a partir da densidade de drenagem proposta por Beltrame (1994).

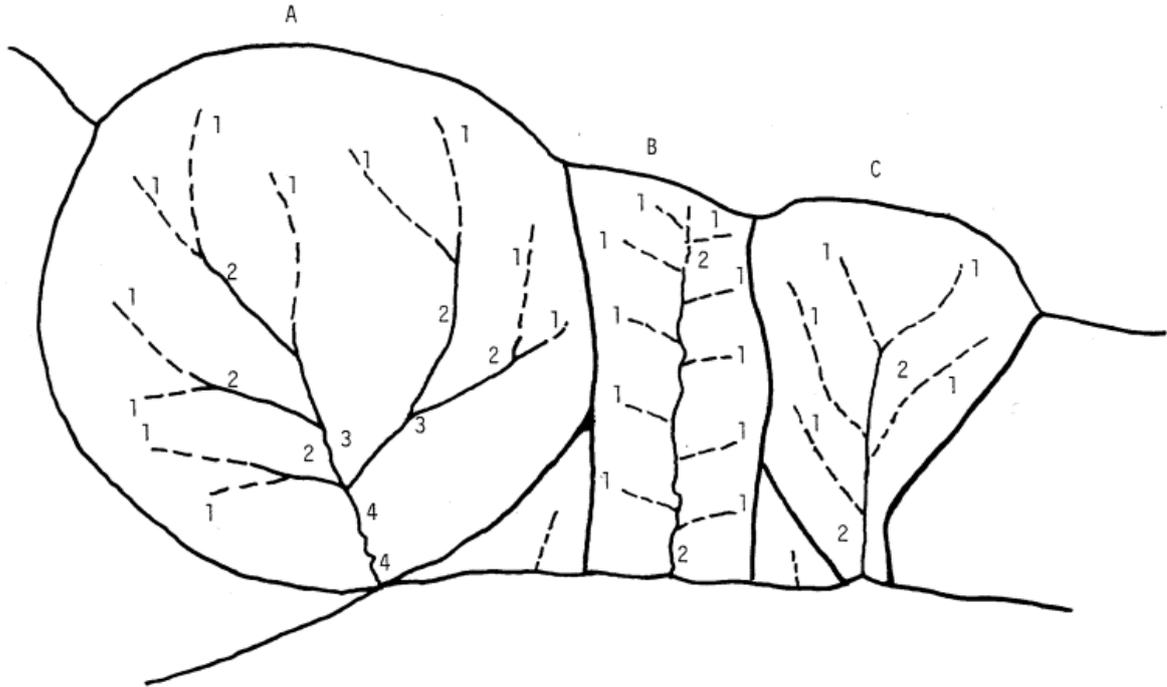
Classificação da drenagem da bacia	Limites da Dd
Baixa	$< 0,5 \text{ km/km}^2$
Mediana	$0,5 \leq Dd < 2,0 \text{ km/km}^2$
Alta	$2,0 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$
Muito alta	$Dd \geq 3,5 \text{ km/km}^2$

Fonte: Beltrame (1994, apud SANTOS et al. 2012)).

Ordem da bacia (u): Para um melhor entendimento deste índice, antes é preciso entender o processo de hierarquização dos canais de uma bacia hidrográfica. Os menores canais da bacia, sem afluentes, são considerados de primeira ordem; quando dois canais de primeira ordem se juntam, dão origem a um canal de segunda ordem podendo receber afluentes de primeira ordem; da confluência de dois canais de segunda ordem, surge um canal de terceira ordem podendo receber afluentes de primeira e/ou de segunda ordem; os canais de quarta ordem surgem da confluência de canais de terceira ordem com afluentes de qualquer ordem inferior e assim por diante, sendo a bacia classificada pela maior ordem de seus canais (STRAHLER, 1964 apud SANTOS et al. 2007). Na figura 04 há um exemplo apresentado por Ziemer (1973)

com a classificação de uma bacia de 4ª ordem (A) e duas bacias de 2ª ordem (B e C).

Figura 2 - Classificação de uma bacia de 4ª ordem (A) e duas bacias de 2ª ordem (B e C)



Fonte: Strahler (1964) apud Ziemer (1973)

Comprimento dos canais por trecho (Lu): Consiste em sistematizar o somatório dos comprimentos dos canais de cada ordem. Este procedimento permite uma análise referente ao potencial hídrico da bacia, como por exemplo, quanto maior o comprimento de canais de 1ª ordem, pode-se inferir um maior número de nascentes. (MACHADO, SOUZA, 2005)

Gradiente de canais (Gcp): Conforme Hack (1973, apud LIMA, 2013) o cálculo do índice de gradiente de canais, deriva da declividade do perfil semilogarítmico do canal principal:

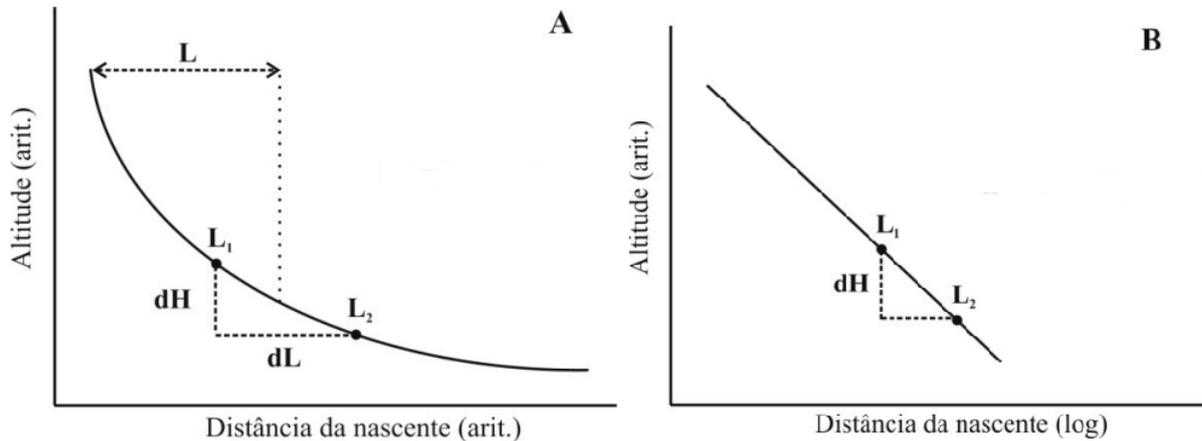
$$G_{cp} = \frac{dh}{\ln L_2 - \ln L_1} = \frac{(h_2 - h_1)}{\ln L_2 - \ln L_1} \quad (4)$$

Onde, Gcp é índice de gradiente, dh é a diferença altimétrica entre dois pontos do perfil e lnL2 e lnL1 são, respectivamente, os logaritmos da distância da nascente ao ponto final e inicial do trecho considerado. E h2 e h1 representam as altitudes do final e do início do canal respectivamente.

Conforme christofolletti (1980), sua finalidade é indicar a declividade dos cursos d'água,

podendo ser medido apenas para o canal principal ou para todo segmento de qualquer ordem.

Figura 3 – Perfis longitudinais esquemáticos, exemplificando o índice de gradiente de canais. Em A, perfil convencional em escala aritmética, e em B, perfil semi logarítmico.



Fonte: Adaptado de (LIMA, 2013).

Densidade hidrográfica (Dh): “É a relação existente entre o número de rios (Nr) ou cursos d’água e a área da bacia hidrográfica (A) expressa pela fórmula: ” (TEODORO, et al. 2007)

$$Dh = \frac{Nr}{A} \quad (5)$$

Número total dos canais de drenagem por ordem (Nu): Consiste na contagem da quantidade de canais de cada ordem. (MACHADO & SOUZA, 2005)

Extensão do percurso superficial (Eps): É a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente. Seu valor aproximado é obtido pela metade do inverso da densidade de drenagem (Dd) (MARCUSO, et al. 2012):

$$Eps = \frac{1}{2 * Dd} \quad (6)$$

Número total dos canais de drenagem (Nt): Consiste no somatório dos canais da ordem 1 até a enésima ordem da bacia. (MACHADO & SOUZA, 2005)

$$Nt = \sum_1^n Nu_i \quad (7)$$

Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (Rlm): É a relação

entre o comprimento médio dos canais de determinada ordem (L_{mu}) pelo comprimento médio dos canais de ordem imediatamente superior (L_{mu+1}). (STIPP, et al. 2010)

$$Rlm = \frac{Lm_u}{Lm_{u+1}} \quad (8)$$

Comprimento médio dos canais de cada ordem (Lm): O comprimento médio dos canais de cada ordem é obtido pela relação entre a soma dos comprimentos dos canais de cada ordem (L_u), pelo número de canais da respectiva ordem (N_u). (MARCUIZZO, et al. 2012)

$$Lm = \frac{L_u}{N_u} \quad (9)$$

Declividade média do curso d'água principal (S_i): Conforme Carvalho e Silva (2003), existem três maneiras de se definir a declividade média de um curso d'água:

Declividade baseada nos extremos (S_1): É uma declividade aparente que superestima a declividade do curso d'água pois consiste apenas na divisão da diferença de altitude do exutório até a nascente pelo comprimento total do curso d'água.

Declividade média (S_2): Traçando-se o perfil longitudinal de um curso d'água de forma aproximada a consecutivos segmentos de reta, a declividade média consiste no coeficiente angular de uma função de 1º grau, tal que sua integral em relação ao eixo das abscissas, se equivalha a área entre o perfil longitudinal e o eixo das abscissas.

Declividade equivalente (S_3): Da mesma aproximação para o perfil longitudinal da declividade média, a declividade equivalente leva em consideração uma declividade tal que seja equivalente ao perfil do curso d'água com uma declividade constante:

$$S_3 = \left(\frac{\sum L_i}{\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{D_i}} \right)} \right)^2 \quad (10)$$

Razão de textura topográfica (T): Segundo Smith (1950 apud MARCHETTI, 1980), a textura topográfica expressa o espaçamento entre canais, e é definido pela relação entre o número de canais (perenes ou temporários) e o comprimento do perímetro da bacia. Este espaçamento é classificado como grosseiro, se menor do que 4,0; médio, entre 4,0 e 10,0 e fino

se maior do que 10,0.

A fórmula para calculá-la é expressa por

$$T = \frac{N_t}{P} \quad (11)$$

Em que N_t é o número total de canais perenes ou temporários e P o perímetro da bacia.

Comprimento médio dos segmentos (L_{mt}): É a relação entre somatório do comprimento total dos canais por trecho, desde a ordem 1 até a enésima ordem, pelo número total dos canais de drenagem (N_t).

$$L_{mt} = \frac{\sum Lu_i}{N_t} \quad (12)$$

Frequência dos rios (Fr): A frequência dos rios é a relação entre o número total dos rios das diversas ordens (N_t) pela área da bacia (A). (MARCHETTI, 1980)

$$Fr = \frac{N_t}{A} \quad (13)$$

Relação de bifurcação (R_b): A relação de bifurcação é medida sempre que há transição de uma ordem inferior para uma ordem imediatamente superior, sendo representada pela relação entre o número de canais de uma determinada ordem (N_w) pelo número de canais de ordem imediatamente superior (N_{w+1}). Seguindo este princípio, a bacia (A) da figura 2 mostrada anteriormente, tem relação de bifurcação de 2; $R_b = 10,0$ para a bacia B e $R_b = 5,0$ para a bacia C: (ZIEMER, 1973)

$$R_b = \frac{N_w}{N_{w+1}} \quad (144)$$

Relação entre o comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação (R_{ib}): Conforme Christofolleti (1980), é a relação dos índices dos comprimentos médios dos canais (L_m) de cada ordem pelo índice de bifurcação (R_b). Esta relação é calculada para transição de cada ordem e ordenada em uma tabela para comparação. Esta relação é indicada para determinar a maneira como o comprimento dos canais aumenta em cada mudança de ordem dos canais.

No exemplo da tabela 4, observa-se que a “ R_{ib} ” entre os canais de 2ª e 3ª ordem é maior que a R_{ib} entre os canais de 1ª e 2ª ordem, o que indica que o comprimento médio dos canais

aumentou progressivamente com a elevação da ordem dos canais. As R_{ib} 's entre os canais de 3ª e 4ª e entre os de 2ª e 3ª, são praticamente iguais, o que indica que o comprimento médio dos canais crescerá ou diminuirá praticamente na mesma proporção.

Tabela 4 - Resultado da relação entre o comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação de uma bacia.

Ordem	$R_{ib} = \frac{Lm}{Rb}$
1ª e 2ª	0,347
2ª e 3ª	0,712
3ª e 4ª	0,720
4ª e 5ª	1,245

Fonte: adaptado de Barbosa e Furrier (2011).

Relação de relevo do rio principal (R_{rp}): É a relação entre a amplitude altimétrica da bacia (H_{max}) e o comprimento da bacia medido em linha reta ao longo do canal principal (L_b) até o divisor de águas. (NUNES, et al. 2006)

$$R_{rp} = \frac{H_{max}}{L_b} \quad (155)$$

Comprimento axial do curso d'água (L_a): Distância da foz até a nascente mais distante da mesma, ao longo do eixo do rio principal. (TONELLO, 2005)

Densidade de segmentos da bacia (F_s): “É a quantidade de segmentos existentes em determinada bacia hidrográfica (N_t) por unidade de área (A).” (BARROS & STEINK, 2009)

$$F_s = \frac{N_t}{A} \quad (166)$$

Frequência dos canais de primeira ordem (F_{r1}): É a relação do número total de canais de primeira ordem (Nu_1) pela área da bacia (A).

$$F_{r1} = \frac{Nu_1}{A} \quad (177)$$

Coefficiente de manutenção (C_m): Este índice indica a área mínima necessária para manter o escoamento em um metro de canal e pode ser obtido pela seguinte expressão: (SHUMM, 1956 apud MARCUZZO, 2012)

$$C_m = \frac{1}{D_d} * 1000 \quad (188)$$

Onde, D_d = Densidade de drenagem.

3.4.3 Parâmetros zonais

Largura média da bacia (\bar{L}): Carvalho e Silva (2003) apresenta uma fórmula para o cálculo da largura média da bacia sendo a relação entre a área da bacia (A) e o maior comprimento da mesma (L_{max}):

$$\bar{L} = \frac{A}{L_{max}} \quad (19)$$

Índice de circularidade (IC): Este índice indica o quão se aproxima da forma circular a forma da bacia hidrográfica. Aproximando-se da unidade à medida que se aproxima da forma circular. (TONELLO, 2005)

$$IC = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad (20)$$

Em que, A = Área da bacia em km^2 e

P = Perímetro da bacia em km.

Índice de Sinuosidade (IS): É a relação entre o comprimento real do curso d'água principal e o comprimento vetorial entre os extremos do canal. Indica o quão sinuoso é o curso d'água, o que implica diretamente na velocidade de escoamento. Ou seja, quanto maior for o índice de sinuosidade, menor será a velocidade de escoamento e obtido pela da seguinte fórmula: (SCHUMM 1963 apud BRUBACHER, et al. 2011)

$$IS = \frac{L_p}{d_v} \quad (21)$$

Onde, d_v = distância vetorial entre os pontos extremos do canal.

Relação de relevo da bacia (Rr): “Relaciona a amplitude altimétrica máxima (H_{max}) da bacia e sua extensão, ou seja, seu comprimento (L_h). A fórmula utilizada para esse cálculo é: ” (CASTRO & CARVALHO, 2009)

$$Rr = \frac{H_{max}}{L_h} \quad (22)$$

Coefficiente de compacidade (Kc): O coeficiente de compacidade relaciona o quão irregular é a forma da bacia hidrográfica, quando comparada com a forma circular. Ao contrário do índice de circularidade, esta característica indica formas irregulares com a proporção que o índice é maior que a unidade. É definido com a relação entre o perímetro da bacia (P) e a circunferência do círculo de área igual à da bacia. (PORTO, 1999)

$$K_c = \frac{0,28 * P}{\sqrt{A}} \quad (23)$$

Fator de forma (Kf): O fator de forma indica o quão estreita é a forma da bacia, é a relação entre a largura média da bacia (\bar{L}) e o maior comprimento da mesma (L). É utilizado para indicar a propensão que a bacia tem às enchentes, quanto maior o fator de forma, ela é mais susceptível a enchentes aumentando a possibilidade de uma chuva intensa abranger toda a bacia. (CARVALHO & SILVA, 2003)

$$K_f = \frac{\bar{L}}{L}; \bar{L} = \frac{A}{L}; K_f = \frac{A}{L^2} \quad (24)$$

Assimetria (Af): Conforme Cox (1994, apud SALAMUNI, et al. 2004), a assimetria de uma bacia é calculada pela relação entre a área da bacia situada à direita do rio principal (Ar), pela área total da bacia (A). Por convenção, a escolha da área a direita da bacia, foi escolhida para compor o método do cálculo do fator de assimetria. Conforme Gardner (1985 apud CAMOLEZI, FORTES e MANIERI, 2012), quando o valor da assimetria for próximo a 0,5; isso indica que não houve basculamento significativo e a bacia se encontra em condições estáveis. Valores menores que 0,5 indicam para um possível basculamento da margem esquerda da bacia, enquanto valores maiores do que 0,5 indicam um provável basculamento da margem direita da bacia.

$$A_f = \frac{A_r}{A} \quad (25)$$

Forma da bacia (Fb): Segundo Miller (1953 apud BARROS, STEINKE, 2009), “a forma da bacia é a relação existente entre a área da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro”. O que levou à seguinte dedução:

$$F_b = \frac{A}{A_c}; F_b = \frac{4\pi}{P^2}A \quad (26)$$

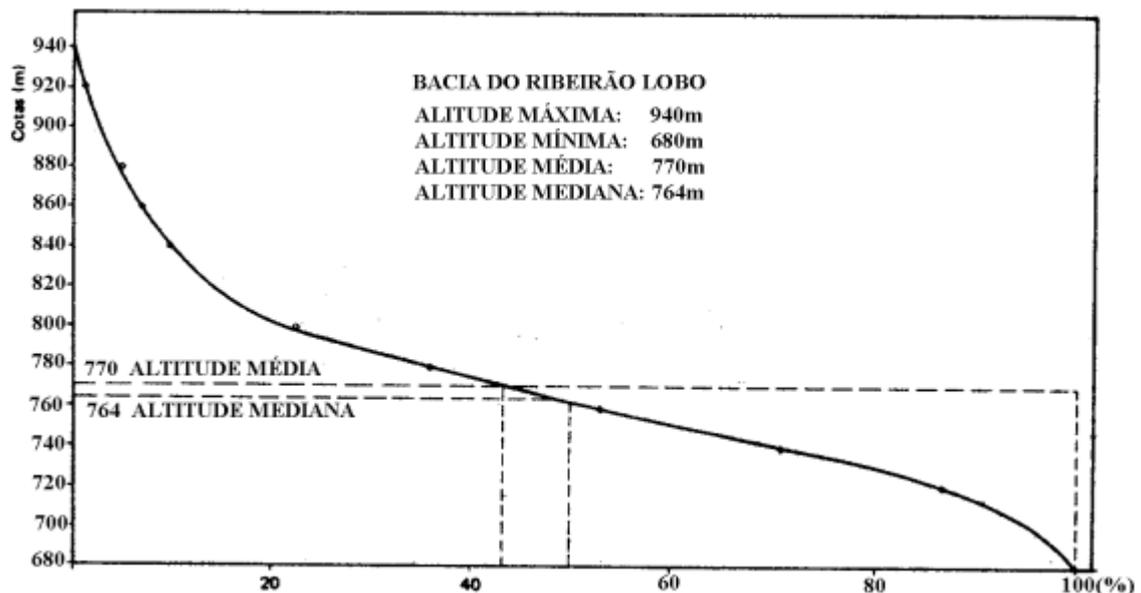
Onde, A_c é a área do círculo de mesmo perímetro que a bacia e P é o perímetro da bacia.

3.4.4 Parâmetros hipsométricos

Hipsometria: A hipsometria pode ser considerada uma zona de classificação morfométrica de bacias hidrográficas, onde é correlacionada a área da bacia, a variação altimétrica e sua rede de drenagem. É representada pela declividade, índice de rugosidade e pela curva hipsométrica. (CARDOSO, et al. 2012)

A curva hipsométrica é o gráfico das altitudes de cada curva de nível no interior da bacia em relação ao nível do mar, versus a área da respectiva curva de nível em percentagem acumulada. Esta curva é a representação gráfica do relevo médio de uma bacia. (CARVALHO & SILVA, 2003)

Figura 4 - Curva hipsométrica de uma bacia hidrográfica.



Fonte: Carvalho e Silva (2003)

Índice de rugosidade (Ir): “Combina as qualidades de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, expressando-se como número adimensional que resulta do produto entre a amplitude altimétrica (H) e a densidade de drenagem (Dd).” (MARCUIZZO, et al. 2012)

$$I_r = H * D_d \quad (27)$$

Coefficiente de rugosidade (Cr): Segundo Rocha e Kurtz (2001, apud VALLE JUNIOR, et al. 2011), este coeficiente indica a propensão à erosão das bacias à medida que o índice aumenta. Pode ser obtido pelo produto entre a densidade de drenagem (Dd) e a declividade média da bacia (Dm).

$$Cr = Dd * Dm \quad (28)$$

Declividade média da bacia (D_m): Conforme Carvalho e Silva (2003), a declividade média de bacias hidrográficas, consiste em determinar um valor médio de declividade entre curvas de nível que representam a topografia de uma bacia hidrográfica. A partir da declividade da bacia é possível ter perspectivas da velocidade do escoamento e obter parâmetros de erodibilidade e vazão, por exemplo. Existem muitos métodos para determinar este parâmetro, no entanto, o método mais completo denomina-se, método das quadrículas.

O método das quadrículas, consiste numa amostragem estatística de declividade, sobrepondo uma malha de quadrículas com dimensões pré-definidas no mapa da bacia hidrográfica com suas respectivas curvas de nível. Cada quadrícula que interceptar suas laterais com uma curva de nível, é traçado um vetor (N_v) com origem nesse ponto e direção perpendicular à curva de nível, com módulo definido pela distância até a próxima curva de nível. Dessa forma haverá comprimentos variáveis de vetores, o que proporcionará inclinações também variáveis considerando a distância vertical entre as curvas de nível (h). (CARVALHO & SILVA, 2003)

O método das quadrículas por sua vez é o mais apropriado quando pretende-se trabalhar com modelos digitais de elevação, visto que as quadrículas podem ser representadas pelos píxeis dos modelos utilizados. Claro, essa aproximação de píxeis é inviável para calcular a declividade média manualmente, sendo para esse caso, conforme Carvalho e Silva (2003) comum a utilização de quadrículas maiores de 1 em 1 km ou 2 em 2 km a depender da precisão desejada.

Quadro 4 - Exemplo de cálculo da declividade média usando o método das quadrículas.

BACIA: RIBEIRÃO LOBO - S.P.
MAPA: IBGE (ESCALA - 1: 50.000)
ÁREA DE DRENAGEM: 177,25 km²

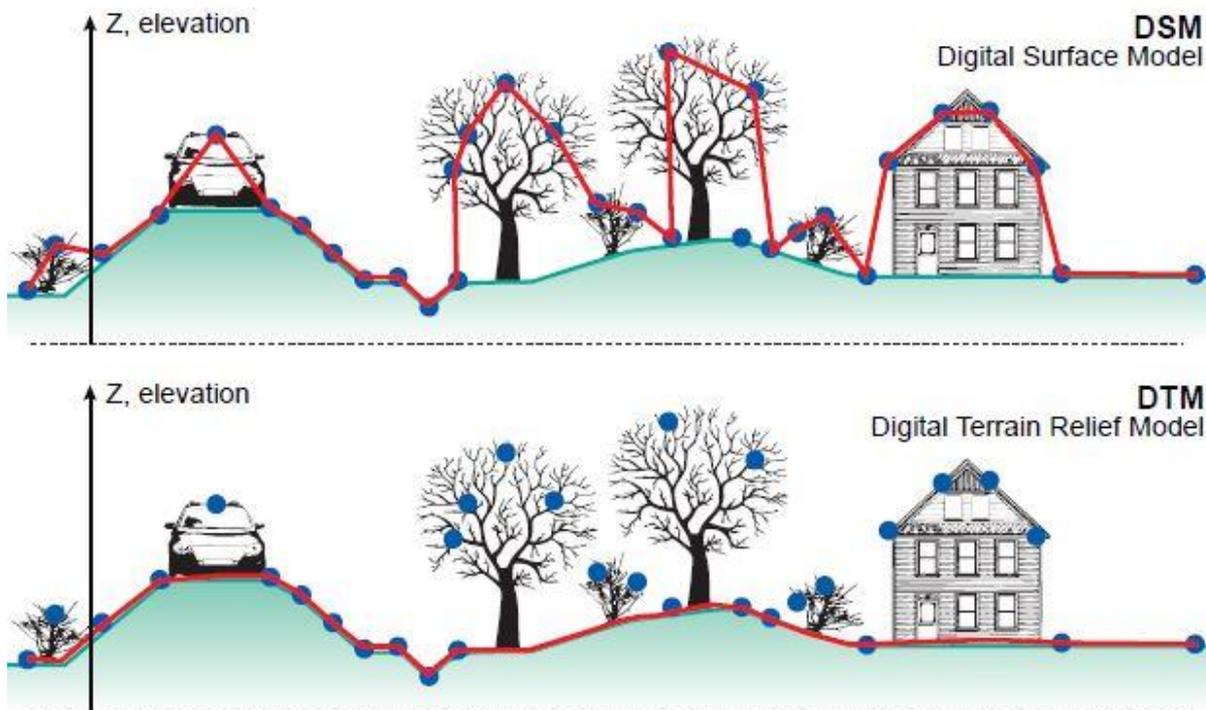
1	2	3	4	5	6
DECLIVIDADE (m/m)	Nº DE OCORRÊNCIAS	% do TOTAL	% ACUMULADA	DECL. MÉDIA	COL. 2 * COL. 5
0,0000 - 0,0049	249	69,55	100,00	0,00245	0,6100
0,0050 - 0,0099	69	19,27	30,45	0,00745	0,5141
0,0100 - 0,0149	13	3,63	11,18	0,01245	0,1618
0,0150 - 0,0199	7	1,96	7,55	0,01745	0,1222
0,0200 - 0,0249	0	0,00	5,59	0,02245	0,0000
0,0250 - 0,0299	15	4,19	5,59	0,02745	0,4118
0,0300 - 0,0349	0	0,00	1,40	0,03245	0,0000
0,0350 - 0,0399	0	0,00	1,40	0,03745	0,0000
0,0400 - 0,0449	0	0,00	1,40	0,04245	0,0000
0,0450 - 0,0499	5	1,40	1,40	0,04745	0,2373
TOTAL	358	100,00	-	-	2,0572
	$\text{DECLIVIDADE MÉDIA} = \frac{2,0572}{358} = 0,00575 \text{ m/m}$				

Fonte: Carvalho e Silva (2003).

3.5 Modelos digitais de elevação

Os modelos digitais de elevação (MDE's) são representações numéricas de uma variável morfométrica que define a superfície topográfica e são frequentemente representados na forma de matrizes numéricas contendo grande volume de informações. No caso dos MDE's essas informações estão relacionadas a altitude computada em determinado ponto geográfico de uma área delimitada pela resolução espacial do modelo, ou simplesmente píxel. Os valores das altitudes podem ser representados pelos primeiros retornos de sinal refletidos para o sensor após incididos na superfície, nesse caso são classificados como Modelos Digitais de Superfície (MDS's) e estão incluídos no levantamento, os valores das altitudes de edificações, vegetação e outras feições que cobrem a superfície terrestre. A outra classificação disponível para os MDE's, são os Modelos Digitais do Terreno (MDT's) que por sua vez representam a superfície do solo e por isto, teoricamente, não apresenta a interferência de feições construídas sobre o terreno (OLIVEIRA, 2015). Essa informação é melhor explicada na figura 5.

Figura 5 - Diferença entre as representações de altitude dos modelos digitais de superfície (DSM) e modelos digitais do terreno (DTM).



Fonte: Charim (2018).

Conforme Oliveira (2015), apesar da clareza das intenções dos levantamentos que originaram um ou outro MDE, haverá sempre incertezas sobre qual feição da superfície realmente interagiu com o sensor. Por isso, seguindo a mesma lógica de Oliveira (2015), neste trabalho o termo MDE será utilizado de maneira indiscriminada, ainda que seja sabido que existem variações, segundo a natureza dos levantamentos de cada MDE.

Modelos digitais de elevação, permitem a obtenção de dados importantes para o estudo da superfície terrestre, em especial, neste trabalho, para a obtenção de dados hidrológicos e morfométricos de bacias hidrográficas. Estes modelos podem ser obtidos por processos fotogramétricos, cartas topográficas e de sensores diversos. (MICELI, et al. 2011)

Dentre os principais MDE's globais derivados de técnicas de sensoriamento remoto, pode-se citar: o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) os produtos do TOPODATA disponibilizados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e ASTER GEDEM (*Global Digital Elevation Model*), que farão parte do foco deste trabalho.

O SRTM, foi desenvolvido em conjunto pela NIMA (*Imagery and Mapping Agency*) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e tinha como objetivo a elaboração

de um modelo topográfico digital de alta resolução para a Terra. A missão SRTM, como ficou conhecida, utilizou-se de um ônibus espacial para cobrir cerca de 80% da superfície terrestre entre as latitudes 60° N 56° S, com resolução de 1 arco de segundo ou aproximadamente 30 x 30 m. A técnica de sensoriamento remoto para aquisição dos dados foi a interferometria que consiste na comparação de duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície. Os dados SRTM, estão disponibilizados para download em <https://earthexplorer.usgs.gov>, na sua forma bruta. O sistema de referência espacial do SRTM é o WGS 84. (LEMOS, et al. 2004)

Os dados SRTM, apesar de terem resolução espacial aproximada de 30 metros, inicialmente foram disponibilizados para o continente Sul-americano com resolução de 3 arcos de segundo ou aproximadamente 90 metros. De acordo com Brochado (2016), Tadono et al. (2016) e Prates (2014) apenas em setembro de 2014 a Casa Branca anunciou a disponibilização pública dos dados SRTM com resolução espacial de 30m. Antes disso, O INPE, com o projeto TOPODATA (Banco de dados geomorfométricos do Brasil), procedeu um refinamento computacional dos dados SRTM com resolução espacial de 90 metros, a fim de disponibilizar um produto com resolução de 30 m (PERINI, 2013). O refinamento foi realizado a partir de interpolação de todo o universo de dados pelo método de *Krigagem*, processo embasado na análise geostática da variabilidade dos dados, onde se definem coeficientes que respondem melhor ao modelo de superfície real. Além dos dados de entrada, o processo demanda informações geostáticas que controlam a distribuição dos pesos para o cálculo dos valores interpolados (VALERIANO, 2008 apud LANDAU e GUIMARÃES, 2011).

O modelo digital de elevação ASTER GDEM foi viabilizado através de uma parceria entre a NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) (MELATI e MARCUZZO, 2015). A bordo do satélite Terra, permitiu a elaboração de modelos digitais de elevação a partir de pares estereoscópicos, sensor VNIR (dados na faixa de infravermelho próximo). Apresenta resolução espacial de 30 metros sem a necessidade de interpolação. Diferentes das imagens SRTM, as imagens ASTER são oriundas de imagens orbitais e não de radar, estando susceptíveis a interferências atmosféricas ocasionadas por nuvens (SOUZA et al. 2013).

A utilização de MDE's gerados a partir de sensoriamento remoto, para estudos hidrológicos de bacias hidrográficas, deve ser cautelosa, visto que eles podem conter erros

grosseiros que conforme o estudo de Chagas et al. (2010 apud MELATI e MARCUZZO, 2015) estão atribuídos a fatores como, ruídos nos processos de aquisição e transferência de dados, erros na geometria da órbita ou, presença de nuvens nas imagens quando obtidos por pares estereoscópicos. Por outro lado, a depender do relevo em estudo, a utilização de MDE's obtidos por sensoriamento remoto podem apresentar resultados bastante precisos para delimitação de bacias em locais de relevo acentuado, porém para regiões planas, a extração da rede de drenagem fica comprometida pela uniformização dos píxeis dos MDE's nestas regiões (MELATI e MARCUZZO, 2015).

3.6 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC)

Como mencionado no capítulo anterior, a delimitação de bacias hidrográficas era feita a partir de métodos tradicionais obtidos manualmente a partir de mapas e trabalhos de campo, apresentando resultados menos precisos. No entanto, atualmente estas informações hidrográficas podem ser obtidas através de Modelos Digitais de Elevação através de métodos automáticos ou semiautomáticos. (OLIVEIRA, et al. 2007)

A vantagem do uso de métodos automáticos, proporcionam nas tarefas de extração dos dados hidrológicos, maior rapidez, maior precisão e maior facilidade de reprodução em relação às técnicas manuais. (OLIVEIRA, et al. 2007)

Conforme Oliveira et al (2007), para delimitação automática a partir de modelos digitais de elevação (MDE) é necessário a construção de um MDE hidrologicamente corrigido ou consistente (MDEHC). Para a obtenção do MDEHC, é necessário a interpolação dos dados espúrios dos MDE's por meio de métodos automáticos de interpolação; caso ainda não sendo possível a interpolação automática por métodos computacionais, ainda é possível a interpolação manual destes locais utilizando algum software SIG.

Furze et al. (2017), demonstrou que é possível a obtenção de MDEHC's com maior precisão vertical a partir da fusão dos MDE's SRTM 30 m, SRTM 90 m, ASTER GDEM e CDED (MDE gerado a partir de curvas de nível e pontos de elevação, disponível para o território do Canadá). Nesse estudo foi gerado um MDE híbrido a partir da comparação com dados do MDE LiDaR (*Light Detection and Ranging*), utilizando estatística básica e análise de *boxplots* entre as diferenças de elevação. O erro médio quadrático dos MDE's em relação ao LiDaR antes da fusão era de 3,5 m para o SRTM90 e SRTM30; 6,9 m para o ASTER e 3,8 m

para o CDED, reduzindo para 2,6 m após a fusão.

Ribeiro (2015), destaca ainda a importância do ajuste da rede de drenagem matricial do MDEHC, para que haja compatibilidade com a rede de drenagem natural. Nesse estudo foi utilizado a ferramenta *Dem recondiotining* da extensão ArcHydro do software ArcGIS, para forçar o alinhamento da rede de drenagem matricial com a rede de drenagem de referência, a fim de permitir maior consistência hidrológica em simulações hidrodinâmicas.

Para Poletto et al (2008), um MDEHC não pode ser definido apenas pelo tratamento computacional para eliminação das depressões espúrias, células cercadas por outras de maiores valores, ele deve representar adequadamente o relevo da região em estudo a ponto de permitir a correta simulação de processos hidrológicos. Por isso, antes da utilização do MDEHC, este deve passar por processos de validação a fim de certificar sua relação com o relevo da região. Para isso, Poletto et al (2008) orienta a coleta de pontos de altitude amostrais em campo por meio de receptor GNSS e posteriormente realizar o teste de tendência por meio das discrepâncias amostrais. Para um nível de significância pré-estabelecido, admite-se a não existência de tendência caso as discrepâncias médias amostrais sejam estatisticamente iguais a zero.

A verificação da existência de tendências, é obtida pela fórmula:

$$t_h = \frac{\Delta h \sqrt{n}}{DP_h} \quad (29)$$

Em que:

DP_h é o desvio padrão das discrepâncias das diferenças entre as altitudes.

“n” é o número de pontos de controle para coleta das altitudes por GPS.

“ Δh ” é a média da soma das diferenças entre as altitudes:

$$\Delta h = \frac{\sum_i^n \Delta h_i}{n} \quad (30)$$

Em que, “ Δh_i ” é a diferença obtida entre as altitudes das imagens e dos pontos de controle.

Nesse caso, aplica-se o teste de hipótese, em que:

H_0 : se $\Delta h = 0$, então h não é tendencioso;

H_1 : se $\Delta h \neq 0$, então h é tendencioso;

Ainda conforme Poletto et al. (2008), “para este teste de tendência, supondo a distribuição t de Student e observando um nível de confiança $(1 - \alpha)$ igual a 90% ($\alpha = 0,10$), deve ser realizada uma comparação entre “ t_h ” com um valor limite “ t ” tabelado”. Dessa forma, pela tabela “ t ” bicaudal, da referida distribuição, para $t = t_{31, 0.05}$, tem-se um valor limite $t = 2,040$. Então, se $|t_h| < t$, a imagem estará livre de erros sistemáticos relacionado à altitude, podendo ser utilizada satisfatoriamente para fins de estudos hidrológicos.

Conforme o estudo de Martz e Garbrecht (1995) e Turcotte et al. (2001), além da criação do MDEHC, ainda é preciso considerar os seguintes aspectos: (a) eliminação das depressões artificiais, (b) introdução de informações sobre as localizações de redes de drenagem em lagos e regiões planas e (c) limitações inerentes dos métodos de obtenção da direção de fluxo. (apud OLIVEIRA, et al 2007)

As depressões artificiais são usualmente localizadas em regiões de inundações, ou onde os MDE's não conseguem representá-las. A fim de evitar estas depressões rodeadas de cotas superiores, em geral imperfeições, utiliza-se diversos algoritmos para esse fim. Um método muito divulgado foi desenvolvido por Jensen e Domingue (1988) que eleva as células contidas dentro das depressões e hoje, já está presente nos Softwares ArcGIS da ESRI e no Software livre GRASS. (OLIVEIRA, et al. 2007)

O software SAGA GIS utiliza para retirada dos dados espúrios dos MDE's, interpolações através de algoritmos, o proposto por Planchon e Darboux (2001) ou pelo algoritmo proposto por Wang e Liu (2006).

O algoritmo de Planchon e Darboux (2001), consiste em aumentar a elevação de pixels em depressões existentes nos MDE's que podem interromper o processamento do acúmulo de fluxo. Essas depressões constituem buracos que são preenchidos pelo algoritmo até um ângulo de inclinação pré-definido (“*minslope*”) por padrão este ângulo é estabelecido em 0,01 grau.

Já o algoritmo proposto por Wang e Liu (2006) além de identificar e preencher depressões superficiais nos MDE's, ele permite preencher inclinações descendentes ao longo

do percurso de escoamento. Podendo-se optar pela preservação de um gradiente de inclinação mínimo entre as células, garantindo o fluxo constante.

Dias et al. (2011), utilizaram mais dois métodos para a validação hidrológica de Modelos Digitais de Elevação, em especial o SRTM, ASTER e TOPODATA. Os métodos propostos por Dias et al. têm por finalidade avaliar a acuracidade vertical dos MDE's, baseando-se na aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), definido pelo Decreto 89.817 de 20 de julho de 1984 que incluem o cálculo do erro médio quadrático e da tolerância vertical.

Quanto ao Erro Médio Quadrático (EMQ), deve-se comparar as altitudes informadas nos MDE's com as altitudes obtidas nos pontos de controle. Sendo que para ser utilizado para fins hidrológicos, deve-se levar em consideração um EMQ máximo definido para cada escala. No caso da escala 1:100.000 classe A, os pontos devem ter no máximo 16,7 m de EMQ. Para a escala 1:50.000 classe C, os pontos devem ter no máximo 10m de EMQ. (DIAS et al. 2011)

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (h_i - h_t)^2}{n-1}} \quad (31)$$

Já a avaliação quanto à tolerância vertical, define quando 90% das altitudes dos MDE's estão condizentes com uma diferença limitada pelas classes do Padrão de Exatidão Cartográfica para uma determinada escala. Por exemplo, no caso da escala 1:50.000 classe C, é de 90% dos pontos obterem uma variação até de 15 m (três quartos da equidistância entre as curvas de nível) em relação aos pontos de controle. No caso da escala 1:100.000 classe A, a tolerância é de 90% dos pontos obterem uma variação de até 25m (metade da equidistância entre as curvas de nível) em relação aos pontos de controle.

Quadro 5 - Principais regras do Padrão de Exatidão Cartográfica para as escalas de 1:50.000 e 1:100.000.

Classe	Escala vertical			
	1:50.000		1:100.000	
	Tolerância	EMQ	Tolerância	EMQ
A	90% dos pontos < 10 m	6,6 m	90% dos pontos < 25 m	16,6m
B	90% dos pontos < 12 m	8 m	90% dos pontos < 30 m	20 m
C	90% dos pontos < 15 m	10 m	90% dos pontos < 36,6 m	25 m

Fonte: (DIAS, MICELI, *et al.*, 2011)

3.7 Delimitação, extração da rede de drenagem e caracterização morfométrica de bacias a partir de softwares SIG e MDE's

Em sua pesquisa, Goergen et al. (2012) concluíram que a delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando o software Arc GIS com base nos dados SRTM apresentou-se como uma metodologia perfeitamente aplicável. Em comparação com a metodologia tradicional usada na cartografia digital que é a delimitação de bacias através de curvas de nível de uma carta topográfica. As duas metodologias apresentaram diferença nas áreas das bacias de apenas 2,5% e para o perímetro de 6%. O que pode ser considerado aceitável levando em conta que ambos os métodos possuem erros sistemáticos. Além disso, a delimitação automática proporciona economia de tempo, através de sua praticidade.

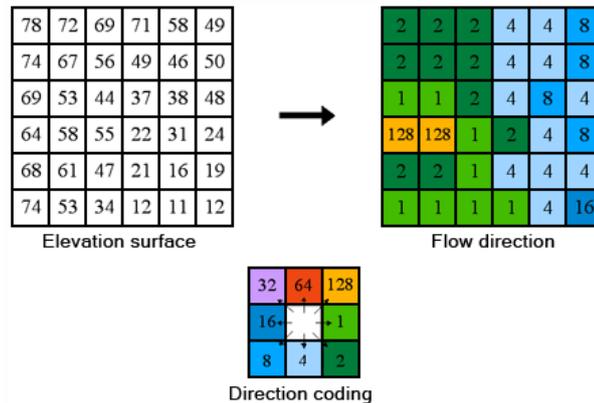
Por outro lado, Penha e Neves (2013) realizaram estudo sobre a eficácia da ferramenta “*Watershed deliniator*” do Arc GIS para delimitação automática de bacias, constatou-se que a ferramenta não apresentou resultados esperados tendo que fazer ajustes tanto na área da bacia quanto na rede de drenagem inferidas pela ferramenta.

Outro fator importante no estudo das diversas ferramentas para delimitação automática de sub-bacias hidrográficas é o tamanho da célula dos diferentes MDT's (Modelos Digitais do Terreno) disponíveis. Ribeiro (2015) evidenciou em sua pesquisa que o tamanho da célula é uma variável que merece atenção no que se refere às análises hidrológicas. Desde a correção dos MDT's até os resultados de saída, no caso da vazão máxima de projeto a diferença chegou a quase 100% entre o MDT Lidar (*Light Detection and Ranging*) de 3 m de resolução e o MDT TOPODATA com 30 m de resolução. Ribeiro (2015) salientou ainda que apesar de não serem aconselháveis para cálculos de vazão de projeto, os MDT's de baixa resolução podem ainda ser utilizados para o delineamento da rede de drenagem e limites da bacia hidrográfica.

Desta forma, a utilização de MDE's de baixa resolução, como o SRTM, TOPODATA e ASTER GEDEM, podem ser utilizados na delimitação e extração da rede de drenagem de bacias hidrográficas e uma vez obtidos estes dados e as informações altimétricas destes MDE's, é totalmente viável a extração da morfometria das bacias estudadas. Para isso é indispensável a utilização de softwares SIG, ou um conjunto deles. Atualmente a ferramenta mais comum para obtenção destes dados é o Arc GIS. Jacon (2014) utilizou a ferramenta *Topo to raster* para preenchimento dos dados espúrios além das ferramentas *fill sinks*, *flow direction* e *flow accumulation* para o preenchimento de vazios, definição da direção do escoamento de cada

célula atribuindo valores numéricos para cada direção (norte-sul, leste-oeste, noroeste-sudeste, sudoeste-nordeste e vice-versa totalizando oito direções) e definição da quantidade de células que tem para si o fluxo direcionado de outras células respectivamente.

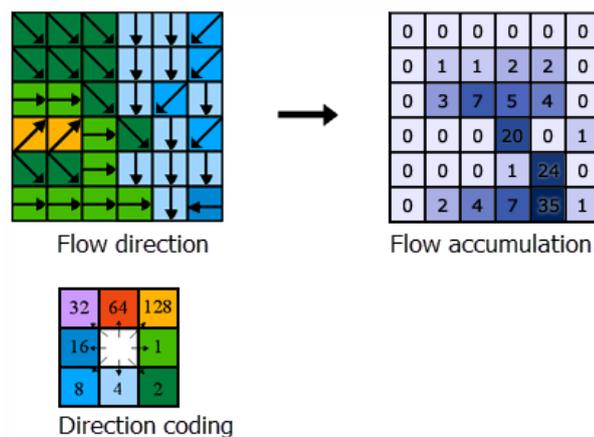
Figura 6 - Esquema de como funciona a ferramenta flow direction no Arc GIS, determina a direção de fluxo de cada célula no raster.



Fonte: Esri, 2017

A ferramenta *flow accumulation* no Arc GIS, quantificará quantas células rio acima, deságuam na célula em estudo, atribuindo-a um valor numérico correspondente a esta quantidade. De posse do raster do *flow accumulation*, resta evidente a localização mais propícia para a rede de drenagem, no local onde estão as células de valor mais elevado.

Figura 7 - Esquema de como funciona a ferramenta flow accumulation no Arc GIS, determina o fluxo acumulado de todas as células no raster.



Fonte: Esri, 2017

Di Franco et al. (2012) utilizou uma metodologia análoga à metodologia de Jacon (2014), porém ele utilizou para a obtenção do MDEHC, extração da rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica, um conjunto de softwares de livre acesso: QGIS, GRASS

GIS e SAGA GIS.

Faria et al (2015), utilizou o software Arc GIS associado ao software gratuito TauDEM, para delimitação automática e extração da rede de drenagem. Com a principal diferença, que para a eliminação dos dados espúrios, ao invés de utilizar a ferramenta *Topo To Raster* da ESRI, foi utilizada a ferramenta *Pit Remove* do programa Tau DEM que preenche tais depressões com um valor de altitude que elimine os empoçamentos de água no terreno, permitindo o seu fluxo contínuo.

Mioto et al. (2014), conseguiu resultados satisfatórios com a delimitação automática da bacia do ponto de captação de água do Município de Mundo Novo-MS, a partir do MDE SRTM-4 e do software livre *gvSIG*, utilizando os comandos: *voidfilling* para preenchimento das células sem dados, *sink filling* para eliminação das depressões, *flow accumulation* para gerar o raster de acúmulo de fluxo, *channel network* para gerar a rede de drenagem e *upslope area from a single point* para delimitação da rede de drenagem a partir de um ponto. Com os resultados obtidos pelo *gvSIG*, Mioto *et al.* utilizou ainda o programa QGIS para extração das características físicas da bacia.

Curtarelli (2009), utilizou uma associação entre o software ArcGIS mais especificamente o módulo ArcMAP 9.2, e planilhas eletrônicas Excel para a caracterização física da bacia do Rio Cubatão do Sul, concluindo que esta associação é uma boa ferramenta para a caracterização física de bacias hidrográficas devido a interfaces intuitivas e uma grande quantidade de ferramentas para análises espaciais. No entanto, as ferramentas usadas nesse estudo têm elevado valor de aquisição.

Carvalho e Carvalho (2012) utilizou MDE's SRTM e técnicas de geoprocessamento para extração dados fisiográficos do relevo (geomorfometria), para tanto utilizou uma associação de ferramentas distintas, dos softwares ENVI e SAGA GIS. Reforçando a viabilidade da utilização dos MDE's derivados de técnicas de sensoriamento remoto para extração de dados morfométricos do relevo. Carvalho e Carvalho (2012) ressaltam ainda a diversidade de softwares ou conjunto deles que podem ser usados para esse fim, podendo ser comerciais ou pagos, cuja finalidade é o processamento de imagens que vão fornecer dados úteis para análises ambientais. Os programas comerciais mais usuais são ArcView, Arc Gis, ERDAS, ENVI, Global Mapper, dentre outros. Os programas de código aberto mais usuais são SPRING, SAGA, GRASS, MicroDem, Whitebox, LandSerf, Tau DEM e GV SIG. Estes programas podem ser

obtidos nos endereços presentes no quadro 6:

Quadro 6 – Alguns softwares que podem ser usados para extração de dados fisiográficos do relevo.

Programa	Endereço
ESRI	esri.com
ERDAS	erdas.com
ENVI	sulsoft.com.br
Global Mapper	globalmapper.com
Spring	dpi.inpe. br/spring/portugues/download.php
SAGA	sagagis.org
GRASS	grass.osgeo.org
MicroDEM	usna.edu/Users/oceano/pguth/website/microdem.htm
Whitebox Geospatial Analysis	http://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/index.html
LandSERF	soi.city.ac.uk/~jwo/landserf/
Tau DEM	http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html
Gv SIG	http://www.gvsig.com/

Fonte: adaptado de Carvalho e Carvalho (2012)

Diversos softwares podem ser utilizados para delimitação automática, extração da rede de drenagem e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas. No entanto, como visto, estes procedimentos envolvem uma série de intervenções que caracterizam o procedimento como semiautomático, que vão desde o tratamento dos MDE's a fim de torná-los MDEHC's, até execução de cálculos manuais ou com o auxílio de planilhas eletrônicas para obtenção dos parâmetros morfométricos das bacias, visto que na maioria dos softwares apenas os parâmetros básicos podem ser extraídos diretamente, como a área, perímetro, comprimento, declividades e altitudes variadas.

De posse disto Oliveira et al. (2007) elaborou alguns algoritmos em linguagem "C" para o cálculo de alguns parâmetros morfométricos como: altitude mínima, máxima, média, amplitude, declividade média e desvio padrão. Segundo Oliveira et al. (2007), essa metodologia com o uso de métodos computacionais para auxílio dos cálculos e tratamento de dados morfométricos, lhe retornou resultados rápidos eficientes e padronizados.

Dentre os diversos softwares citados até aqui, destaca-se o software livre GRASS GIS, que pela sua natureza de trabalho permite a criação de scripts e instalação de extensões voltadas

para a análise de bacias hidrográficas, como extensão *r.basin.py*. Bruno (2017) ressalta que o GRASS é o software livre que mais se destaca levando-se em consideração o maior tempo de desenvolvimento.

O uso do módulo *r.basin.py* torna mais simples a realização de estudos sobre bacias hidrográficas, uma vez que possibilita uma execução automatizada entre os módulos GRASS existentes para processamento hidrogeomorfológico. Ele permite Extração de alguns parâmetros morfométricos da bacia e exportação em arquivo (csv). (BRUNO, 2017). A ferramenta *r.basin.py* retorna as seguintes características morfométricas:

Tabela 5 -: Características morfométrica geradas pelo módulo *r.basin.py* do software livre GRASSGIS.

Nº	Caraterística gerada
01	As coordenadas dos vértices do retângulo que contem a bacia
02	As coordenadas do centro de gravidade da bacia;
03	A área da bacia;
04	O perímetro
05	A inclinação média, calculada com a média do mapa de declividade
06	O comprimento do vetor que liga a saída ao centro de gravidade da bacia
07	Valores característicos de elevação: a altitude mais alta e a mais baixa, a diferença entre eles e a elevação média calculada como a soma dos valores das células dividida pelo número de células;
08	O comprimento do canal principal
09	A inclinação média do canal principal
10	A relação de circularidade
11	A relação de alongamento
12	O coeficiente de compacidade
13	O fator de forma
14	O tempo de concentração
15	A média das distâncias calculadas ao longo da direção do fluxo de cada ponto não pertencente à rede fluvial a partir do ponto em que flui para a rede
16	O número dos canais de 1ª ordem seguindo a hierarquia de Strahler
17	O número de canais
18	A ordem da bacia, seguindo a hierarquia de Strahler
19	A soma dos comprimentos dos canais
20	A razão entre o número de canais de 1ª ordem e a área da bacia
21	Densidade de drenagem
22	As razões de Horton
23	A função de distância x área
24	A curva hipsográfica

Nº	Caraterística gerada
25	A curva hipsométrica

Fonte: OSGEO (2017).

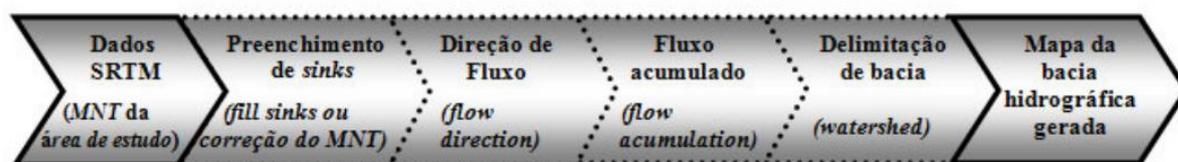
Apesar do *r.basin.py* fornecer 25 características, as demais características morfométricas elencadas na tabela 1, teriam que ser obtidas manualmente. Por isso há a vantagem de utilização do software Saga GIS operado a partir do software R por meio da biblioteca Rsaga. Isso significa que através de linhas de comando pode-se automatizar todo o processo de delimitação da bacia, extração da rede de drenagem e de todas as características de bacias hidrográficas sendo possível a automatização e extração das demais características morfométricas de uma bacia.

Hengl et al. (2010), discutem a análise automatizada de dados de elevação em R, onde são levantados os benefícios desta análise automatizada. Hengl et al. (2010) levantam ainda que num primeiro momento, a maioria dos usuários de SIG (em especial aos usuários de produtos ESRI) ainda não estão acostumados com esta metodologia de trabalho, por isso, foi apenso no seu trabalho um pequeno guia de como instalar e criar o ambiente Rsaga no (Anexo A). Desta forma resta evidente a necessidade de implementar uma ferramenta computacional para usuários sem grandes conhecimentos em softwares SIG e/ou não estão acostumados a utilizar softwares através de linhas de comando.

3.7.1 Procedimentos para delimitação de bacias a partir do software Arc GIS

O processo de delimitação de bacias hidrográficas por meio do software Arc GIS, utiliza da extensão *Arc Hydro Tools*, que consiste em um conjunto de ferramentas para dar suporte a aplicações em recursos hídricos. Esse processo (figura 8) subdivide-se em quatro etapas, sendo: preenchimento de depressões (“*fill sinks*”), direção de fluxo (“*flow direction*”), fluxo acumulado (“*flow accumulation*”) e delimitação de bacias (“*Watershed*”). (ALVES SOBRINHO, OLIVEIRA, *et al.*, 2010; ALCÂNTARA, 2014)

Figura 08: Principais etapas realizadas para delimitação de bacias hidrográficas a partir de dados SRTM.



Fonte: (ALVES SOBRINHO, OLIVEIRA, *et al.*, 2010)

Conforme Alcântara (2014), para a obtenção do resultado final (delimitação da bacia e extração da rede de drenagem), são necessários 31 passos sequenciais, que envolvem procedimentos de conversão do formato do MDE para o formato Grid, reprojeção do SRC do MDE, utilização de procedimentos de edição de arquivos rasters e vetoriais e de algoritmos específicos para realizar as etapas apresentadas na figura 08. A seguir pode-se verificar a sequência dos passos necessários:

- Transformar para o formato *Grid* (6 passos);
- Preenchimento de falhas – (3 passos; *Terrain Preprocessing > Dem manipulations > fill sinks*);
- Direção de fluxo – *Flow direction* (2 passos; *Terrain preprocessing > Flow Direction*);
- Acumulação de fluxo – (2 passos; *Terrain preprocessing > Flow Accumulation*);
- Definição da rede de drenagem – (3 passos; *Terrain preprocessing > Stream Definition, Stream Threshold*);
- Converter a rede de drenagem para vetor – (3 passos; *Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream to feature*);
- Definição do exutório da bacia – (3 passos; *Batch Point Generation > escolha do ponto > Provide the point related information*);
- Delimitação da bacia – (3 passos; *Watershed processing > Batch Subwatershed Delineation*);
- Recortar o MDE – (3 passos; *Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by mask*);
- Recortar a rede de drenagem – (3 passos; *Analysis Tools > Extract > Clip*)

Total = 31 passos.

3.8 Limitações dos Modelos Digitais de Elevação

Os MDE's derivados de técnicas de sensoriamento remoto, apesar de se mostrarem uma evolução nas técnicas de representação do relevo, permitindo concluir satisfatoriamente sobre o comportamento hidrológico de bacias e permitir uma rápida obtenção das características físicas das bacias; não estão isentos de erros e incertezas, relacionadas com sua resolução espacial, que suprime certas características do relevo inclusas nesse intervalo. Outra dificuldade

no uso desses modelos é sua incapacidade de representar a altitude do terreno em si, ofuscando-se por feições de vegetação e edificações e em alguns casos até nuvens.

Nos Estados Unidos foi feito um estudo sobre a precisão e acurácia do MDE ASTER, pela *United States Geological Survey-USGS* em parceria com a NASA. Foram utilizados 18.207 pontos geodésicos distribuídos ao longo do território dos Estados Unidos. Foi verificado que Erro Médio Quadrático não variou de forma relevante, porém o erro médio apresentou significativa alteração, conforme tabela 6. Cabe destacar que os MDE's ASTER também refletem as feições de vegetação e edificações. (SANTIAGO, 2013)

Tabela 6 –Erros verticais por classe de uso da terra para o MDE ASTER, segundo estudos da USGS EUA.

Tipo de cobertura	RMSE	Erro médio
Florestas	9,23m	3,10m
Áreas urbanas	8,58m	-0,13m
Solo exposto	8,94m	-0,95m
Total	8,68m	-0,20m

Fonte: (GESH et al. 2011 apud SANTIAGO, 2013)

Outro problema enfrentado é a forma de representação numérica dos MDE's, que é através de grades regulares. Esta forma de representação possui grandes desvantagens, pois em geral não consegue representar fielmente mudanças abruptas de elevação, outra desvantagem dessa representação é que os traçados dos caminhos de fluxo sobre a superfície do terreno tende a produzir linhas em “zigzag” já que as relações entre elementos vizinhos se dá em direções múltiplas de 45°, o que certamente não é uma representação realística. (RENNÓ e SOARES, 2001)

Valeriano e Albuquerque (2015), reforça ainda a insuficiência dos MDE's SRTM e TOPODTA para representações em escalas maiores que 1:100.000, embora alguns trabalhos utilizem seu uso em 1:50.000 ainda que em condições desfavoráveis. Em geral, fica a critério do pesquisador testar a exatidão cartográfica do MDE para a região em estudo, em função do tipo de aplicação e de suas exigências. Nesse contexto, Baena et al. (2003, apud CATALUNHA, 2004), orientam que a extração de parâmetros relacionados a rede de drenagem e ao relevo, possui relevante alteração nos resultados quando utilizadas para esse fim, levantamentos em diferentes escalas cartográficas, porém não há significativa diferença para a determinação da área de drenagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Machado et al. (2011), realizaram uma ampla revisão bibliográfica, identificando 56 parâmetros morfométricos que servem como elementos de suporte à definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental. Apenas o software GRASS GIS se destaca na caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, extraindo de forma automática 26 características através do módulo *r.basin.py* (OSGEO, 2017).

Através do software R e da biblioteca *Rsaga* é possível a delimitação e extração da rede de drenagem de bacias hidrográficas. E os cálculos da maior parte dos parâmetros morfométricos apresentados por Machado et al. (2011) podem ser obtidos através de linha de comando. Essa característica do software R possibilita a elaboração de *scripts* e com isso pode-se automatizar o processo de delimitação, extração da rede de drenagem e dos parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas.

O software R pode ainda ser acessado por meio da linguagem de programação Python com a instalação do pacote *rpy2*, o que possibilita a criação de um programa computacional a partir do *script* feito em R.

A ferramenta desenvolvida realiza de forma rápida a delimitação automática de bacias hidrográficas, bem como a listagem das características morfométricas da bacia. Como entrada de dados, é suficiente apenas um MDE, as coordenadas do exutório e do Sistema de Referência de Coordenadas utilizado. Os dados serão gerados pelo usuário sem necessidade de amplos conhecimentos de softwares SIG e geoprocessamento.

Para isso a pesquisa foi dividida em 04 etapas: 1^a) Elaboração da ferramenta computacional; 2^a) avaliação da ferramenta por meio da delimitação e caracterização morfométrica em quatro bacias em condições de relevo distintas, 3^a) realização de uma análise comparativa dos resultados obtidos pela ferramenta elaborada com os obtidos utilizando o programa *r.basin.py* e 4^a) comparação dos resultados quando oriundos de diferentes tipos de MDE's globais gratuitos: SRTM1, SRTM3, TOPODATA e ASTERGEDEM.

4.1 Ferramentas computacionais e softwares utilizados

Para elaboração do algoritmo foi utilizado a linguagem computacional R, por permitir fazer uma análise espacial e hidrológica baseada em Modelos Digitais de Elevação a partir da

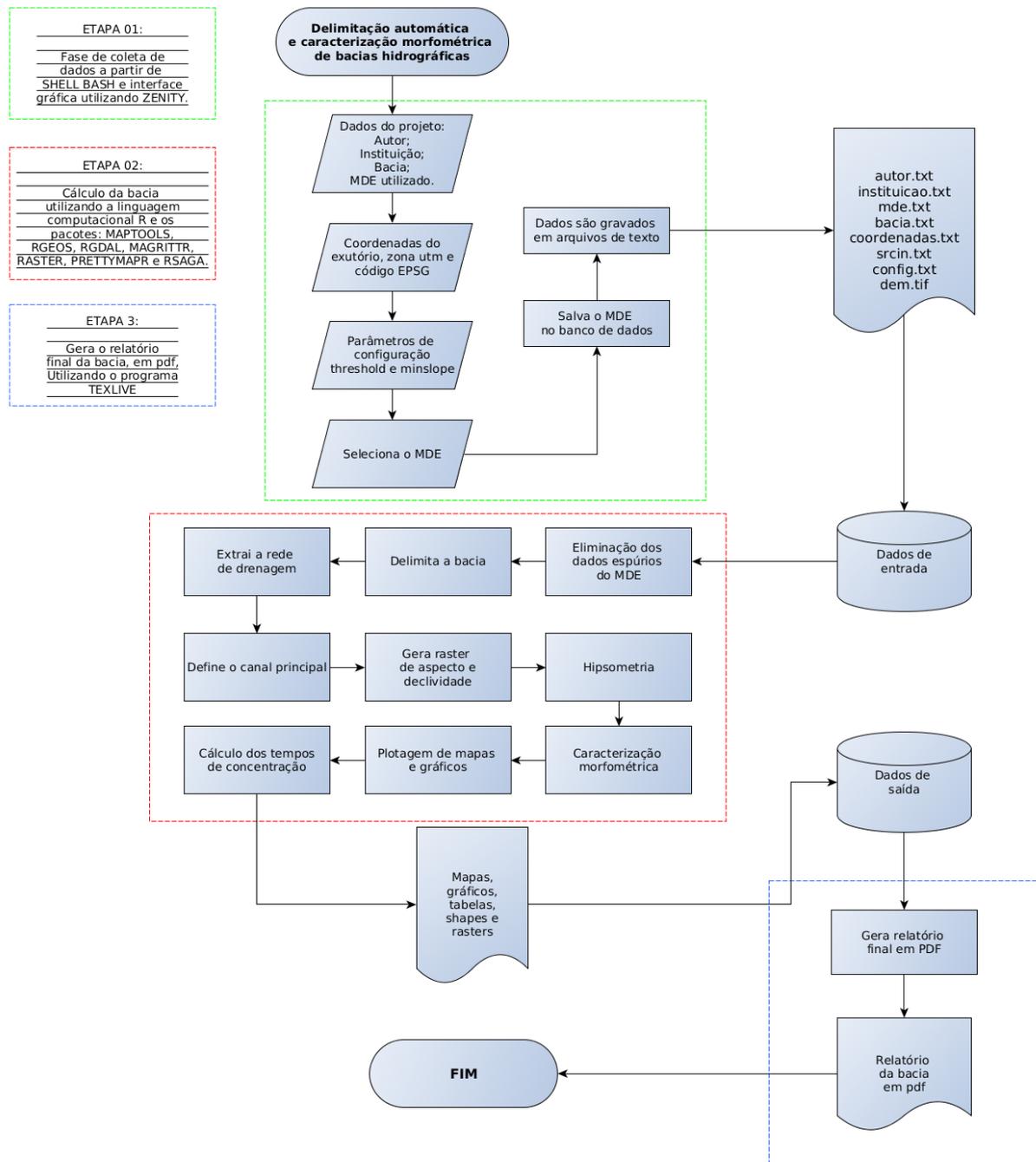
biblioteca *Rsaga*. E posteriormente possibilitar o desenvolvimento de uma versão WEB, utilizando a biblioteca *Shiny* e o servidor *Shiny WEB*. Outro ponto importante é que todas as ferramentas utilizadas neste trabalho, tratam-se de softwares livres.

O programa será elaborado no sistema operacional Linux Ubuntu 64 bits, pois conta com versão pré compilada do servidor *Shiny WEB*. Também pela possibilidade de utilizar uma combinação de softwares executados via linha de comando, que é o caso da linguagem computacional R, que será usado para cálculos baseados em mapas *rasters* e arquivos vetoriais obtidos por meio do software de computação geográfica SAGA GIS a partir da biblioteca *Rsaga*.

A versão para desktop utilizará a linguagem *Shell Bash (Bourne-Again Shell)*, diante da diversidade de comandos para manipulação de arquivos de texto e diretórios no sistema, uma vez que o script em R, será alimentado com arquivos de texto contendo dados inseridos pelo usuário através de interface gráfica elaborada com os programas de código aberto, *Zenity* e *Yad (Yet Another Dialog)*. Esses dados se referem às coordenadas do exutório, o SRC utilizado e parâmetros de configuração necessários para o processamento que serão abordados mais a frente. Por exemplo, incrementou-se no código uma mensagem de erro, caso o diretório que comporta os arquivos de saída do processamento em R não abrigar o número de arquivos esperado, para isso utilizou-se o comando “ls” no Shell.

Metodologias em que há uma combinação de linguagens para um único objetivo é chamada pelos programadores de análise “*polygot*”. Na figura 9 está presente o fluxograma de funcionamento da ferramenta elaborada. Nela é possível identificar todos os softwares necessários, bibliotecas, extensões e pacotes para execução da metodologia. Posteriormente serão detalhados cada um dos softwares utilizados.

Figura 9 - Fluxograma de funcionamento da ferramenta computacional.



Fonte: o Autor.

4.1.1 SAGA GIS

SAGA é a abreviatura de *System for Automated Geoscientific Analyses* é um software de Sistema de Informações Geográfica (SIG). A maioria dos desenvolvimentos de SAGA, vem da equipe de J. Bohner e O. Conrad. O desenvolvimento de SAGA como SIG de código aberto, iniciou-se no final dos anos 90 a partir de vários projetos de pesquisa na Universidade de

Gottingen. (SAGA-GIS, 2017)

A partir de SAGA é possível pré-processar MDE's para retirada de dados espúrios, sendo feitas interpolações através de algoritmos propostos por Planchon e Darboux (2001) ou pelo algoritmo proposto por Wang e Liu (2006).

Para o mapeamento da direção de fluxo é utilizada a metodologia estabelecida por Furnans (2001) ou método D8, onde explicita a direção do fluxo escoado de cada célula da estrutura de um MDE. Baseado no conceito em que há no máximo 8 células vizinhas para cada célula dentro do MDE, gera-se um dado em estrutura matricial definindo um valor de direção, para cada célula, que indica a célula vizinha de maior declividade. Isso é executado por SAGA através da função “*ta_channels*” extraíndo a rede de drenagem do MDE. Já para delimitação da bacia utiliza-se a ferramenta “*ta_hydrology*”.

4.1.2 R e a biblioteca Rsaga

R é um ambiente baseado em linhas de comando utilizado para computação estatística. Muitos pacotes para análise espacial de MDE's vêm sendo desenvolvidos para R (HENGL et al. 2010). Para fins deste trabalho, será utilizado o pacote Rsaga.

Rsaga fornece acesso direto às funções do SAGA GIS a partir do software R. Incluindo por exemplo, algoritmos de análise de terreno para cálculo de propriedades morfométricas locais (declive, aspecto e curvatura), características hidrográficas (tamanho, altura e aspectos de bacias hidrográficas e outras). Além disso Rsaga fornece funções para importar e exportar diferentes formatos de arquivos rasters e vetoriais além das ferramentas de pré-processamento de MDE's já faladas. (BRENNING e BANGS, 2016)

Conforme Brenning e Bangs (2016), para utilização do Rsaga, é requerida a instalação prévia de SAGA GIS (2.04 -2.2.3) e R (≥ 2.10). Os arquivos de instalação do SAGA GIS, devem estar localizados no ambiente de trabalho do Rsaga “env”. Mais informações sobre Rsaga, podem ser obtidas em Brenning (2008).

Ainda é preciso a instalação prévia dos seguintes pacotes em R:

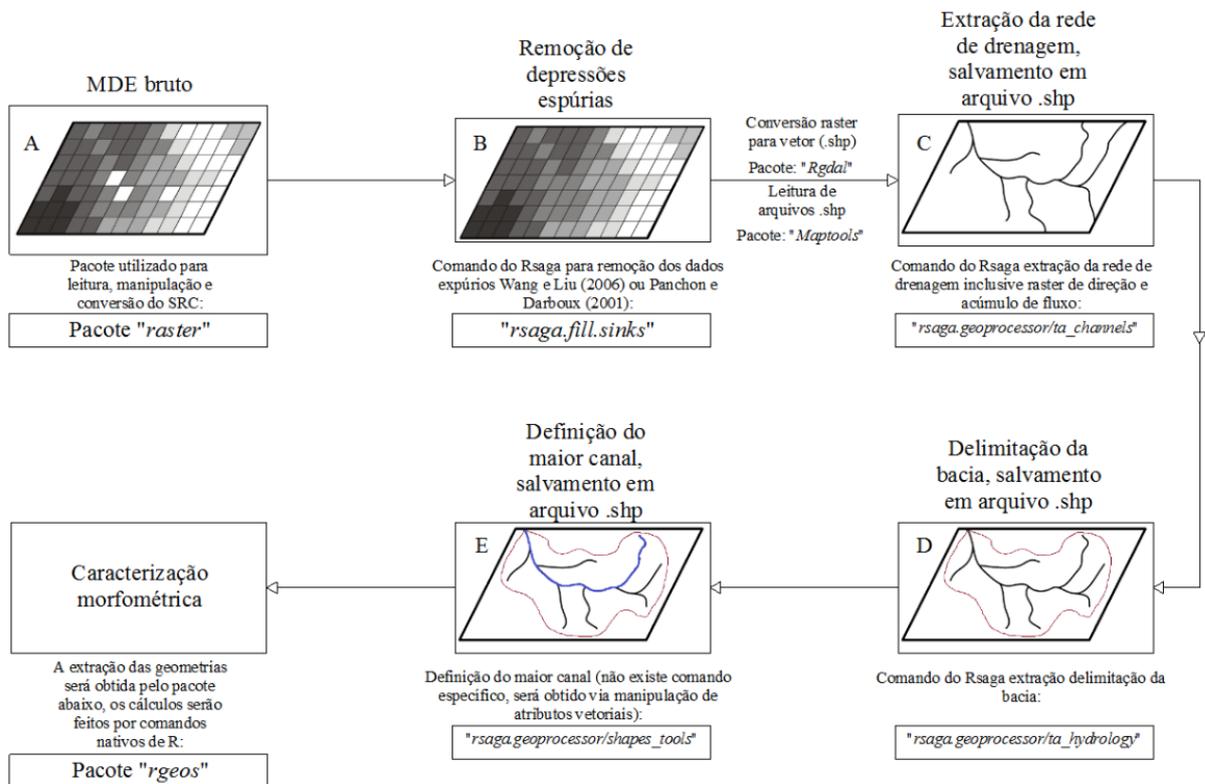
- Biblioteca “*Maptools*”: Conjunto de ferramentas para leitura de dados geográficos, em especial, arquivos ESRI shape.
- biblioteca “*Rgdal*”: Utilizado para conversão de formatos matriciais e vetoriais.

- biblioteca “*raster*”: Ferramenta utilizada para leitura, gravação e manipulação de arquivos rasters;
- biblioteca “*magrittr*”: Ferramenta utilizada como mecanismo para encadeamento de comandos;
- biblioteca “*rgeos*”: Utilizado para extração de dados geométricos dos arquivos shapes, como área comprimento posição do centroide etc e
- biblioteca “*prettymapr*”: Utilizado para incrementar efeitos gráficos em mapas, como seta de norte e escalas gráficas.

4.2 Principais etapas a serem executadas no script em R

A figura 10 apresenta as principais etapas para realização do procedimento proposto em R. Em geral resume as principais etapas que deveriam ser feitas todas as vezes que se pretendesse realizar uma caracterização morfométrica de uma bacia. Via de regra, delimitar bacias hidrográficas a partir de R segue os mesmos procedimentos das metodologias já consolidadas em diversos softwares. No entanto R oferece a possibilidade de automatizar o processo evitando retrabalhos. Outro ponto importante é que R automatiza o procedimento de elaboração de mapas de representação de dados matriciais e vetoriais.

Figura 10 - Principais etapas realizadas em R através do script base para a ferramenta proposta.



Fonte: o Autor

Fonte das ilustrações A até E: Adaptado de HENGL (2010).

4.3 Descrição da ferramenta computacional

A ferramenta apresentada tem em vista a facilidade de uso e a organização dos resultados, para que o profissional possa verificar de forma rápida e sistematizada os parâmetros físicos de uma determinada bacia hidrográfica. Com objetivo de auxiliar na gestão ambiental e dimensionamento de obras hídricas, mediante visualização gráfica dos elementos físicos de uma bacia hidrográfica, subsidiando-os a concluir sobre o comportamento hidrológico de um determinado local.

Para o desenvolvimento dessa ferramenta, partiu-se do princípio que os profissionais, tanto na gestão ambiental, quanto no projeto de obras hídricas, têm a necessidade de obter os parâmetros físicos de uma bacia hidrográfica, seja para obtenção da vazão de projeto para dimensionamento de obras hídricas, ou seja para subsidiar a elaboração de prognósticos, a gestão e o gerenciamento dos recursos hídricos. Para a obtenção desses parâmetros, comumente é necessário a utilização de algum software SIG, que em sua maioria envolvem diversos procedimentos para a obtenção dos resultados. Dessa forma, buscou-se com essa ferramenta simplificar esse processo, desde o aprendizado de um determinado software SIG, ganho de

tempo evitando retrabalhos e alimentação de planilhas eletrônicas. Assim, será permitido ao profissional, devido a praticidade, poder fazer comparações entre os diversos Modelos Digitais de Elevação e poder selecionar qual o modelo que será adotado e que melhor se enquadra para uma determinada região.

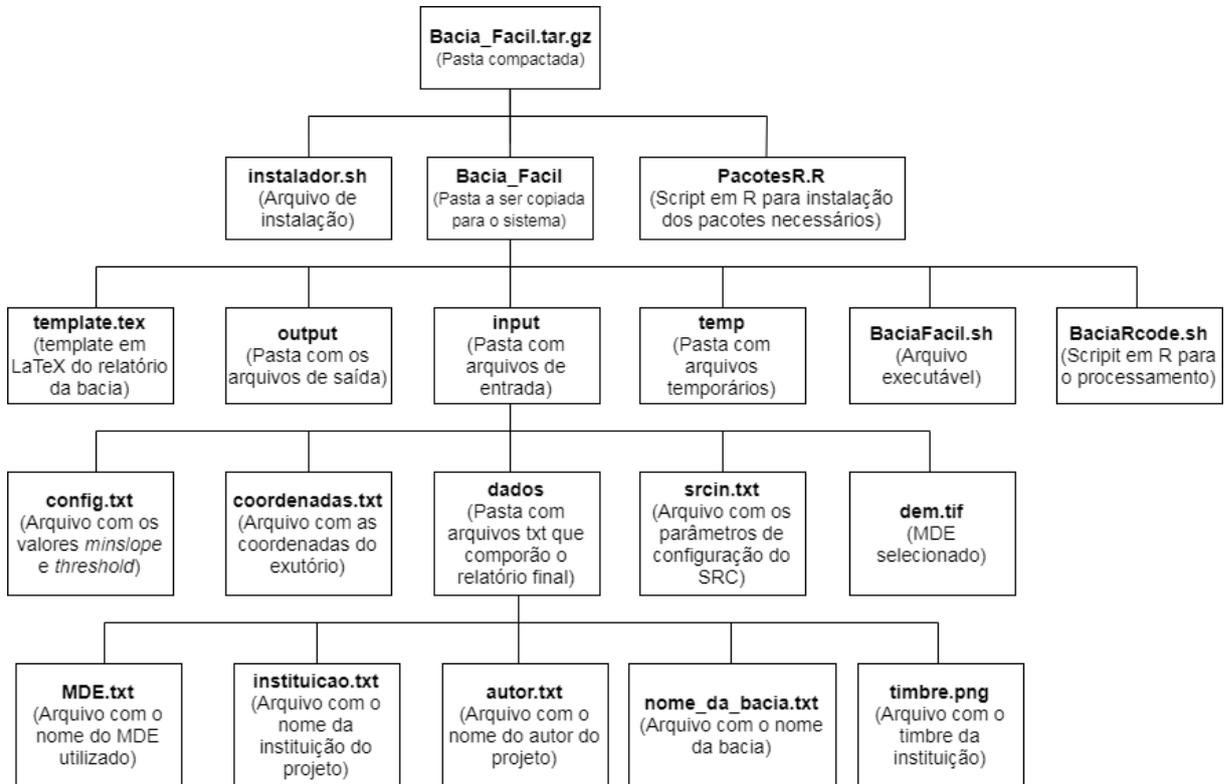
Em geral, o desenvolvimento desta ferramenta, foi realizada a partir da visão de um engenheiro civil que se deparou com as dificuldades apontadas e pretende usufruir desta ferramenta para lhe auxiliar no dimensionamento de obras hídricas. A seguir será demonstrada a arquitetura da ferramenta desenvolvida, bem como seu funcionamento e maiores detalhes.

4.3.1 Instalação

O programa foi implementado em uma pasta compactada em um arquivo *tar.gz*, onde estão todos os arquivos necessários para o seu funcionamento. Nela pode-se encontrar o instalador em formato *.sh* que é um *Shell script* que verifica se as aplicações necessárias para o funcionamento da ferramenta já estão instaladas no sistema e caso contrário as instala, além de criar todas as pastas internas e arquivos necessários. Por segurança buscou-se copiar a pasta da ferramenta para o diretório */home* do Linux e também, para ficar disponível a todos os utilizadores do sistema.

Na figura 11 pode-se identificar a estrutura de diretórios e arquivos da ferramenta elaborada:

Figura 11 - Árvore de diretórios e arquivos da pasta de instalação da ferramenta computacional proposta.



Fonte: o Autor.

Uma vez executado o instalador, é copiada a pasta “Bacia_Facil” e todos os seus arquivos e subpastas para o diretório `/home` do Linux. Além disso são verificados se já existem e caso contrário instala todas as aplicações necessárias para o funcionamento do programa. Por exemplo, utilizou-se do seguinte código no Shell (figura 12) para verificação e instalação do programa R no Linux:

Figura 12 - Código em Shell Bash utilizado no script de instalação para verificar se um programa já está instalado no sistema, caso contrário o programa é instalado.

```

1  #Verifica se o programa R esta instalado, senao executa a instalacao
2
3  echo
4  nome="r-base"
5  pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
6  echo
7  echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
8  sleep 2
9  if [ -n "$pacote" ] ;
10 then echo
11     echo "Pacote $nome ja instalado"
12 else echo
13     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
14     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de senha"
15     sudo apt-get install $nome
16     sudo apt-get install r-base-dev
17 fi
  
```

Fonte: o Autor.

O procedimento da figura 12 também é executado para os seguintes programas necessários para o funcionamento da ferramenta elaborada:

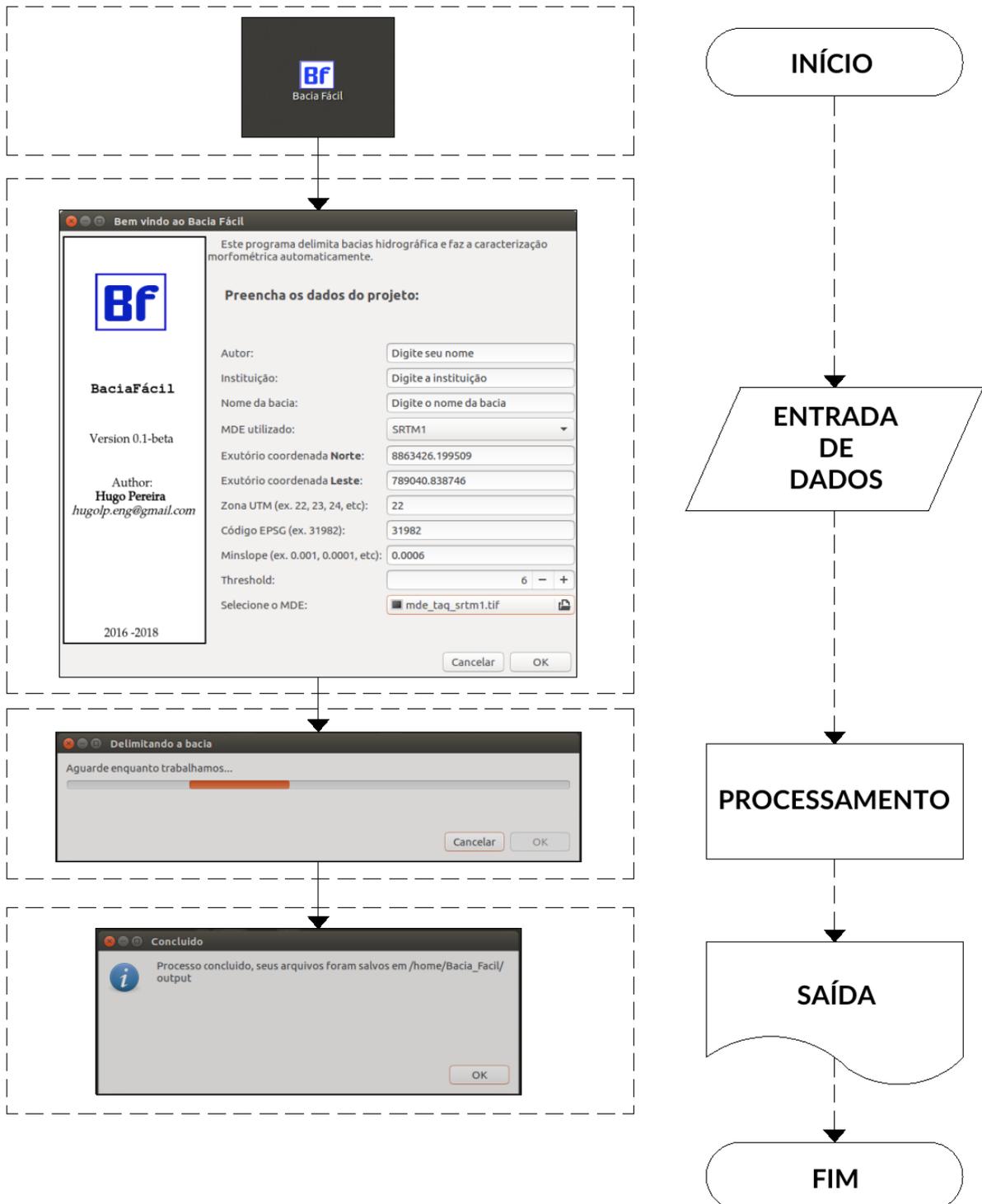
- libgeos-dev - biblioteca GEO no Linux;
- libproj-dev - biblioteca GEO no Linux;
- libgdal1-dev - biblioteca GEO no Linux;
- build-essential – compilador no Linux;
- r-base – Software R;
- saga – Software SAGA GIS;
- texlive – Distribuição LaTeX para Linux;
- libgnome2-bin – Biblioteca utilizada para executar arquivos a partir do programa padrão do sistema;
- zenity – software para desenvolvimento de interface gráfica;
- YAD - software para desenvolvimento de interface gráfica.

Além destas aplicações também são instalados os seguintes pacotes em R: RSAGA, magrittr, raster, maptools, rgeos, rgdal e prettymapr.

4.3.2 Interface

Após executado o instalador o programa estará pronto para uso, bastando para tanto a execução do arquivo “BaciaFacil.sh”, podendo ainda ser executado através do seu lançador para desktop criado automaticamente. Com isso será exibida uma sequência de caixas de diálogo para inserção dos dados de entrada. Todos os dados de entrada são armazenados em arquivos de textos em pastas específicas conforme a figura 11. Optou-se por este procedimento, visto que tanto o software R quanto *texlive* têm a opção de importar dados a partir de arquivos de textos. A seguir, na figura 13 pode-se verificar o fluxo de diálogos do funcionamento da ferramenta computacional.

Figura 13 – Fluxo de diálogos do funcionamento da ferramenta computacional.



Fonte: o Autor.

Na figura 14 são apresentados exemplos de códigos em *Shell Bash* para a edição dos arquivos de dados básicos (linhas 1 a 9) como: autor do projeto, nome da instituição, nome da bacía e nome de MDE utilizado, que serão utilizados para compor o relatório final da bacía a

ser gerado e também para editar os arquivos que contém as coordenadas do exutório e os parâmetros de configuração do Sistema de Referência de Coordenadas (linhas 11 a 17). O primeiro código irá armazenar nos respectivos arquivos os dados digitados pelo usuário, ou seja, o nome do autor do projeto será salvo no arquivo de texto autor.txt isso de forma individual, visto que serão utilizados em locais específicos no código LaTeX do relatório final da bacia. No segundo código utilizou-se o comando “sed” no Shell para substituir textos específicos no arquivo de texto que contém as coordenadas e também os parâmetros de configuração do SRC, já que em R é possível importar os arquivos de texto para tabelas de dados ou *data frame*.

Figura 14 - Código em Shell Bash utilizado para editar os arquivos de textos que serão importados pelos softwares R e texlive para processamento e edição do relatório final da bacia em pdf.

```

1 Formdados=$(zenity --forms --title="Dados do projeto" --text="Preencha todos os campos"
  --add-entry="Autor" --add-entry="Instituição" --add-entry="Nome da Bacia" --add-entry="MDE
  utilizado" --width=500 --height=200) &&
2 Autor=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f1)
3 Instituicao=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f2)
4 Nome_da_bacia=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f3)
5 MDE_utilizado=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f4)
6 echo $Autor > /home/Bacia_Facil/input/dados/autor.txt
7 echo $Instituicao > /home/Bacia_Facil/input/dados/instituicao.txt
8 echo $Nome_da_bacia > /home/Bacia_Facil/input/dados/nome_da_bacia.txt
9 echo $MDE_utilizado > /home/Bacia_Facil/input/dados/MDE.txt
10
11 Formcoord=$(zenity --forms --title="Coordenadas do exutório" --text="Informe as coordenadas
  do exutório em <b>UTM SIRGAS 2000</b>" --add-entry="Norte (ex. 888888.8888)"
  --add-entry="Leste (ex. 888888.8888)" --add-entry="ZonaUTM (ex. 22)" --add-entry="EPSG (ex.
  31982)" --width=500 --height=200) &&
12 Norte=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f1)
13 Leste=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f2)
14 ZonaUTM=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f3)
15 EPSG=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f4)
16 sed -i '2s/^\$1'.*$/\$Norte' '\$Leste/' /home/Bacia_Facil/input/coordenadas.txt
17 sed -i '1s/^\$1'.*$/+init=epsg:'\$EPSG' +proj=utm +zone='\$ZonaUTM' +south +ellps=GRS80
  +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs/' /home/Bacia_Facil/input/srcin.txt
18

```

Fonte: o Autor.

Após inseridos os dados de entrada, o programa exibe o diálogo para seleção do MDE a ser utilizado no processamento e em seguida renomeia o arquivo para dem.tif, copiando-o, para a pasta *input*, conforme figura 11. Assim todos os dados necessários já foram configurados para dar início ao processamento a partir do script em R “BaciaRcode.R” na pasta “Bacia_Facil”. Portanto todos os cálculos são efetuados a partir de R.

4.3.3 Cálculos executados a partir de R

O script “BaciaRcode.R” pode ser chamado facilmente através do Shell com o comando “R CMD BATCH BaciaRcode.r”, que utilizará os dados de entrada fornecidos pelo usuário para processamento dos dados. A seguir serão apresentadas as principais tarefas executadas no script

“BaciaRcode.R”.

Geralmente os MDE's são disponibilizados em formato GeoTIFF, e o software R utiliza o pacote RSAGA para acessar as funções de geocomputação e análise de terreno do sistema de informações geográficas SAGAGIS. Desta forma é necessário a conversão do MDE para o formato SAGA (.sdat), executando-se o comando “*rsaga.import.gdal*”.

4.3.3.1 Algoritmo adotado para eliminação dos dados espúrios

Uma vez convertido o arquivo do MDE, o mesmo é projetado para o SRC selecionado pelo usuário no diálogo de entrada de dados da figura 13, através do comando “*projectRaster*”. Em seguida é necessário eliminar os dados espúrios do MDE a fim de torna-lo um MDEHC. Em R, através de RSAGA é possível utilizar dois algoritmos para este procedimento, *wang.liu.2006* e *planchon.dorboux.2001*. Para fins deste trabalho optou-se por utilizar apenas *wang.liu.2006*, pois apresentou menor tempo de processamento e resultados similares ao outro algoritmo.

A eliminação dos dados espúrios é executada através do comando *rsaga.fill.sinks* que depende do valor do *minslope* fornecido pelo usuário no diálogo de entrada de dados da figura 13. *Minslope*, como mencionado, corresponde ao menor ângulo de inclinação entre as células do MDE, nesse caso, quanto menor for esse ângulo melhor será o detalhamento da rede de drenagem e perímetro da bacia em regiões de baixo relevo. Por exemplo, em uma região de baixo relevo onde a maioria das inclinações entre os píxeis do MDE é menor que 0.001m/m e for utilizado um *minslope* maior, parte da área a ser delimitada será considerada plana, não sendo possível a delimitação e extração da rede de drenagem de forma apropriada.

4.3.3.2 Delimitação da bacia e rede de drenagem

As coordenadas do exutório são importadas através do comando *read.table*. Para delimitação de bacias hidrográficas a partir de modelos digitais de elevação é necessário que estas coordenadas estejam exatamente sobre a rede de drenagem, caso contrário a área a ser delimitada corresponderá a poucos píxeis do MDE. Buscou-se minimizar este problema adotando um *buffer* em torno da coordenada digitada de 500 m de raio, para qualquer ponto digitado neste raio o programa irá considerar como exutório o ponto mais próximo da rede de drenagem. Este procedimento é descrito no código da figura 15:

Figura 15 - Código utilizado para delimitação de um buffer de 500 m em torno do ponto adotado como exutório, para que seja tomado como novo exutório o ponto sobre a rede de drenagem mais próximo.

```

1  sr<-readLines("/home/Bacia_Facil/input/srcin.txt")
2  rsaga.topdown.processing('/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sgrd', out.carea =
3  '/home/Bacia_Facil/temp/areacaptacao.sgrd', env = myenv)
4  exutorio <- read.table('/home/Bacia_Facil/input/coordenadas.txt', head=T)
5  coordinates(exutorio) <- ~ x + y
6  projection(exutorio) <- CRS(sr)
7  fill_dem <- raster('/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sdat')
8  projection(fill_dem) <- CRS(sr)
9  areacap <- raster('/home/Bacia_Facil/temp/areacaptacao.sdat')
10 buffer <- extract(areacap, exutorio, buffer = 500, cellnumbers = T)[[1]] %>%
11   as.data.frame
12 snap_loc <- buffer$cell[which.max(buffer$value)]
13 snap_loc <- xyFromCell(areacap, snap_loc)

```

Fonte: o Autor.

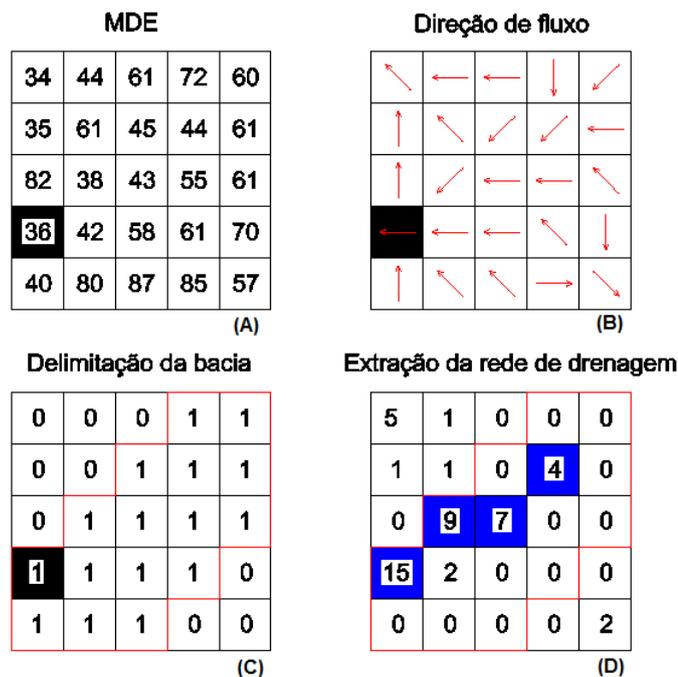
Com isso a bacia é delimitada através do comando *rsaga.geoprocessor(lib = 'ta_hydrology', module=4,...)* e convertida para *shapefile* através do comando *rsaga.geoprocessor(lib = 'shapes_grid', module=6, ...)*.

O comando *ta_hydrology* utiliza o método D8 para determinação da direção de fluxo; a delimitação da bacia tem como resultado um arquivo *raster* onde cada píxel interno à bacia recebe o código 1 e os demais código 0. Para isso, analisa-se píxel a píxel do raster de fluxo acumulado, que por sua vez tem em cada píxel os valores dos números de células que drenam para ele (figura 16-D), conforme o raster de direção de fluxo (figura 16-B). Com isso a delimitação da bacia considera o fato de que qualquer escoamento partindo de um píxel pertencente à bacia deve possuir um caminho a ser percorrido (de acordo com as direções de fluxo) até o exutório (BUARQUE, PAZ e COLLISHONN, 2008). Conforme Buarque et al. (2008), os passos computacionais do algoritmo para delimitação de bacias são:

- cria-se uma matriz com o mesmo número de linhas e colunas do MNT, onde todas as posições possuem valor nulo, com exceção da posição correspondente ao píxel exutório, a qual possui valor 1;
- para cada píxel do MNT, selecionados seguindo a sequência de linhas e colunas, excluindo-se aqueles pertencentes à região da máscara, utiliza-se o plano de direções de fluxo para verificar o caminho a ser percorrido, dentro da área abrangente pelo MNT, pelo escoamento gerado no píxel;
- a verificação é feita píxel a píxel, no sentido do escoamento, e se o caminho a ser percorrido pelo escoamento gerado por um píxel passa pelo exutório, significa que este píxel pertence à bacia e a sua posição correspondente na matriz é rotulada com o código

1. A verificação é então reiniciada a partir do próximo píxel (próxima linha e/ou coluna);
- durante o percurso, caso seja encontrada uma região de máscara ou o limite do domínio do MNT, a verificação atual é interrompida e reiniciada a partir do próximo píxel;
 - se no trajeto for encontrado um píxel já rotulado com valor 1 (verificado na matriz), significa que o píxel analisado também pertence a bacia e sua posição na matriz recebe rótulo 1. A verificação é, novamente, reiniciada a partir do próximo píxel;
 - uma vez verificados os caminhos de todos os píxeis, apenas aqueles pertencentes à bacia terão suas posições rotuladas com código 1 na matriz, sendo posteriormente gerado o arquivo raster (plano) contendo a bacia.

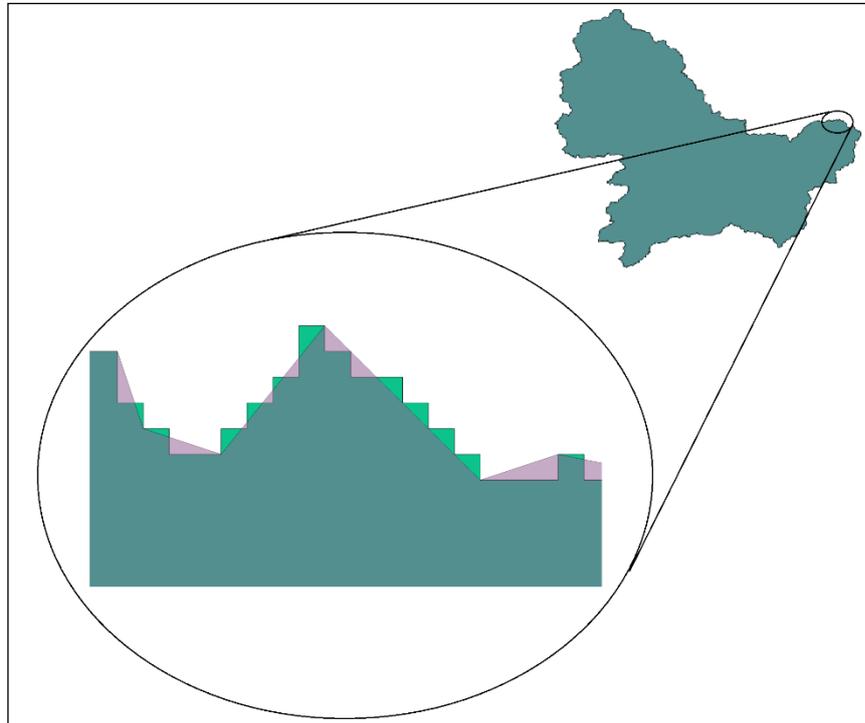
Figura 16 – Exemplo numérico de um Modelo Digital de Elevação hipotético (A), dos rasters de direção de fluxo (B), área de contribuição (C) e Fluxo acumulado (D).



Fonte: o Autor.

A bacia é delimitada utilizando o contorno retangular dos píxeis do MDE, essa situação reflete significativamente no cálculo do perímetro da bacia, pois não haveria concordância com a situação real. Buscou-se minimizar esse problema aplicando o comando *gSimplify*. Essa situação é demonstrada na figura 17.

Figura 17 - Procedimento de suavização do perímetro da bacia a partir do comando gSimplify em R.



Fonte: o Autor.

Para extração da rede de drenagem, optou-se por recortar o MDEHC conforme os limites do *shapefile* da bacia delimitada a fim de obter ganho de tempo de processamento, para isso foram utilizados os comandos *crop* e *mask*.

Para extração da rede de drenagem o comando *rsaga.geoprocessor("ta_channels", module=5,...)*, tendo como parâmetro de entrada o raster da bacia recortada pelos comandos do parágrafo anterior.

Nesse momento é incrementado o valor do *threshold*, fornecido pelo usuário via interface gráfica, esse valor irá definir o nível de detalhamento da rede de drenagem e também a densidade de drenagem da bacia, quanto menor o valor do *threshold* fornecido maior será o valor da densidade de drenagem. Este procedimento utiliza o *raster* de fluxo acumulado, e transforma todo píxel que apresentar seu valor acumulado maior que o determinado pelo usuário (*threshold*) para o valor 1 do novo mapa. Todos os píxeis que tiverem um valor menor que o *threshold*, são automaticamente transformados para o valor 0. (BOSQUILIA, FIORIO, *et al.*, 2013).

4.3.3.3 Determinação do canal principal

O comprimento do rio principal é medido através da distância do exutório definido para a bacia até uma determinada nascente. Só que existem vários critérios distintos na literatura que instruem como definir qual é o rio principal em meio a rede de drenagem. Podem-se utilizar os seguintes critérios: (CHRISTOFOLETTI, 1980)

- a) Caso a bacia tenha sua classificação hierárquica baseada nos critérios definidos por Horton (1945, apud CHRISTOFOLETTI, 1980), o canal de ordem mais elevada seria o canal principal;
- b) nas confluências a partir do exutório, optar pelo segmento de maior ordem;
- c) em cada bifurcação, optar pelo segmento que percorre a região topográfica menos elevada, seguindo esse critério até atingir a nascente do canal de primeira ordem;
- d) curso de água mais longo, do exutório da bacia até determinada nascente, medido como a soma dos comprimentos dos seus segmentos.

Acrescenta-se ainda o critério estabelecido por Tucci (2004):

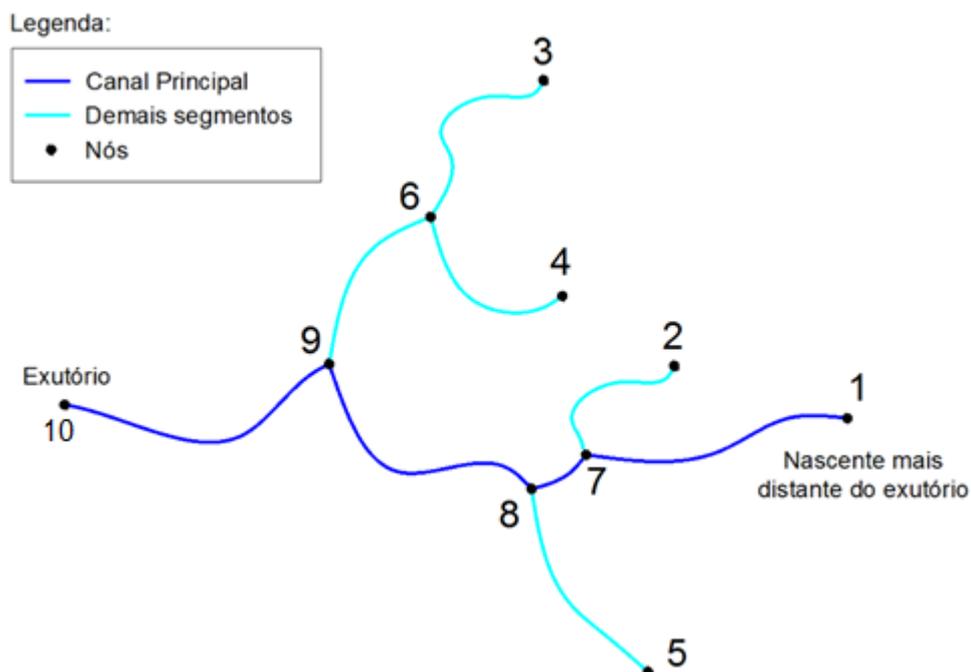
- e) em que o comprimento do canal principal é determinado medindo-se o comprimento do trecho entre a nascente mais distante e o exutório.

O critério “a” não é aplicável neste trabalho, tendo em vista que foi utilizada a classificação hierárquica da ordem dos canais definida por Strahler (1952). Quanto ao critério “b”, para o processamento automático, não resultaria em resultados satisfatórios pois na hierarquia de canais propostas por Strahler haveria a confluência de canais com a mesma ordem, impossibilitando aplicar esta condição. O terceiro pode ser incrementado no processamento computacional, só que enfrentaria problemas em pequenas bacias, considera como canal principal aquele que percorre o vale de menor cota e desconsideraria nascentes em regiões de alto relevo, fazendo com que em pequenas bacias o canal principal fosse de sobremaneira pequeno. Por fim, os critérios “d” e “e” foram os que mais se adequaram do ponto de vista prático para ser incrementados na ferramenta computacional. Dessa forma, optou-se para o cálculo do canal principal o critério “e” estabelecido por Tucci (2004).

Para definição do canal principal, inicialmente calculou-se as distâncias de todas as nascentes que compõem a rede de drenagem até o exutório, para que fosse selecionada a nascente mais distante do exutório para o cálculo do canal principal. Baseou-se nos atributos

da rede de drenagem gerada pela função `rsaga.geoprocessor("ta_channels", module=5,...)`. Dentre estes atributos, cada segmento da rede de drenagem é definido através do seu nó inicial e seu nó final, todos os nós têm uma numeração distinta, porém a numeração dos nós segue uma sequência lógica. Ou seja, se o segmento da nascente começa em um nó de número variável “a” e termina em outro nó com numeração também variável “b”, o segmento subsequente seria iniciado no nó “b” e terminaria em outro nó qualquer e assim sucessivamente até atingir o segmento que tem como nó final o exutório. Observando a figura 18, partindo desse princípio, o canal principal seria definido pelos segmentos: 1-7, 7-8, 8-9 e 9-10.

Figura 18 – Exemplo hipotético de uma rede de drenagem, demonstrando o critério utilizado para definição do canal principal.



Fonte; o Autor.

Na figura 19, está presente uma tabela de atributos de uma rede de drenagem gerada pela função `rsaga.geoprocessor("ta_channels", module=5,...)` em R. É possível observar lógica de numeração dos nascentes e confluências que formam a rede de drenagem.

Figura 19 - Tabela de atributos do arquivo *shapefile* da rede de drenagem da bacia gerada pelo código `rsaga.geoprocessor("ta_channels", module=5,...)`.

	SEGMENT_ID	NODE_A	NODE_B	BASIN	ORDER	ORDER_CELL	LENGTH
0	1	1	3	1	1	6	4732.7097224000
1	2	2	3	1	1	6	1458.3051076000
2	3	3	5	1	2	7	1093.5051076000
3	4	4	6	1	1	6	1338.8655690000
4	5	5	10	1	3	8	3453.7492609000
5	6	6	5	1	2	7	1093.5051076000
6	7	7	6	1	1	6	1311.5209230000
7	8	8	10	1	1	6	524.1762768900
8	9	9	15	1	1	6	1759.2497536000
9	10	11	20	1	1	6	3089.8441533000
10	11	10	20	1	3	8	3011.2362456000
11	12	12	24	1	1	6	2025.4734767000

Fonte: o Autor.

Para que o canal principal fosse definido de forma automática, elaborou-se um algoritmo que percorre todos elementos da coluna `NODE_A` da tabela de atributos selecionando o segmento cujo `NODE_A` é igual ao `NODE_B` do segmento que se inicia na nascente mais distante, parando a repetição quando não existir mais `NODE_A`'s iguais ao `NODE_B` anterior. Esse procedimento é descrito no código da figura 20.

Figura 20 - Algoritmo para definição do canal principal da bacia.

```

1  nascentes<-readShapeSpatial('C:/R/output/nos.shp', proj4string = CRS(sr))
2  nasc_data<-nascentes@data
3  nasc_coord<-coordinates(nascentes)
4  nasc_data["x"]<-nasc_coord[,1]
5  nasc_data["y"]<-nasc_coord[,2]
6  foz<-coordinates(exutorio)
7  foz_nasc<-(((foz[,1]-nasc_data[,3])**2)+((foz[,2]-nasc_data[,4])**2)**(1/2)
8  no_nasc<-match(max(foz_nasc), foz_nasc)
9
10 attach(drenagem@data)
11 NO_A<-NODE_A
12 NO_B<-NODE_B
13 pontos_principais2<-c(no_nasc)
14 detach(drenagem@data)
15 NO_B<-NO_B[match(no_nasc, NO_A):length(NO_B)]
16
17 repeat{for(i in 1:length(NO_A)){if(NO_A[i]==NO_B[1]){pontos_principais<-c(NO_A[i])}}
18     teste<-subset(drenagem@data, NODE_A==pontos_principais)
19     teste2<-teste[,1]
20     attach(drenagem@data)
21     NO_A<-NODE_A
22     NO_B<-NODE_B
23     detach(drenagem@data)
24     NO_B<-NO_B[teste2:length(NO_B)]
25     pontos_principais2<-c(pontos_principais2,pontos_principais)
26     repetidos<-length(pontos_principais2)-length(unique(pontos_principais2))
27     if(repetidos==1)break()}
28
29 pontos_principais2<-pontos_principais2[-length(pontos_principais2)]
30 canal_principal<-drenagem[as.character(drenagem@data$NODE_A)%in%pontos_principais2,]
31 writeSpatialShape(canal_principal, 'C:/R/output/canal_principal')

```

Fonte: o Autor.

4.3.3.4 Cálculo dos parâmetros básicos

A maioria das características morfométricas são derivadas de parâmetros básicos como área, perímetro e amplitude altimétrica da bacia além de comprimentos dos canais, para obtenção desses dados foram utilizados comandos básicos disponíveis em R, como *gArea*, *gLength*, *maxValue*, *minValue*, *geom*, etc. Mais informações sobre os cálculos desses parâmetros podem ser conferidas no apêndice D.

4.3.3.5 Cálculo das inclinações do canal principal e declividade da bacia

Para o cálculo das inclinações, média, aparente e equivalente do canal principal, foram extraídos todos os nós do canal principal com suas respectivas coordenadas x, y e z. e definidas as distâncias planimétricas de cada segmento do canal principal. Foi elaborado um algoritmo com a utilização de procedimentos aritméticos para obtenção das inclinações do canal principal, conforme código presente na figura 21.

Para obtenção das declividades mínima, máxima e média da bacia, foi utilizado o comando *rsaga.geoprocessor("ta_morphometry", module=0, ...)* para a obtenção do raster de

declividades da bacia, também foi gerado com este comando o *raster* do aspecto da bacia que será utilizado para obtenção do mapa de relevo sombreado.

Em R existem comandos básicos que podem ser utilizados para obtenção de dados estatísticos de arquivos *rasters*. Foi utilizado o comando *cellStats* para extração dos valores das declividades média, mínima e máxima da bacia.

Figura 21 - Algoritmo para definição das inclinações aparente (linhas 1 a 12), média (linhas 14 a 18) e equivalente (linhas 20 a 23) do canal principal da bacia.

```

1  nos_canais <- readShapeSpatial('/home/Bacia_Facil/output/nos.shp', proj4string = CRS(sr))
2  nos_principais<-nos_canais[as.character(nos_canais@data$NODE_ID)%in%pontos_principais2,]
3  writeSpatialShape(nos_principais, '/home/Bacia_Facil/output/nos_principais')
4  coordenadasXYZ_nos <-coordinates(nos_principais)
5  attach(canal_principal@data)
6  L_nos<-LENGTH
7  detach(canal_principal@data)
8  cotas_nos<-as.vector(coordenadasXYZ_nos[,3])
9  cotas_nos<-rev(sort(cotas_nos))
10 cumL_nos<-cumsum(L_nos)
11 Iaparente<-(cotas_nos[1]-cotas_nos[length(cotas_nos)])/gLength(canal_principal)
12 S1<-Iaparente
13
14 integral<-c()
15 for(i in
16   1:(length(cumL_nos)-1)) {integral[i]<-((cumL_nos[i+1]-cumL_nos[i])*((cotas_nos[i]+cotas_nos[i+
17   1])/2))}
16 cota_media<-(sum(integral)*2/cumL_nos[length(cumL_nos)]-cotas_nos[length(cotas_nos)]
17 Imedia<-(cota_media-cotas_nos[length(cotas_nos)])/cumL_nos[length(cumL_nos)]
18 S2<-Imedia
19
20 Isegs<-c()
21 for(i in 1:(length(cumL_nos)-1)) {Isegs[i]<-((cotas_nos[i]-cotas_nos[i+1])/L_nos[i])}
22 Iequivalente<-((sum(L_nos[-length(L_nos)])/sum(L_nos[-length(L_nos)]/sqrt(Isegs)))**2
23 S3<-Iequivalente

```

Fonte: o Autor.

4.3.3.6 Tabela de características morfométricas

Todas as características morfométricas obtidas, foram agrupadas em uma tabela de dados e exportada para a pasta *output* em formato *csv*, que fará parte do relatório final em pdf, que será importada por *texlive* através do pacote *csvsimple*.

A tabela com as características morfométricas calculadas, podem ser conferidas no quadro a seguir.

Quadro 7 - Características morfométricas geradas automaticamente pela ferramenta proposta.

	Característica	Siglas	Unidades	Valores
1	Área	A	km ²	447.968769879022
2	Perímetro	P	km	150.734895459445
3	Altitude máxima da bacia	P2	m	716.728271484375
4	Altitude mínima da bacia	P1	m	206.62321472168
5	Amplitude altimétrica	Fm	m	510.105056762695
6	Altitude média	Pm	m	469.258243104611
7	Comprimento ortogonal da bacia	L	m	33075.2
8	Largura ortogonal da bacia	B	m	27086.4000000004
9	Centroide eixo X	CX	m	807346.95235672
10	Centroide eixo Y	CY	m	8861624.78985612
11	Comprimento do maior segmento	Lm	m	6619.6701838
12	Comprimento total dos cursos d'água	Ld	m	243203.241628297
13	Número de canais	Nt	und	142
14	Densidade de drenagem	Dd	km/km ²	0.542902224398313
15	Ordem da bacia	u	Adimensional	5
16	Comp. canais de 1 ^a ordem	Lu	m	123148.07056735
17	Gradiente de canais do canal principal	Gcp	m/km	40.5732404995576
18	Densidade hidrográfica	Dh	und/km ²	0.316986382864029
19	Num. canais 1 ^a ordem	Np	und	72
20	Coef. de torrencialidade	Ctr	und/km ²	0.160725489902888
21	Extensão do percurso superficial	Eps	km	0.920976149165974
22	Comp. médio canais de 1 ^a ordem	Lm1	m	1710.38986899097
23	Comp. médio canais de 2 ^a ordem	Lm2	m	1562.53360295966
24	Relação Lm1/Lm2	Rlm	Adimensional	1.09462597524383
25	Textura topográfica	T	und/km	0.942051271984362
26	Comp. médio dos canais	Lmt	m	1712.69888470197
27	Coef. de manutenção	Cm	km	1841.95229833195
28	Comprimento linear da foz até a nascente mais distante	La	m	34070.1956230608
29	Comprimento do canal principal	Lp	m	47459.6530702713
30	Inclinação aparente do canal principal	S1	m/m	0.00920524751301258
31	Inclinação média do canal principal	S2	m/m	0.00372331344118048
32	Inclinação equivalente do canal principal	S3	m/m	0.000794680114849438
33	Índice de circularidade	Ic	Adimensional	0.247830873596151
34	Relação de relevo	Rr	Adimensional	0.0154225841948861
35	Coef. de compacidade	Kc	Adimensional	1.99410474224838
36	Fator de forma	Kf	Adimensional	0.409489509518664
37	Forma da bacia	Fb	Adimensional	37.345974658356
38	Declividade média da bacia	Dm	m/m	0.148339346537771
39	Declividade máxima da bacia	Dmax	m/m	1.57079637050629
40	Declividade mínima da bacia	Dmin	m/m	9.93778303381987e-06
41	Índice de rugosidade	Ir	Adimensional	0.276937169993295
42	Coefficiente de rugosidade	Cr	km/km ²	0.00140558243250325
43	Índice de sinuosidade	IS	Adimensional	1.39299620100061

Fonte: o Autor.

4.3.3.7 Gráficos e mapas gerados

Todos os gráficos e mapas são gerados automaticamente, através do comando *plot* do R. Incrementos gráficos como barra de escala e seta de norte foram possibilitados pelo pacote *pretymapr*. Os parâmetros para configuração dos mapas de aspecto, relevo sombreado e declividade foram adotados conforme a metodologia proposta por Macêdo (2017). Segue na figura 22, exemplo de código para gerar o mapa de relevo sombreado em R.

Figura 22 - Algoritmo gerar o mapa de relevo sombreado em R.

```

1 demrecortado<-raster('/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sdat')
2 demrecortado2<-crop(demrecortado,extent(basin))
3 mascararecorte<-mask(demrecortado2,basin)
4 mascararecorte_10x<-mascararecorte*10
5 slope_10x<-terrain(mascararecorte_10x,opt='slope',unit='radians',neighbors=8)
6 aspecto_10x<-terrain(mascararecorte_10x,opt='aspect',unit='radians',neighbors=8)
7 sombreado<-hillShade(slope_10x,aspecto_10x,angle=40,direction=270)
8 png(filename='/home/Bacia_Facil/output/Sombreado.png')
9 plot(sombreado,col=grey.colors(100,start=0,end=1,gamma=0.45,alpha=NULL),legend=
FALSE)
10 addscalebar(ploteps=31980,widthhint=0.15,style='bar',pos='bottomleft')
11 addnortharrow(pos='topright',scale=0.8)
12 dev.off()

```

Fonte: adaptado de Macêdo (2017).

O mapa planialtimétrico é obtido com a geração automática de curvas de nível com o comando *r.contour*. Os mapas de declividade e aspecto são calculados com *r.slope.aspect*. O mapa de aspecto é gerado a partir dos azimutes das superfícies vertentes, neste trabalho o mapa de aspecto foi classificado em oito categorias: NE(0-45° e 45-90°), SE(90-135° e 135-180°), SW(180-225° e 225-270°) e NW(270-315° e 315-360°), em camadas separadas. As cores dos mapas são ajustadas com o comando *r.colors*.

4.3.3.8 Hipsometria

A hipsometria das bacias é obtida a partir do comando *rsaga.geoprocessor("ta_morphometry", module=5, ...)*, este comando fornece uma tabela de dados com a área relativa e absoluta da bacia a cada 1 metro de cota além da altitude absoluta. Dessa forma calculou-se o percentual absoluto da área, para possibilitar a elaboração automática do gráfico da curva hipsométrica. Como o comando é aplicado sobre o *raster* da bacia recortada, existem inúmeras células no entorno da área delimitada com valores negativos ou “NA’s” (nulos), dessa forma selecionou-se apenas os valores de altura absoluta maiores ou iguais a 0, conforme o código da figura 23.

Figura 23 - Algoritmo para extração da curva hipsométrica de bacias hidrográficas a partir de R

```

1 rsaga.geoprocessor("ta_morphometry", module=5,
param=list(ELEVATION="/home/Bacia_Facil/output/recorte_bacia.sgrd",TABLE="/home/Bacia_Facil/t
emp/Hipsometria.csv"))
2
3 hipsometria<-read.csv("/home/Bacia_Facil/temp/Hipsometria.csv")
4 hipsometria2<-subset(hipsometria,Absolute.Height>=0)
5 attach(hipsometria2)
6 porcentagem<-Absolute.Area*100/max(Absolute.Area)
7 cotas<-Absolute.Height
8 detach(hipsometria2)
9 png(filename='/home/Bacia_Facil/output/Curva_hipsometrica.png')
10 plot(cotas~porcentagem,type="o",col="red",xlab="Área (%)",ylab="Cotas (m)",main
="Curva Hipsométrica")
11 dev.off()

```

Fonte: o Autor.

A hipsometria e a curva hipsométrica são obtidas contando-se o número de células com valor igual ou superior a uma altitude determinada dentro do intervalo de cotas da bacia hidrográfica. Em R um algoritmo como esse pode ser implementado criando-se um vetor com os valores das altitudes às quais serão calculadas as áreas acumuladas, o comprimento desse vetor seria a amplitude altimétrica da bacia dividida em intervalos de 1 m, arredondada para o próximo número inteiro. Com isso as cotas seriam a altitude mínima da bacia, acrescida de 1 em 1 metro até o comprimento calculado para o vetor de cotas. As áreas para cada altitude, seriam o número de píxeis existentes com cotas maiores ou iguais para cada uma das altitudes do vetor de cotas, multiplicada pela área de um único píxel, definida pela resolução do MDE adotado. Ou seja, considerando A_p = área de 1 píxel, H_{max} = amplitude altimétrica máxima da bacia, P_1 a altitude mínima, P_2 a altitude máxima e r o *raster* da bacia, o script em R seria:

```
> comprimento_cotas<-ceiling(Hmax/1)
> for(i in 1:comprimento_cotas){cotas<-c(cotas,cotas[i]+1)}
> r1<-extract(r, c(1:ncell(r)))
```

A seguir são excluídas as células sem valores definidos, “NA”, que correspondem as células que envolvem a bacia hidrográfica delimitada, geradas no recorte do MDE utilizando o *shape* da bacia como camada de máscara.

```
> r2<-na.omit(r1)
```

Conta-se os píxeis menores ou iguais as cotas definidas, H_1 , H_2 , H_3 , ..., H_n , conforme desenho esquemático da figura 21.

```
> num_pixel<-c()
> for(i in 1:length(cotas)){num_pixel[i]<-c(length(r2[r2<=cotas[i]]))}
```

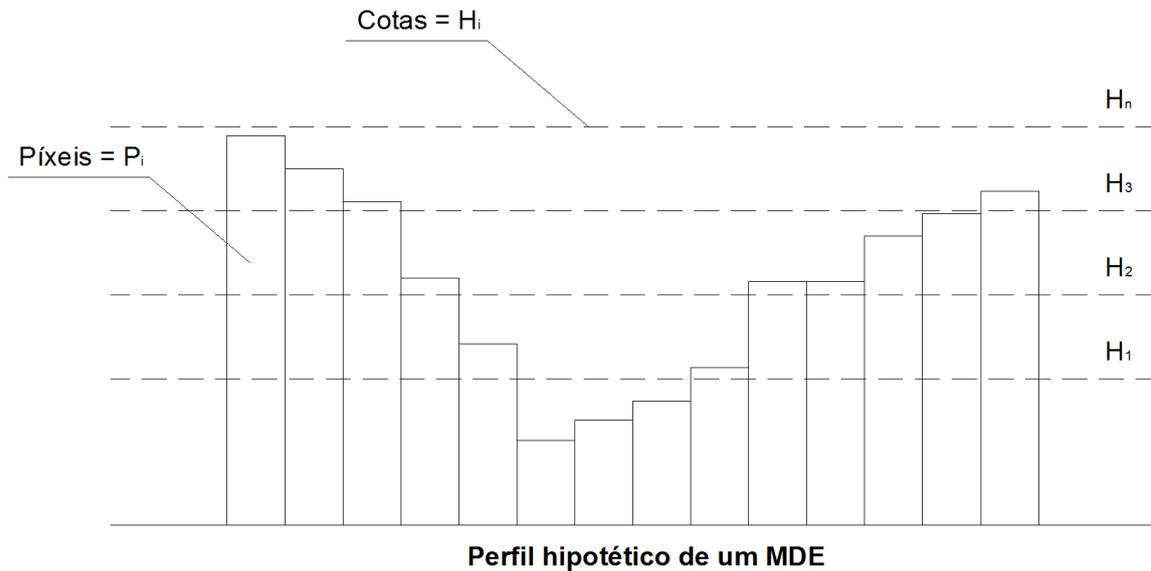
Calcula-se a área de cada píxel e multiplica-se pelo número de células para cada cota.

```
> resolução<-res(r0)
> Ap<-resolução[1]**2
> Areas<-num_pixel*Ap
```

Dos cálculos acima tem-se o vetor “Areas” e o vetor “cotas”, sendo suficientes para

plotar o gráfico “cotas x Areas” referente à curva hipsométrica.

Figura 24 – Desenho esquemático de um perfil hipotético de um MDE, representando as cotas definidas para contagem dos píxeis do MDE menores ou iguais a elas para plotagem da curva hipsométrica.



Fonte: o Autor

4.3.3.9 Dados morfométricos do canal principal

É disponibilizada no relatório da bacia (Anexo B), um quadro contendo a altitude, desnível, distância da nascente, declividade e gradiente de canais para cada segmento que compõe o canal principal da bacia.

O cálculo do índice de gradiente de canais, pode ser realizado de duas maneiras semelhantes. A primeira foi proposta por Hack (1973, apud LIMA, 2013) e deriva da declividade do perfil semilogarítmico do canal principal, sendo mais adequadamente descrita como K, ou seja, como índice de gradiente:

$$K = \frac{dh}{\ln L_2 - \ln L_1} \quad (32)$$

Em que K é o índice de gradiente, dh é a diferença altimétrica entre dois pontos do perfil e $\ln L_2$ e $\ln L_1$ são, respectivamente, os logaritmos da distância da nascente ao ponto final e inicial do trecho considerado.

A segunda é aproximadamente igual ao produto da declividade pela extensão da nascente ao centro do trecho considerado:

$$SL = \frac{dh}{dL} L \quad (33)$$

Lima (2013) orienta que preferencialmente deve-se utilizar o método da equação 32 para o cálculo do índice de gradiente, tanto para os segmentos, quanto para o canal como um todo, mas oferece como alternativa aplicar K para o canal principal e SL para os segmentos, visto que a diferença existente é a nível decimal.

Para a ferramenta proposta, se fosse utilizado K para o cálculo do índice de gradiente para os segmentos, o índice do primeiro segmento não seria calculado ou seria considerado 0, visto que o $\ln L_1$ seria igual a $\ln 0$. Desta forma, o cálculo foi efetuado utilizando-se SL para os segmentos e K para o canal principal.

4.3.3.10 Cálculo dos tempos de concentração

Existem diversas fórmulas empíricas obtidas através de métodos analíticos e experimentais para estimar o tempo de fluxo ao longo da bacia hidrográfica. Cada fórmula tem uma aplicação adequada, podendo ser utilizadas para bacias urbanas ou rurais. Através de pesquisa bibliográfica fez-se o levantamento das diferentes metodologias desenvolvidas para o cálculo do tempo de concentração, sendo selecionadas as que necessitam apenas das características fisiográficas da bacia. (ALMEIDA, ANACHE, *et al.*, 2013)

A partir do estudo de Almeida, Anache, et al. (2013); foram utilizadas para a ferramenta proposta as equações de Corps Engineers, Dooge, Giandotti, Johnstone, Kirpich, Pasini, Pickering, Picking, Vem te Chow e Ventura. Visto que as mesmas dependem unicamente da área da bacia, comprimento e declividade do canal principal (Quadro 11).

Quadro 8 - Equações para estimar o tempo de concentração em horas, a partir de parâmetros físicos.

Nome	Equação	Fonte
Corps Engineers	$T_c = 0,191L^{0,76}S^{-0,19}$	Silveira (2005)
Dooge	$T_c = 0,365 A^{0,41}S^{-0,17}$	Tucci (2004)
Giandotti	$T_c = 0,0559(4,0A^{0,5} + 1,5L)L^{-0,5}S^{-0,5}$	Silveira (2005)
Johnstone	$T_c = 0,462 L^{0,5}S^{-0,25}$	Tucci (2005)
Kirpich	$T_c = 0,0663 L^{0,77}S^{-0,385}$	Kirpich (1940)
Pasini	$T_c = 0,107A^{0,333}L^{0,333}S^{-0,5}$	Lo Bosco <i>et al.</i> (2002)
Pickering	$T_c = \left(\frac{0,871 L^3}{H}\right)^{0,385}$	Mata Lima <i>et al.</i> (2007)
Picking	$T_c = 0,0883 L^{0,667}S^{-0,333}$	Silveira (2005)
Vente Chow	$T_c = 0,160 L^{0,64}S^{-0,32}$	Silveira (2005)
Ventura	$T_c = 0,127 A^{0,5}S^{-0,5}$	Silveira (2005)

Fonte: Almeida, Anache, *et al.* (2013)

4.3.3.11 Produtos gerados

Além do relatório final em pdf, todos os produtos gerados com o processamento ficam armazenados na pasta output do programa, na tabela abaixo estão listados todos os arquivos gerados com o processamento.

Quadro 9 - Arquivos gerados no processamento da ferramenta, disponíveis na pasta output.

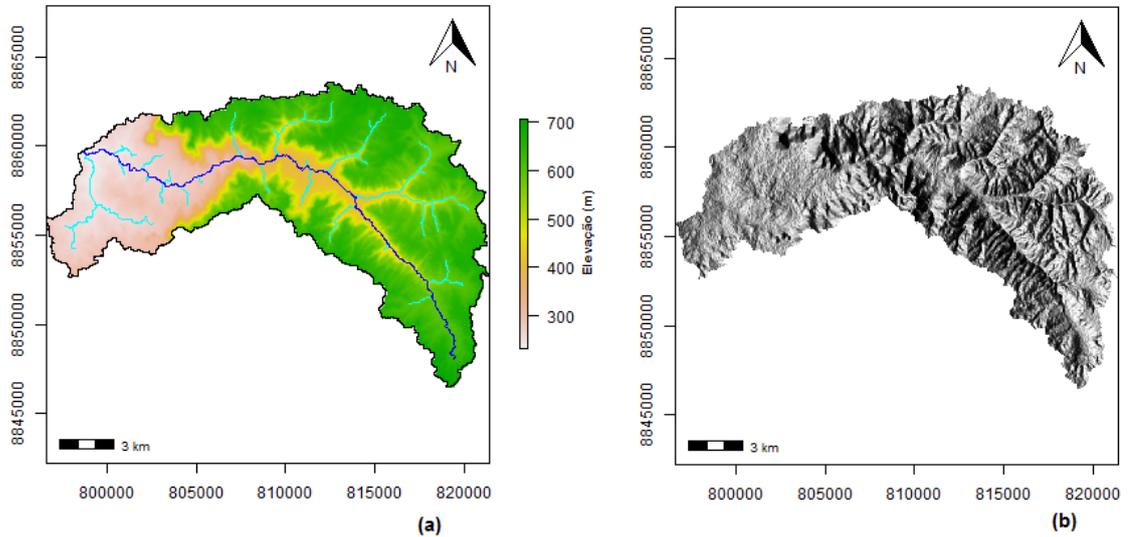
Item	Nome do arquivo	Descrição
01	aspecto.sdat	Raster do aspecto da bacia
02	aspecto.png	Mapa do aspecto da bacia
03	canal_principal.shp	Shape do canal principal da bacia
04	Caracteristica_morfometrica.csv	Arquivo de texto com a relação das características morfométricas calculadas
05	Curva_hipsometrica.png	Gráfico da curva hipsométrica

Item	Nome do arquivo	Descrição
06	declividade.sdat	Raster de declividade da bacia
07	declividade.png	Mapa de declividade da bacia
08	divisores.shp	Shape dos divisores que delimitam a bacia
09	drenagem.shp	Shape da rede de drenagem
10	Mapa_da_bacia.png	Mapa de elevação da bacia
11	nos.shp	Shape de pontos com todos as junções da rede de drenagem
12	nos_principais.chp	Shape de pontos com todas as junções do canal principal
13	Perfil_canal.png	Gráfico do perfil longitudinal do canal com as linhas de inclinação média, aparente e equivalente
15	recorte_bacia.sdat	Raster de elevação da bacia
16	Sombreado.png	Mapa do relevo sombreado da bacia

Fonte: o Autor.

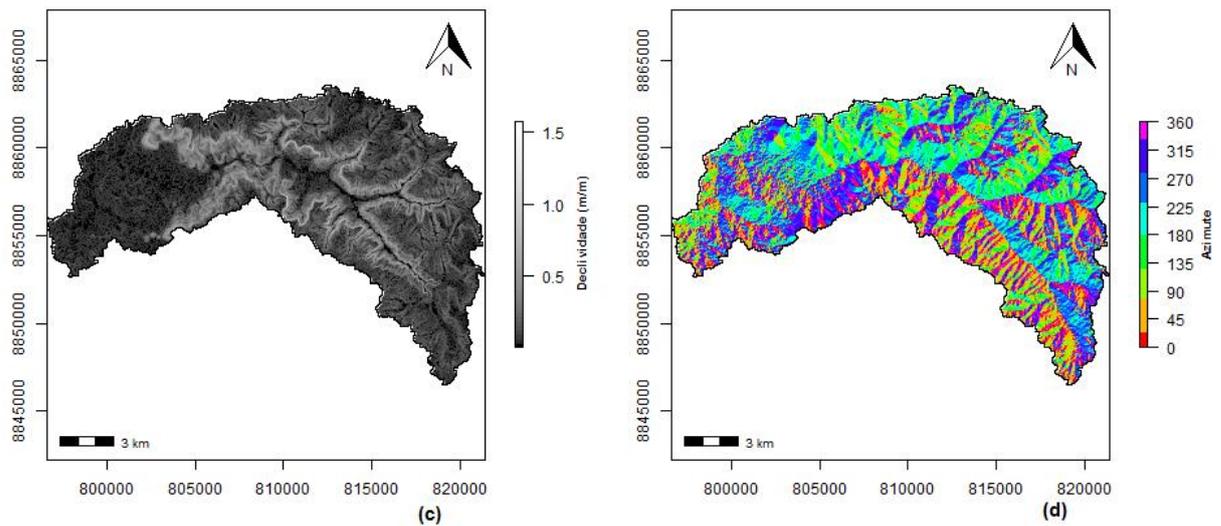
Nas figuras 25, 26 e 27 estão presentes alguns exemplos dos mapas de elevação (a), relevo sombreado (b), declividade (c), direção de fluxo (d), curva hipsométrica (e) e perfil longitudinal do canal principal e inclinações (f) gerados no processamento de uma sub-bacia do ribeirão Taquarussuzinho.

Figura 25 - (a) Mapa de elevação e (b) relevo sombreado de uma sub-bacia do Ribeirão Taquarussuzinho em Palmas-TO, gerados automaticamente pela ferramenta proposta.



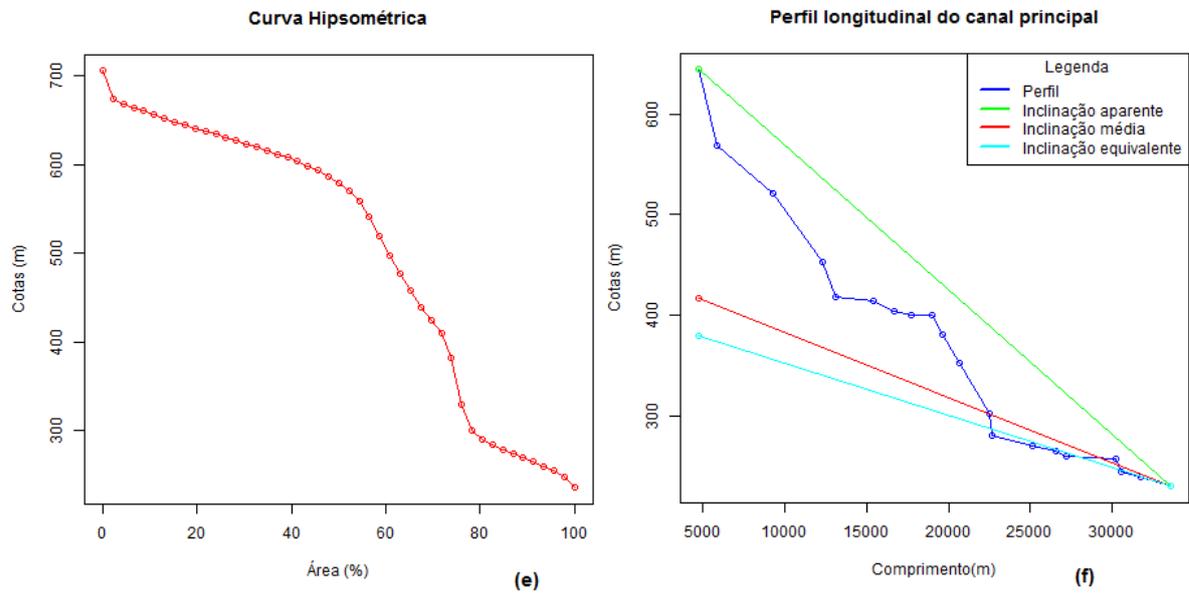
Fonte: o Autor.

Figura 26 - (c) Mapa de declividade e (d) direção de fluxo de uma sub-bacia do Ribeirão Taquarussuzinho em Palmas-TO, gerados automaticamente pela ferramenta proposta.



Fonte: a Autor.

Figura 27 - (e) Curva hipsométrica e (d) perfil longitudinal do terreno e inclinações aparente, média e equivalente do canal principal de uma sub-bacia do Ribeirão Taquarussuzinho em Palmas-TO, gerados automaticamente pela ferramenta proposta.



Fonte: o Autor.

5 VERSÃO WEB

Uma aplicação web, pode ser considerada um sistema de informação baseado em tecnologia web, esta tecnologia inclui browsers, servidores web, linguagens de programação Web e protocolos de comunicação, em específico os Protocolos de Transferência de Hipertexto (HTTP) que viabilizam o funcionamento dos sistemas de informações através da web. Como resultado, algumas das interfaces e produtos gerados são acessados por meio de um navegador (browser). (PERONDI, ROSA, *et al.*, 2015; ZAUPA, GIMENES, *et al.*, 2007)

Como demonstrado no capítulo anterior, todos os cálculos da ferramenta proposta, são executados a partir da linguagem R, por meio do script *BaciaRcode.R* (Apêndice D). Os scripts elaborados em R podem ser adaptados para que sejam executados em uma aplicação web, utilizando para isso o pacote *Shiny*, que é uma ferramenta *open source* também desenvolvida pela RStudio que permite interfacear R com um navegador web, combinando o código R com o código HTML/JavaScript com recursos pré-construídos (RESNIZKY, 2015). A aplicação web elaborada com *Shiny*, pode ser compartilhada publicamente na internet, através do programa *Shiny Server* que permite executar um servidor Linux (BEELEY, 2013). As tecnologias e recursos utilizados no desenvolvimento da aplicação podem ser verificados no quadro 10.

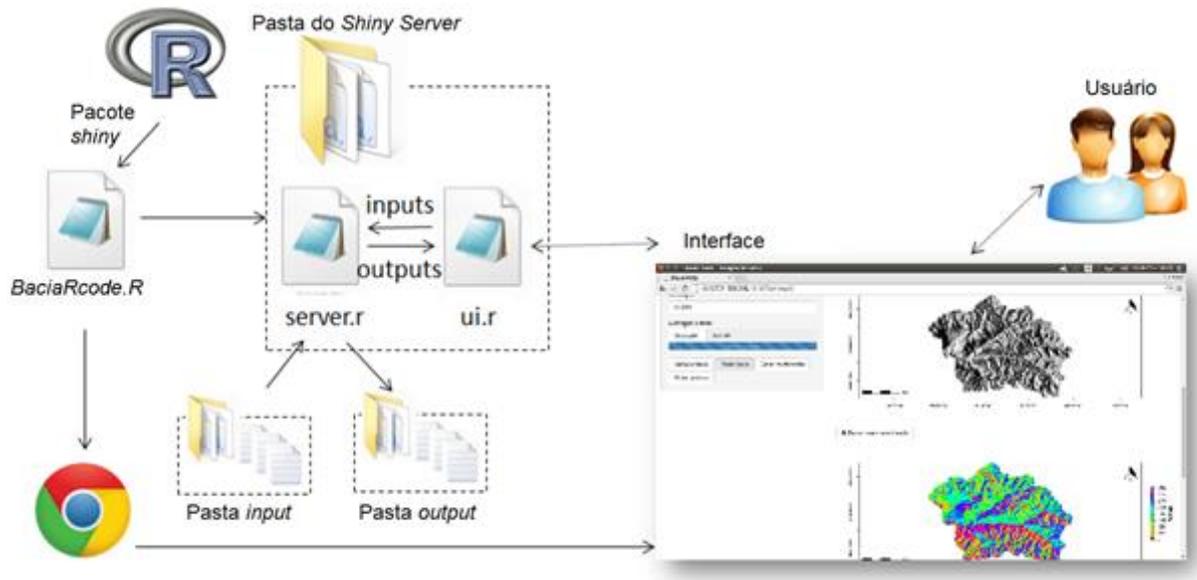
Quadro 10 – Tecnologias e recursos utilizados para desenvolvimento da aplicação web.

Tipo de recurso	Recurso	Detalhes	Versão
Linguagem de programação	R	http://cran.r-project.org	3.4.3
Tecnologias do lado do cliente	Shiny	http://shiny.rstudio.com	1.0.5
		http://cran.r-project.org/web/packages/shiny	
Servidor web	Shiny Server Open Source	http://www.rstudio.com/products/shiny	1.5.6.875
Ferramentas de desenvolvimento	Sublime Text	http://www.sublimetext.com	3114
	Rstudio desktop	http://www.rstudio.com	1.1.423

Para o funcionamento de uma aplicação *shiny* é necessário dividir o código em R em dois outros scripts, que são mantidos dentro de uma pasta específica para acesso do *Shiny Server*. Estes dois arquivos devem ser nomeados como *ui.R* e *server.R*. o script *ui.R*, estão presentes os comandos necessários para definir a forma da interface para interação do usuário com as entradas e saídas do programa, o script *server.R* irá executar os mesmos comandos definidos *BaciaRcode.R*, só que agora utilizando reativamente as entradas do usuário via

interface gráfica. Para melhor entendimento do funcionamento de uma aplicação web elaborada a partir de *Shiny*, deve-se observar a figura 28:

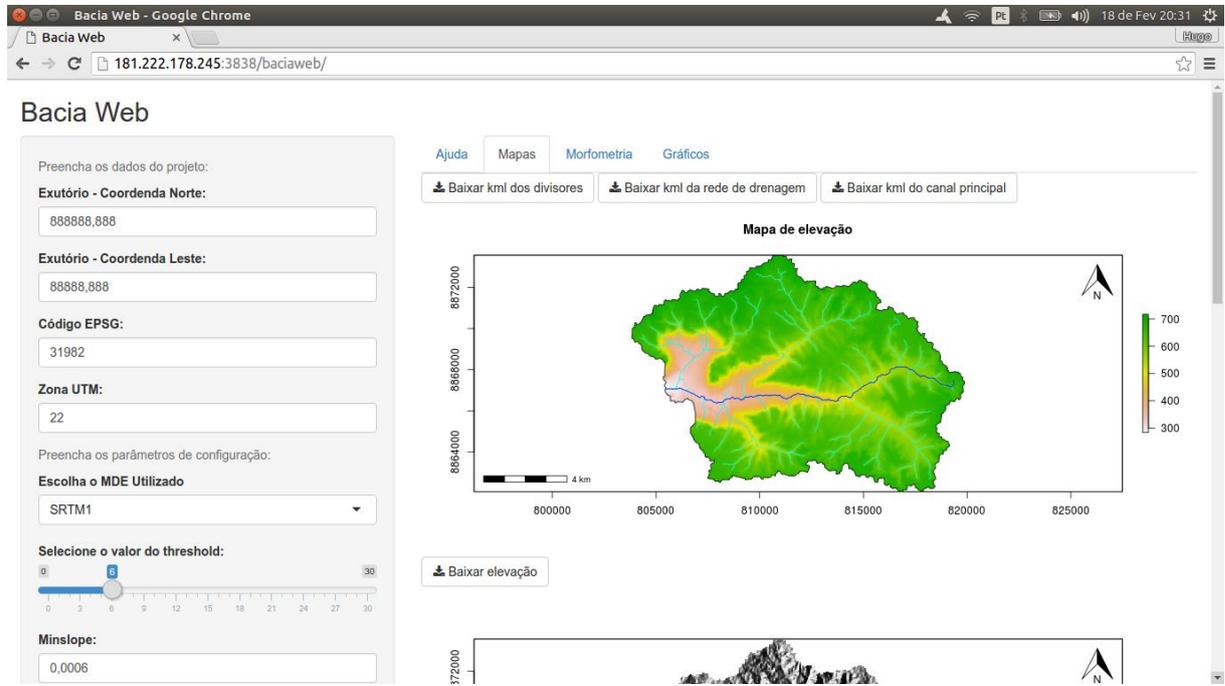
Figura 28 – Fluxo de funcionamento de uma aplicação web construída a partir de R e Shiny.



Fonte: adaptado de Vu (2015).

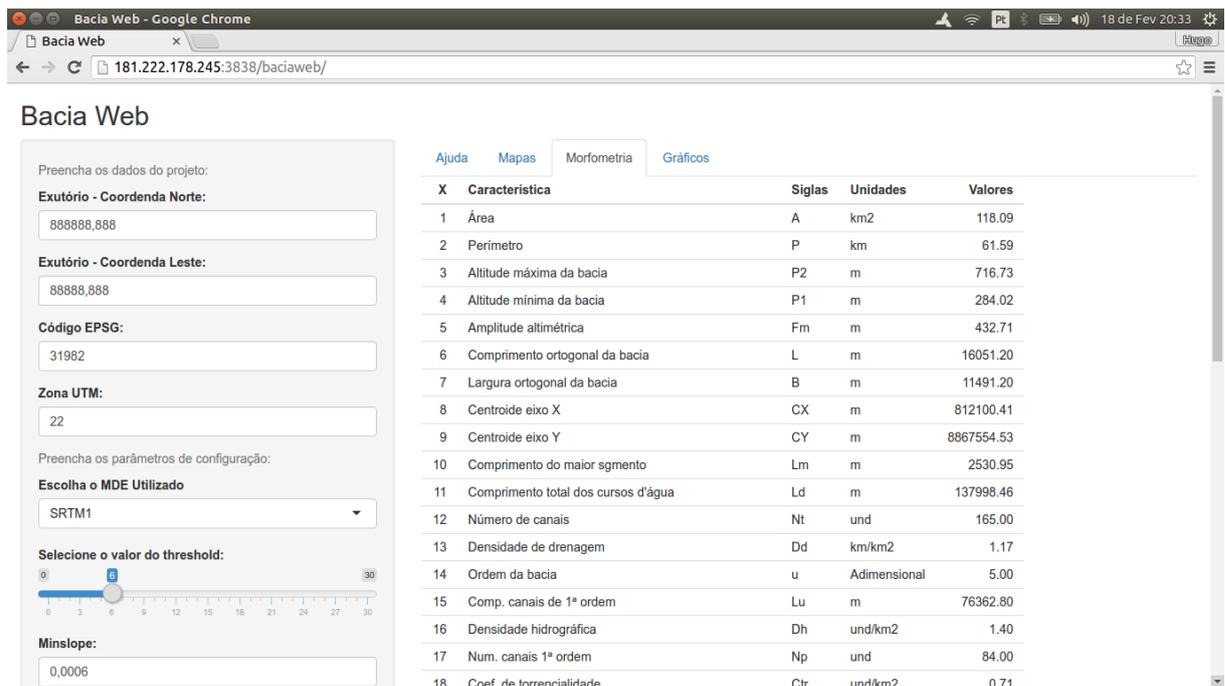
Nessa versão web, foram incrementadas praticamente todas as funções da versão desktop apresentada no capítulo anterior, com exceção do relatório da bacia em pdf. A interface foi dividida em duas colunas, na coluna lateral esquerda foram colocados os *widgates* para entradas dos dados fornecidos pelo usuário, além dos *action buttons* para iniciar o processamento da bacia; plotagem dos mapas de elevação, relevo sombreado, aspecto e declividade; gerar as tabelas com os resultados dos cálculos e os gráficos da curva hisométrica e perfil longitudinal do canal principal. A segunda coluna foi dividida em quatro abas, para a exibição dos mapas (figura 29), tabelas (figura 30) e gráficos (figura 31), existe também uma aba com conteúdo de ajuda. Foi incrementada na interface, *action buttons* para que o usuário possa baixar os produtos gerados, dentre eles, os arquivos kml da bacia, rede de drenagem e canal principal. A interface da aplicação acessada via web pode ser verificada nas figuras 29, 30, 31 e 32.

Figura 29 – Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os *widgates* de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição dos mapas de elevação, relevo sombreado, aspecto e declividade. Note logo acima na coluna à direita os *action buttons* para que o usuário possa baixar os arquivos vetoriais da bacia e rede de drenagem.



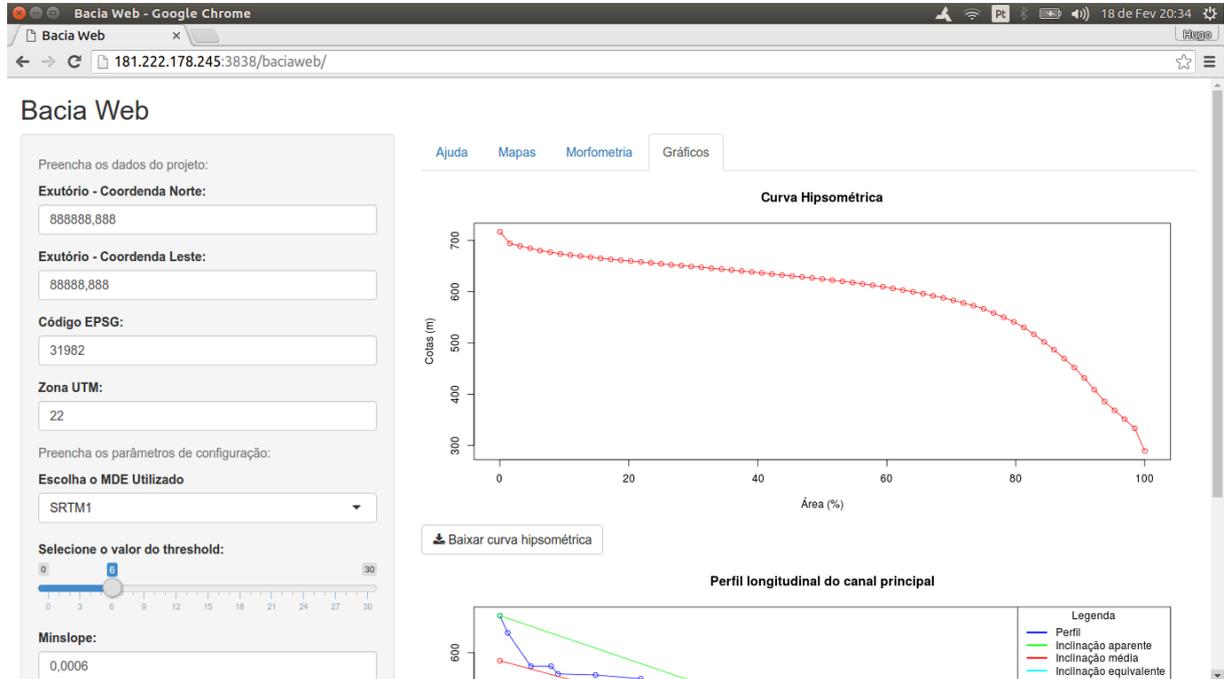
Fonte: o Autor.

Figura 30 - Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os *widgates* de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição com a tabela com as características morfométricas calculadas.



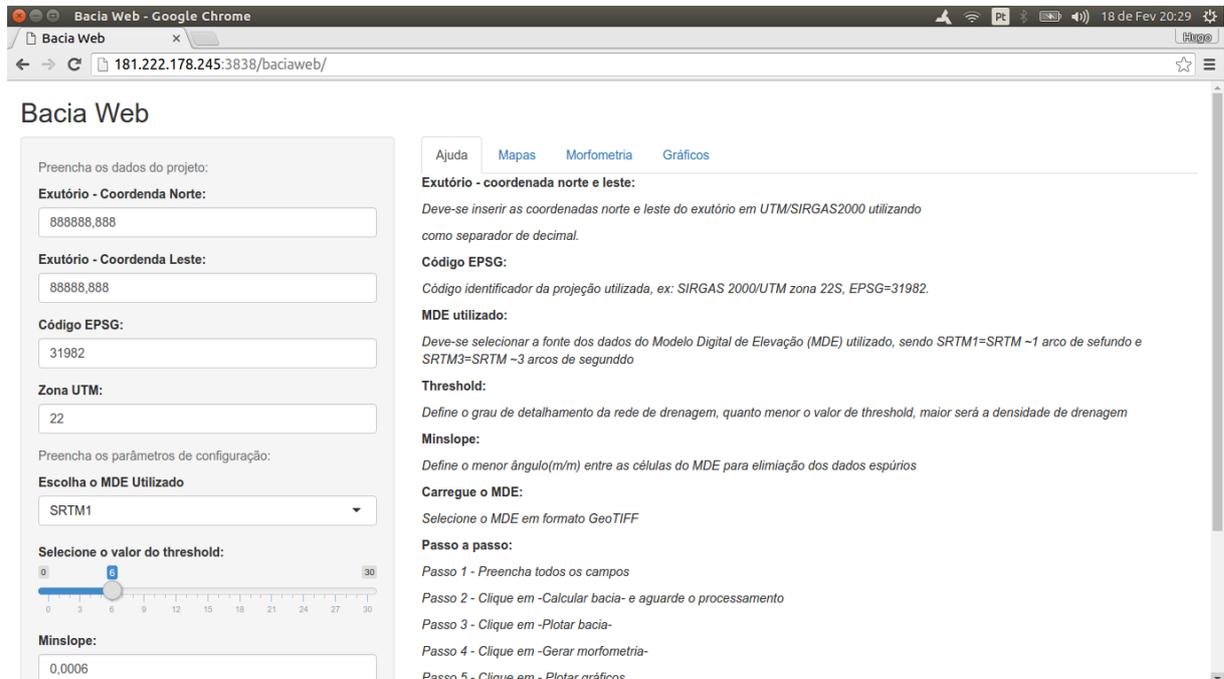
Fonte: o Autor.

Figura 31 - Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os widgets de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição com a curva hipsométrica e o gráfico do perfil longitudinal do canal principal.



Fonte: o Autor.

Figura 32 - Interface da aplicação, visível ao usuário via web. Na coluna à esquerda, pode-se verificar os widgets de interação com o usuário, na coluna à direita verifica-se a aba de exibição com o conteúdo de ajuda.



Fonte: o Autor.

6 AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA E RESULTADOS

Para realizar a avaliação da ferramenta proposta, foi feito um estudo de caso comparativo em quatro sub-bacias com relevo distinto, utilizando o programa elaborado e também a extensão *r.basin* do software já consolidado Grass GIS. Os resultados foram confrontados e serão avaliados os seguintes aspectos: diferenças entre os resultados, número de características morfométricas obtidas de forma automática e gráficos gerados automaticamente.

Para isso serão realizadas as seguintes etapas:

- i. Validação dos MDE's
 - a) Coleta de pontos de controle no SIGEF;
 - b) Verificação quanto ao Erro Médio Quadrático;
 - c) Verificação quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfico-vertical;
 - d) Verificação quanto a existência de tendências
- ii. Escolha do MDE mais adequado ao processamento;
- iii. Delimitação e caracterização morfométrica das bacias pela ferramenta proposta e GrassGIS;
- iv. Comparação dos resultados.
- v. Comparação dos resultados obtidos pela ferramenta proposta para diferentes MDE's.

6.1 Área de estudo

Para realização deste estudo, foram tomadas como exemplo quatro bacias com característica de relevo diferentes. Sendo adotadas a sub-bacia do ribeirão Taquarussu situada no município de Palmas-TO; a sub-bacia do ribeirão dos Mangues, sua foz está situada no município de Porto Nacional-TO; a sub-bacia do ribeirão Curicaca entre os municípios de Palmeiras do Tocantins e Darcinópolis-TO e a sub-bacia do Rio Soninho situada entre os municípios de Mateiros e São Felix do Tocantins. A localização da área de estudo está representada na figura 33.

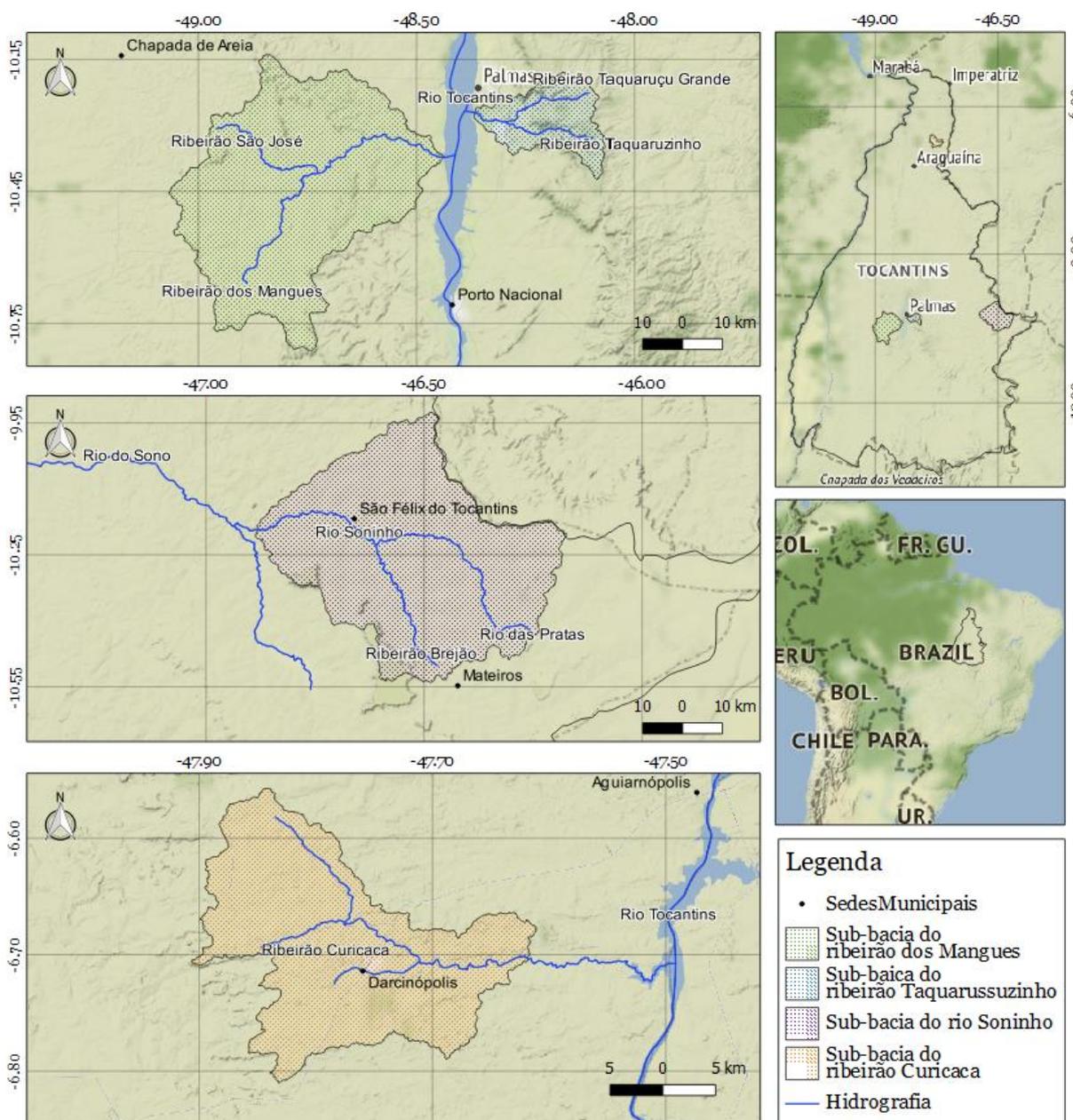
A sub-bacia do ribeirão Taquarussu está localizada entre a Serra do Lajeado e o Rio Tocantins hoje represado e formando o lago da UHE Luís Eduardo Magalhães. Está inserida na área de proteção ambiental – APA Serra do Lajeado, zona Amortecimento do Parque Estadual do Lajeado. É formada pelo ribeirão Taquarussu Grande, Córrego Machado e Córrego Buritizal e pela margem direita os Córregos Macacão e Tiúba, são afluentes diretos do rio Tocantins. Abrange uma área de cerca de 448 km². (CHAVES, NETO; 2009)

A sub-bacia do ribeirão dos Mangues está situada à margem esquerda do Rio Tocantins e tem como foz o lago da UHE Luís Eduardo Magalhães. Situa-se em região de relevo menos dissecado, o que a faz abranger uma área maior, pertencente a cinco municípios do estado do Tocantins: Porto Nacional, Paraíso do Tocantins, Pugmil, Nova Rosalândia e Oliveira de Fátima. Abrange uma área de cerca de 2807 km².

A sub-bacia do Ribeirão Curicaca está situada na região do Bico do Papagaio à margem esquerda do Rio Tocantins e tem como foz o lago da Usina Hidrelétrica Estreito (UHE Estreito), que está na divisa dos Estados do Maranhão e Tocantins. É formada pelos Córregos Regalo, Ribeira e Grota Formosa. Abrange uma área de cerca de 437 km².

A sub-bacia do Rio Soninho está situada no Parque Estadual do Jalapão no Tocantins, delimitada ao norte pelo Parque Estadual do Rio Parnaíba na divisa entre o Tocantins e o Maranhão. É formada pelo Rio das Pratas e pelo Ribeirão Brejão. Abrange uma área de cerca de 3019 km².

Figura 33: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: o Autor.

6.2 Coleta de pontos de controle no SIGEF

Esta etapa se faz necessário, com o objetivo de escolher o melhor MDE disponível, para representar de forma mais fiel possível o relevo das regiões em estudo, e com isso poder ser considerado um Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente a ponto de permitir a correta simulação de processos hidrológicos. Por isso, antes da utilização do modelo, este deve passar por processos de validação a fim de certificar sua relação com o relevo da região.

Para isso, Poletto et al (2008) orienta a coleta de pontos de altitude amostrais em campo por meio de receptor GNSS.

A precisão vertical do MDE é estimada através de uma comparação entre pontos de altitudes do MDE, contrastados com pontos de verificação (aqui serão chamados de pontos de controle) com altitudes reais. Estas comparações servirão para calcular o erro médio quadrático (EMQ) entre as altitudes. A estimativa dos erros em MDE's, geralmente é feito seguindo as recomendações do *United States Geological Survey* – USGS de um número mínimo de 28 pontos de controle por MDE's de até 1 x 1 grau (USGS, 1993; USGS, 1998; CUARTERO, FELICÍSIMO e ARIZA, 2015; HAMEID, BANNARI e KADHEM , 2016). Merchante (1982) apud Souza e Loch (2008) sugere no mínimo 20 pontos para realização de testes estatísticos de qualidade geométrica de um produto cartográfico.

No entanto, Cuartero et al. (2015) e Hameid et al. (2016) mostrou que o número de pontos interfere na confiabilidade da maioria dos testes estatísticos. A expressão que relaciona a confiabilidade ao número de pontos de controle pode ser verificada na equação 34. Dessa forma, caso pretenda-se um valor de confiança em torno de 90 % serão suficientes 31 pontos de controle, se fossem usados 100 pontos de controle, a confiança subiria para 95%. Neste trabalho foram utilizados um número (n) de 31 pontos de controle para cada área estudada, portanto superior ao aconselhado pelo USGS, estando ainda de acordo com a metodologia de Poletto et al. (2008) onde é definido para o teste de tendência um nível de confiança (1 - α) igual a 90% ($\alpha = 0,10$).

$$N_c = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}} \right) \times 100 \quad (314)$$

Sendo N_c o nível de confiança pretendido e n o número de pontos de controle (CUARTERO, FELICÍSIMO e ARIZA, 2015).

Os pontos de controle preferencialmente devem ser obtidos através de fontes primárias, oriundos de receptor GPS geodésico. No entanto o deslocamento de equipamentos e profissionais a campo para coleta de dados altimétricos é relativamente cara. Dessa forma existe como alternativa a utilização de dados altimétricos dos vértices dos georreferenciamentos de imóveis rurais disponíveis no SIGEF – Sistema de Gestão Fundiária, através do site <https://sigef.incra.gov.br/>.

Grande parte dos dados altimétricos do SIGEF, têm precisão vertical muito próxima da realidade. Conforme Borges Junior (2017) a legislação brasileira pertinente ao assunto, define limites para erros nos cálculos de áreas para a certificação de imóveis rurais. E conforme SIGEF (2017) “os valores de altitude ou altura elipsoidal (h) dos vértices interferem no valor de área, dado o método utilizado no cálculo. Quanto mais próximos do valor real, mais próximo da realidade será o valor de área”.

A legislação regimentada por INCRA (2013) estabelece a precisão posicional para vértices situados em limites artificiais de apenas 0,5 m trazendo consigo a precisão vertical. Conforme Ishikawa (2007) para a realização de georreferenciamentos, são necessários equipamentos de elevada tecnologia, em busca da maior precisão dos dados coletados como é o caso do GNSS. No estudo de Prina e Trentin (2015) foi observado a precisão vertical de pontos coletados a partir dos Sistema GNSS, resultando em precisões de 11,8 e 14,6 cm na vertical.

6.2.1 Sobre o SIGEF

“O Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) é uma ferramenta eletrônica desenvolvida pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e pelo antigo Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) para subsidiar a governança fundiária do território nacional”. É no SIGEF que é feita a certificação dos dados referentes aos limites dos imóveis rurais. Dentre suas funcionalidades está o acesso público das parcelas certificadas, o que se apresenta como uma importante fonte de dados para validação hidrológica de modelos digitais de elevação. (SIGEF, 2017)

Através do site <http://acervofundiario.incra.gov.br>, mantido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, é possível baixar arquivos em *shapefile* dos polígonos dos imóveis certificados. Conforme SIGEF (2017), o Estado do Tocantins tem 95.714,60 km² de imóveis certificados pelo SIGEF, o que corresponde a uma cobertura de 34,5 % do território. Em relação ao número de vértices dos polígonos certificados pelo SIGEF para o estado do Tocantins, foram contabilizados com auxílio do software QGIS, um total de 1.896.897 vértices, implicando em 6,83 vértices por km².

Para efeito de comparação, todos os estados da região Sudeste do País apresentam percentual coberto de imóveis certificados pelo SIGEF menor que o do Tocantins, o mesmo

ocorre para o número de pontos por km². Nos mapas das figuras 34 e 35 estão representados os imóveis certificados pelo SIGEF para a região Sudeste e estado do Tocantins respectivamente. Na tabela 7 estão representados os percentuais de cobertura das áreas de imóveis certificados pelo SIGEF em relação à área territorial oficial das Unidades da Federação também da Região Sudeste. Na tabela 8 foi feita a relação entre o número de vértices dos polígonos dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das unidades da federação. A área oficial das Unidades da Federação foi obtida em IBGE (2017).

Tabela 7 - Relação entre a área dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das Unidades da Federação da região Sudeste do Brasil.

UF	Área total SIGEF (km ²)		Área total UF (km ²)	% Coberto
	Particular	Público		
São Paulo	40916,25	172,69	248219,63	17%
Minas Gerais	94164,89	353,94	586520,73	16%
Rio de janeiro	2933,51	0,00	43781,59	7%
Espírito Santo	2905,24	52,33	46086,91	6%
Total	140919,90	578,96	924608,85	15%

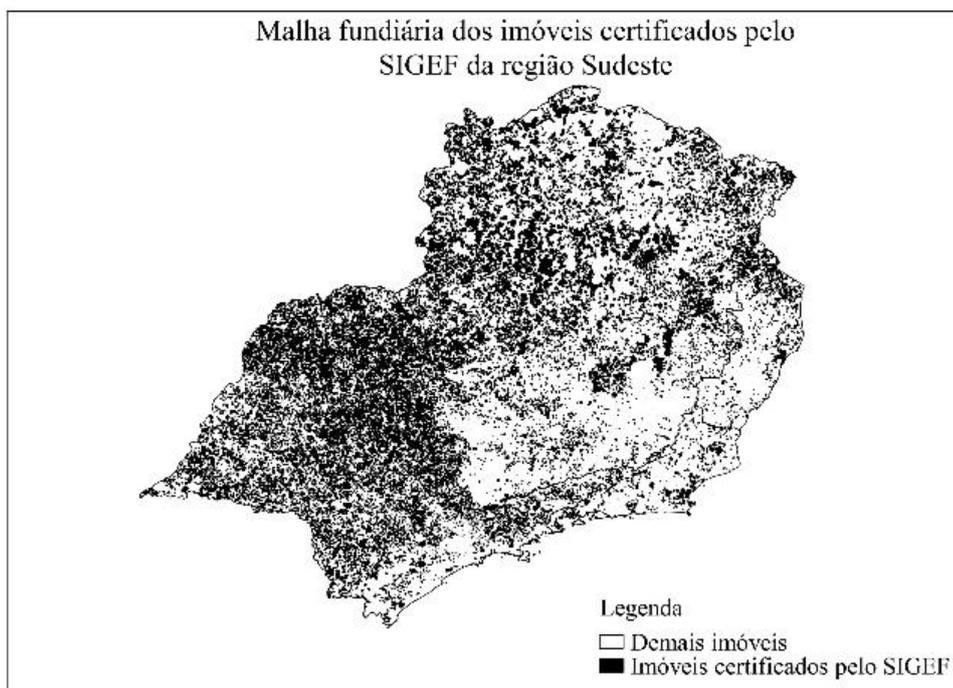
Fonte: o Autor.

Tabela 8 - Relação entre o número de vértices dos polígonos dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das Unidades da Federação da região Sudeste do Brasil.

UF	Num. vértices SIGEF (km ²)		Área total UF (km ²)	Pontos/km ²
	Particular	Público		
São Paulo	2070625	5378	248219,63	8,36
Minas Gerais	3182434	24501	586520,73	5,47
Rio de janeiro	118757	0	43781,59	2,71
Espírito Santo	82424	4171	46086,91	1,88
Total	5454240	34050	924608,85	5,94

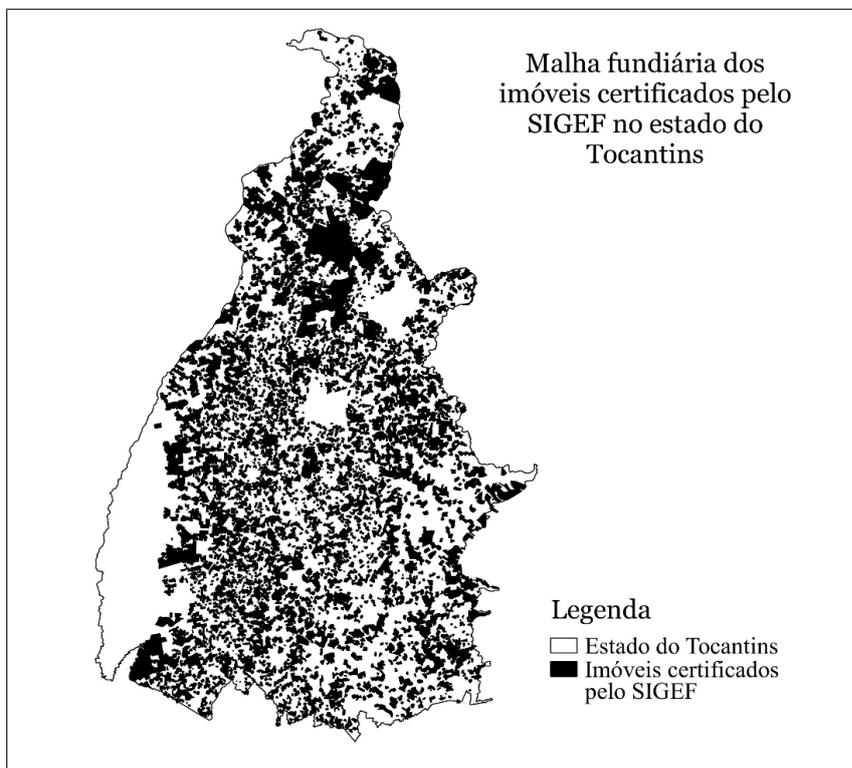
Fonte: o Autor.

Figura 34 - Representação da malha fundiária dos imóveis certificados pelo SIGEF da região Sudeste.



Fonte: o Autor;
Fonte dos dados: SIGEF (2017).

Figura 35 - Representação da malha fundiária dos imóveis certificados pelo SIGEF no estado do Tocantins.



Fonte: o Autor;
Fonte dos dados: SIGEF (2017).

6.2.2 Modelos digitais de elevação utilizados

Para este trabalho foram utilizados os principais modelos digitais de elevação globais (gratuitos) derivados de técnicas de sensoriamento remoto, sendo: o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) os produtos do TOPODATA disponibilizados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e ASTER GEDEM (*Global Digital Elevation Model*), os MDE's ASTER estão disponíveis gratuitamente no em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. As cartas dos MDE's utilizadas estão relacionadas no quadro 11.

Quadro 11 - Relação dos MDE's utilizados por bacia.

MDE	Bacia			
	Taquarussu	Mangues	Curicaca	Soninho
SRTM1	s11_w049_1arc_v3	s11_w049_1arc_v3 s11_w050_1arc_v3	s07_w048_1arc_v3	s10_w047_1arc_v3 s11_w047_1arc_v3
SRTM3	SC-22-Z-B	SC-22-Z-B	SB-23-Y-A	SC-23-V-C SC-23-V-D SC-23-Y-A SC-23-Y-B
TOPODATA	10S495ZN	10S495ZN	06S48ZN	09S48ZN 09S465ZN 10S48ZN 10S465ZN
ASTER	ASTGTM2_S11W049	ASTGTM2_S11W049 ASTGTM2_S11W050	ASTGTM2_S07W048	ASTGTM2_S10W047 ASTGTM2_S11W047

Fonte: o Autor.

6.2.3 Metodologia adotada para coleta dos pontos de controle pelo SIGEF

Para a coleta dos pontos de controle através do SIGEF, deve-se considerar atributos dos polígonos dos imóveis rurais cadastrados no SIGEF. Os polígonos estão disponíveis em <http://acervofundiario.incra.gov.br> e podem ser baixados em arquivo *shape* contendo a tabela de atributos com os dados necessários para realizar a pesquisa das parcelas no SIGEF. Mais informações de como consultar parcelas no SIGEF, podem ser encontradas no Manual do SIGEF, disponível em <http://sigef.incra.gov.br/documentos/manual/>.

Neste trabalho, utilizou-se o software QGIS para visualizar as parcelas rurais pertencentes às sub-bacias em estudo e a tabela de atributos. (QGIS *Development Team*, 2018)

No SIGEF estão disponíveis as coordenadas dos vértices bem como sua altitude elipsoidal (h). No entanto a altitude dos MDE's, tratam-se de altitudes ortométricas (H), neste caso foi preciso converter as altitudes coletadas do SIGEF, utilizando a seguinte expressão:

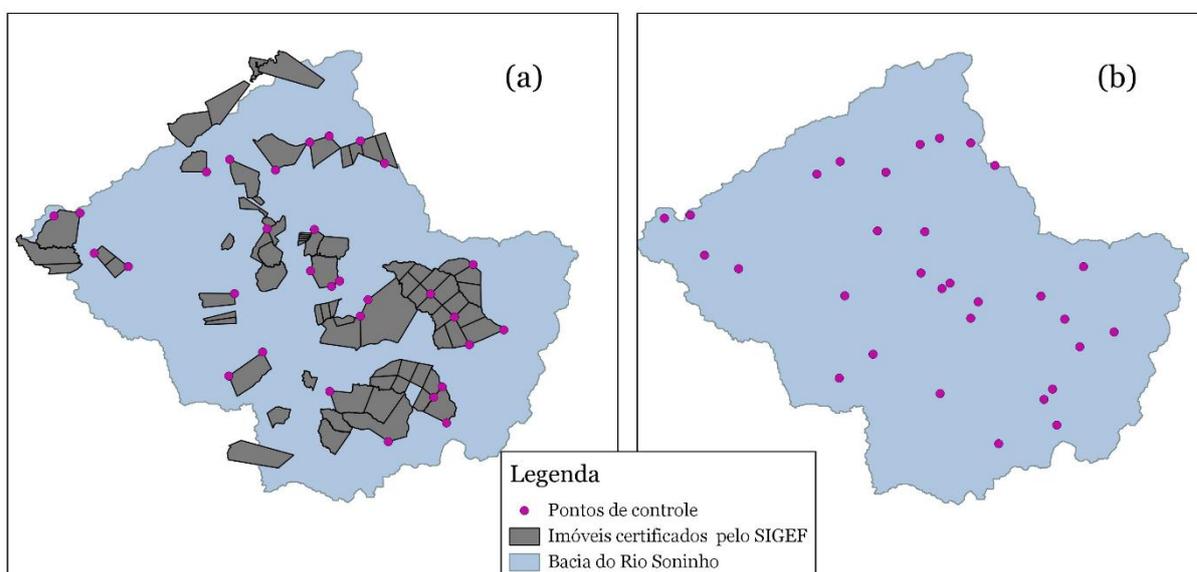
$$H = h - N \quad (325)$$

Onde N é o valor da altura geoidal obtida através do modelo de ondulação geoidal, MAPGEO 2015. Para isso utilizou-se do Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal MAPGEO 2015 – Versão 1.0 do IBGE.

Para seleção da localização dos pontos de controle, deve-se atentar para alguns critérios, são eles: (a) dar preferência por pontos em locais de maior altitude, (b) evitar pontos onde ocorre mudança abrupta de altitude e (c) distribuir os pontos da forma mais homogênea possível na área de estudo. (SANTOS et al. 2003 apud SOUZA e LOCH, 2008)

Optou-se por coletar pontos de controle de forma que abrangessem uniformemente as áreas das sub-bacias, observando que no caso de coleta dos vértices do SIGEF, deve-se dar preferência pelos limites artificiais dos imóveis, pois em locais de limites naturais existe a probabilidade de o modelo estar representando altitudes de feições de vegetação. Como exemplo, na figura 36 pode-se observar os imóveis certificados pelo SIGEF, pertencentes à sub-bacia do ribeirão Soninho (a) e a distribuição dos pontos de controle realizada (b).

Figura 36 - (a) Imóveis certificados pelo SIGEF pertencentes à bacia do Rio Soninho, (b) distribuição dos pontos de controle adotados para validação dos MDE's.



Fonte: o Autor.

Fonte dos dados: SIGEF (2017).

No SIGEF alguns Responsáveis Técnicos (RT's) alimentam a planilha de georreferenciamento com as coordenadas dos vértices na forma de graus, minutos e segundos, sendo necessário sua conversão para graus decimais e posteriormente importar os pontos de controle para o QGIS. Para isso utilizou-se de planilha eletrônica.

Na tabela da figura 37 é possível notar que é informado na planilha de georreferenciamento o preenchimento da coluna “Sigma altitude (m)” que é referente a precisão vertical do vértice que deve ser levado em consideração para coleta dos pontos de controle. A planilha de georreferenciamento está disponível em formato *csv* no portal do SIGEF, nessa planilha é especificado para cada vértice o método de posicionamento utilizado, se é obtido através de posicionamento relativo estático (PG) ou através algum método analítico (PA) como intersecção de retas ou *off sets*, nesse caso é mais prudente a coleta de vértices oriundos de posicionamento relativo estático, onde não haverá margem para erros de cálculo (INCRA, 2013).

Figura 37 - Exemplo da disposição dos dados dos vértices das parcelas no SIGEF.

Vértices da parcela						
Código	Longitude	Sigma Long. (m)	Latitude	Sigma Lat. (m)	Altitude (m)	Sigma Altitude (m)
VIMA-M-0064	-49°22'18,110"	0,01	-10°01'39,156"	0,01	184,905	0,02
VIMA-M-0063	-49°22'15,691"	0,01	-10°02'08,626"	0,01	211,942	0,01
VIMA-M-0062	-49°22'12,944"	0,01	-10°02'44,027"	0,01	188,151	0,02
VIMA-M-0061	-49°22'12,714"	0,01	-10°02'44,023"	0,01	188,127	0,02
VIMA-M-0036	-49°21'07,952"	0,01	-10°02'38,752"	0,01	209,971	0,02
VIMA-M-0065	-49°21'12,156"	0,05	-10°01'34,412"	0,02	199,423	0,03

Fonte: SIGEF (2017)

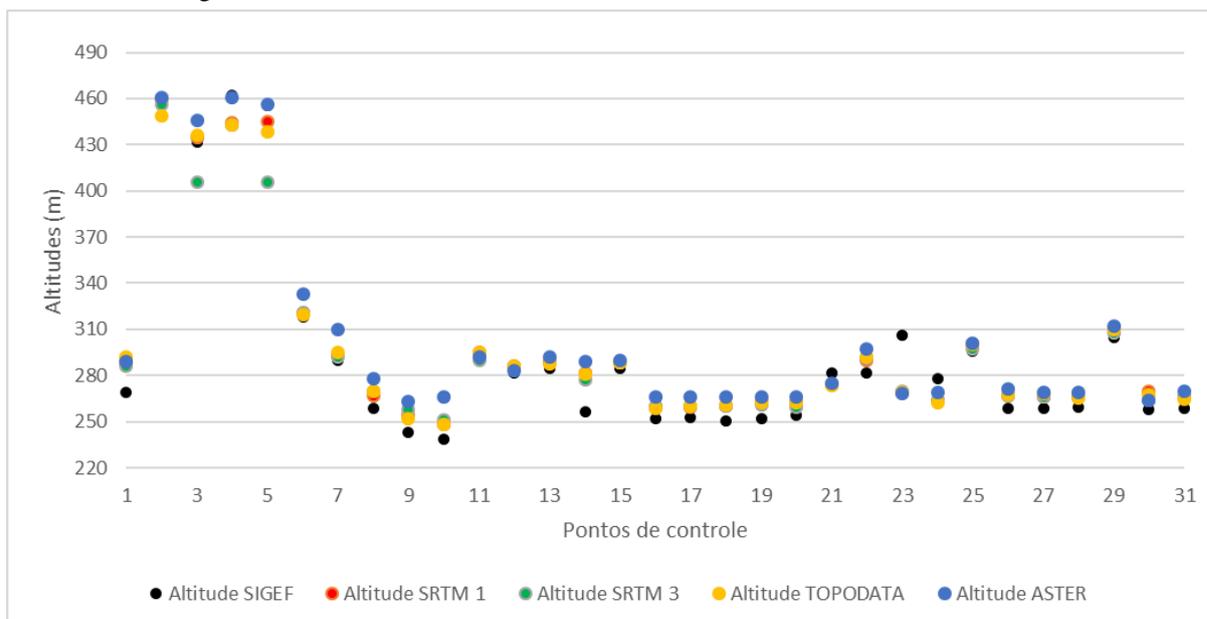
6.2.4 Escolha dos MDE's mais adequados para o estudo de caso

Nos gráficos 01, 02, 03 e 04 estão presentes as amplitudes entre os valores das altitudes dos pontos de controle e as altitudes informadas nos MDE's: SRTM 1, SRTM 3, TOPODATA e ASTER GEDEM. Observa-se que não há equivalência entre as altitudes, constatando-se amplitudes entre as altitudes de até 50 m para o ponto de controle n° 3 da sub-bacia do ribeirão dos Mangues entre os MDE's ASTER e SRTM3. Porém atribui-se que essa diferença está relacionada às dimensões das células de aproximadamente 90x90 m do SRTM3, ampliando a possibilidade de haver variação no relevo entre o local do ponto de controle e do centro do pixel da imagem SRTM3. Situações análogas foram observadas no ponto 3 da bacia do ribeirão dos Mangues e no ponto 7 da sub-bacia do ribeirão Taquarussu.

Observa-se nos gráficos que alguns pontos de controle apresentam diferenças significativas em relação aos diferentes MDE's. Como o visto nos pontos 14 e 23 do gráfico 01, nos pontos 13 e 14 do gráfico 3 e nos pontos 9 e 16 do gráfico 4. A princípio as altitudes obtidas através do SIGEF são mais precisas, pois admitem a altitude exata do terreno, porém

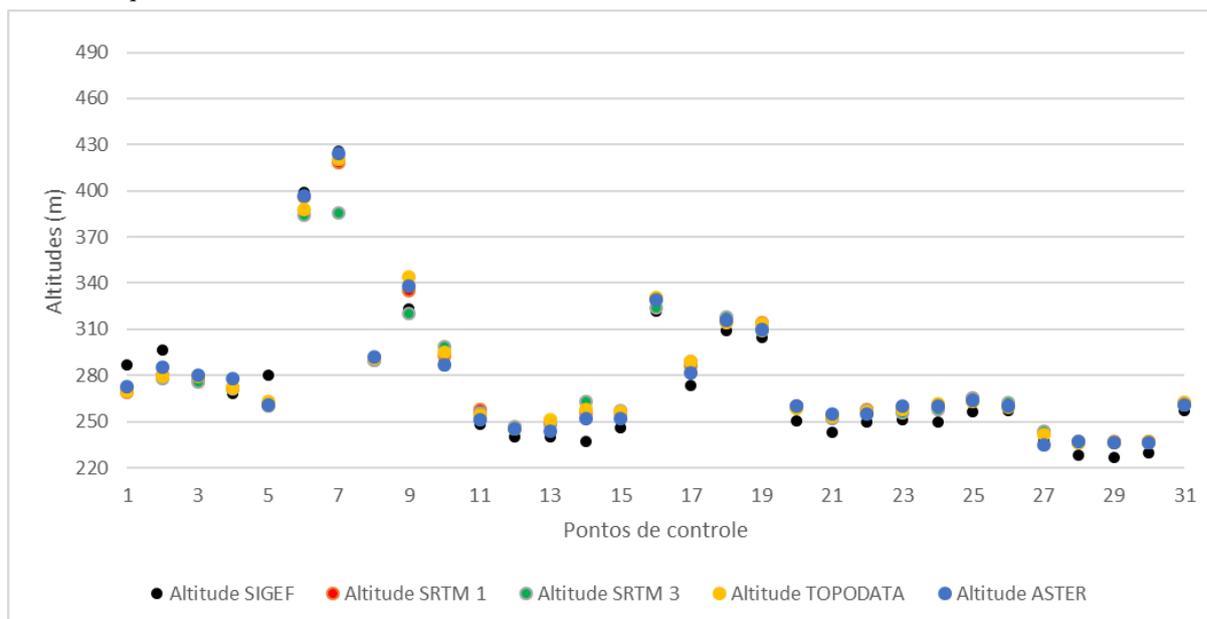
deve ser avaliada a existência falhas na obtenção da altitude do próprio ponto de controle, podendo ser causada por erro de preenchimento da planilha de certificação. Em casos assim, sugere-se a substituição do ponto.

Gráfico 1 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues.



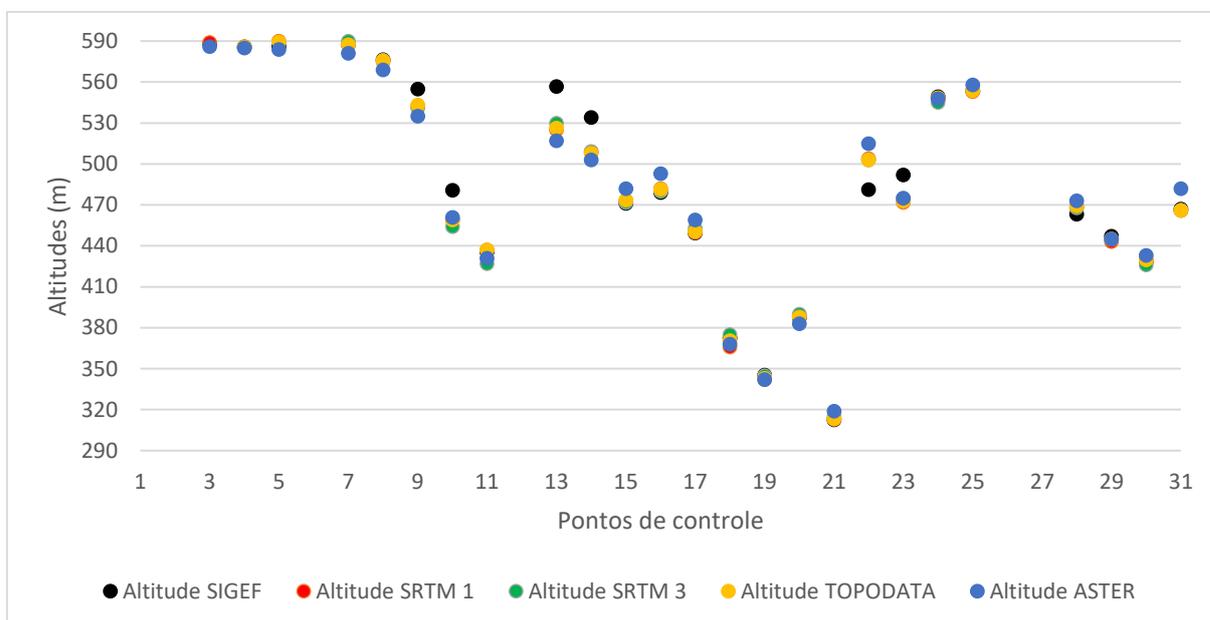
Fonte: o Autor.

Gráfico 2 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu.



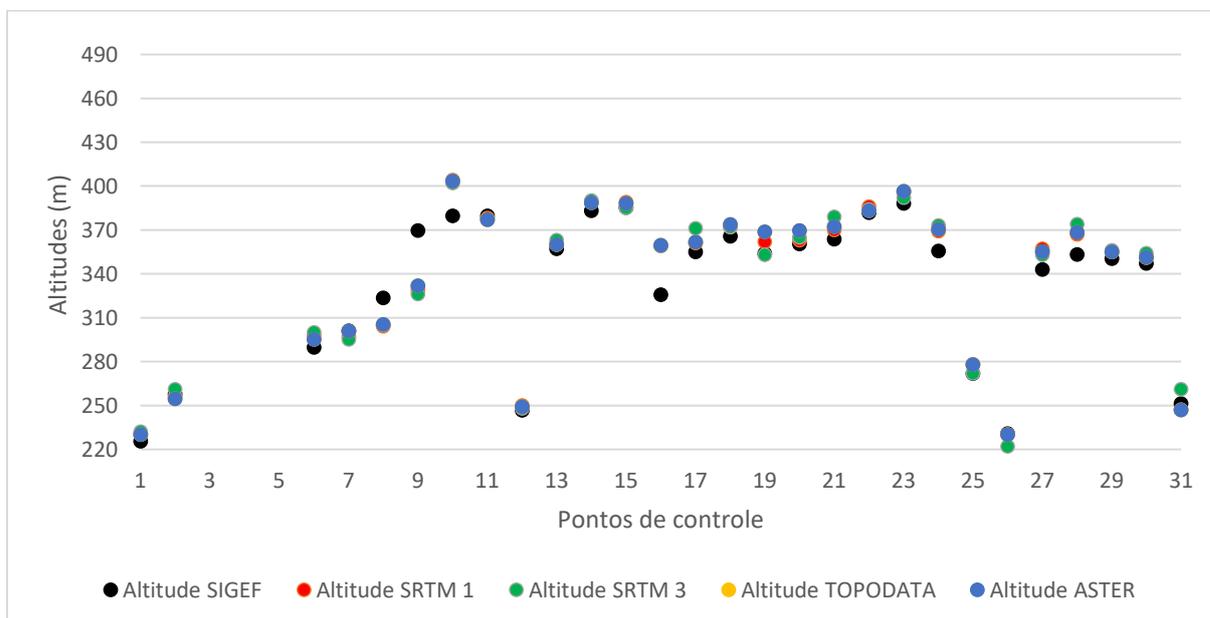
Fonte: o Autor.

Gráfico 3 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do Rio Soninho.



Fonte: o Autor.

Gráfico 4 - Comparação entre as altitudes dos pontos de controle (SIGEF) e os MDE's para a sub-bacia do Ribeirão Curicaca.



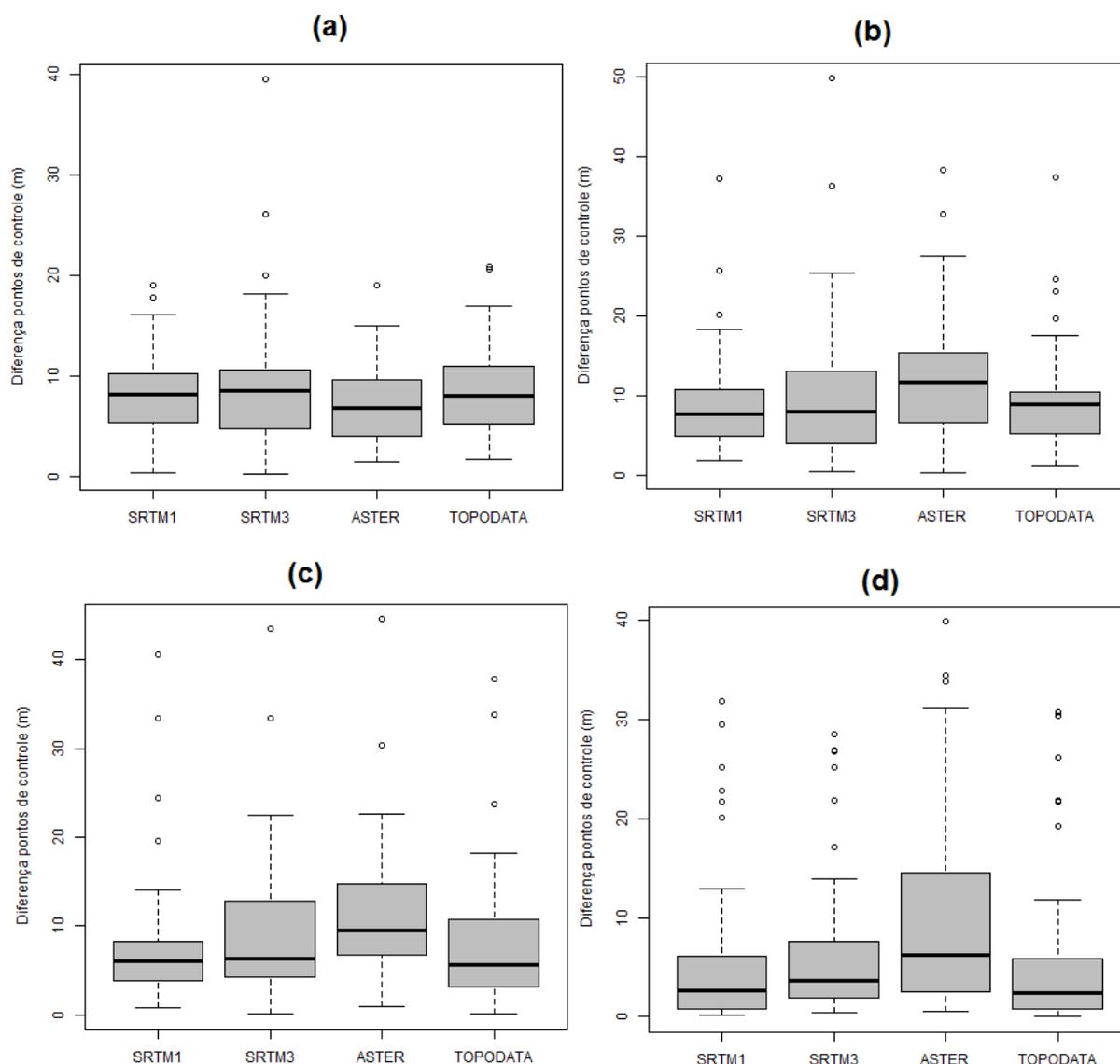
Fonte: o Autor.

No gráfico 5 foram plotados os gráficos boxplots das diferenças entre os altitudes coletadas no SIGEF e as altitudes dos MDE's em estudo. O MDE SRTM1 apresentou as menores amplitudes interquartílicas, variando de 3 a 5 m para as sub-bacias do Ribeirão Taquarussu e Rio Soninho respectivamente. O MDE ASTER foi o que apresentou a maior amplitude interquartílica, de 14 m. O número de *outliers* (diferenças discrepantes) se mostrou

elevado para a sub-bacia do Rio Soninho, chegando a 20 % dos pontos amostrados para os MDE's SRTM1, SRTM3 e TOPODATA com diferenças variando de 17 a 33 m. Analisando os dados de forma geral, apenas 5 *outliers* tiveram diferenças maiores que 40 m, sendo o MDE SRTM3 para a bacia dos Mangues com maior discrepância, 50 m. Por outro lado as medianas ficaram quase em sua totalidade abaixo dos 10 m de diferença. Da análise dos boxplots, foi possível diferenciar os modelos com melhor qualidade, a medida que se observa a menor variabilidade das diferenças. Dessa forma constatou-se que o MDE SRTM1 atingiu melhores resultados, considerando sua menor amplitude entre as diferenças.

Deve-se ainda considerar que o método utilizado para a remoção das depressões (Wang e Liu 2006) neste trabalho, altera o valor das altitudes dos MDE's devido ao processo de interpolação e suavização do relevo. Esse procedimento, apesar de necessário para garantir a consistência hidrológica dos modelos, pode diminuir a quantidade de erros ou ainda criar novos erros. (SOUZA, 2015)

Gráfico 5 – Boxplot's das diferenças entre os MDE's e as altitudes coletadas no SIGEF, para as sub-bacias do Ribeirão Taquarussu (a), Ribeirão dos Mangues (b), Ribeirão Curicaca (c) e Rio Soninho (d).



Fonte: o Autor.

6.2.4.1 Verificação quanto a tolerância vertical

Os resultados da verificação quanto a tolerância vertical, foram obtidos conforme proposto por Dias et al. (2011), e estão expostos nas tabelas 9, 10, 11 e 12 para as sub-bacias do ribeirão dos Mangues, Taquarussu, Curicaca e rio soninho, respectivamente.

A tolerância vertical são as diferenças admitidas pelo Decreto n° 89.817/1984 que estabelece instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia nacional. Este Decreto orienta no artigo 8° que noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro

superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico estabelecido. Estes Padrões foram resumidos no quadro 01.

Nas tabelas 10, 11 e 12 observa-se que nenhum dos MDE's em estudo para as sub-bacias do ribeirão dos Mangues, Curicaca e rio Soninho apresentam o Padrão de Exatidão Cartográfica necessário para escalas maiores que 1:50.000. Já para escalas de 1:100.000 os critérios do artigo 9º do Decreto nº 89.817/1984 são atendidos para todas as classes.

Na tabela 9 observa-se que para a escala de 1:100.000 os critérios também são atendidos para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu. E o MDE ASTER cumpriu os Padrões de Exatidão Cartográfica – altimétrico para a escala de 1:50.000 classe C.

Tabela 9 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu.

Escala	Classe	Classe/tolerância	% quanto as condições de tolerância			
			SRTM1	SRTM3	ASTER	TOPODATA
1:50.000	A	90% dos pontos A < 10 m	71%	74%	77%	65%
	B	90% dos pontos B < 12 m	84%	77%	84%	77%
	C	90% dos pontos C < 15 m	87%	81%	94%	81%
1:100:000	A	90% dos pontos A < 25 m	100%	94%	100%	100%
	B	90% dos pontos A < 30 m	100%	97%	100%	100%
	C	90% dos pontos A < 36,6 m	100%	97%	100%	100%

Fonte: o Autor

Tabela 10 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do ribeirão dos Mangues.

Escala	Classe	Classe/tolerância	% quanto as condições de tolerância			
			SRTM1	SRTM3	ASTER	TOPODATA
1:50.000	A	90% dos pontos A < 10 m	71%	68%	42%	68%
	B	90% dos pontos B < 12 m	81%	71%	52%	81%
	C	90% dos pontos C < 15 m	87%	81%	68%	81%
1:100:000	A	90% dos pontos A < 25 m	94%	90%	90%	97%
	B	90% dos pontos A < 30 m	97%	94%	94%	97%
	C	90% dos pontos A < 36,6 m	97%	97%	97%	97%

Fonte: o Autor.

Tabela 11 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do ribeirão Curicaca.

Escala	Classe	Classe/tolerância	% quanto as condições de tolerância			
			SRTM1	SRTM3	ASTER	TOPODATA
1:50.000	A	90% dos pontos A < 10 m	77%	68%	52%	74%
	B	90% dos pontos B < 12 m	77%	74%	71%	74%
	C	90% dos pontos C < 15 m	87%	74%	74%	84%
1:100:000	A	90% dos pontos A < 25 m	94%	94%	94%	94%
	B	90% dos pontos A < 30 m	97%	94%	94%	94%
	C	90% dos pontos A < 36,6 m	97%	97%	97%	97%

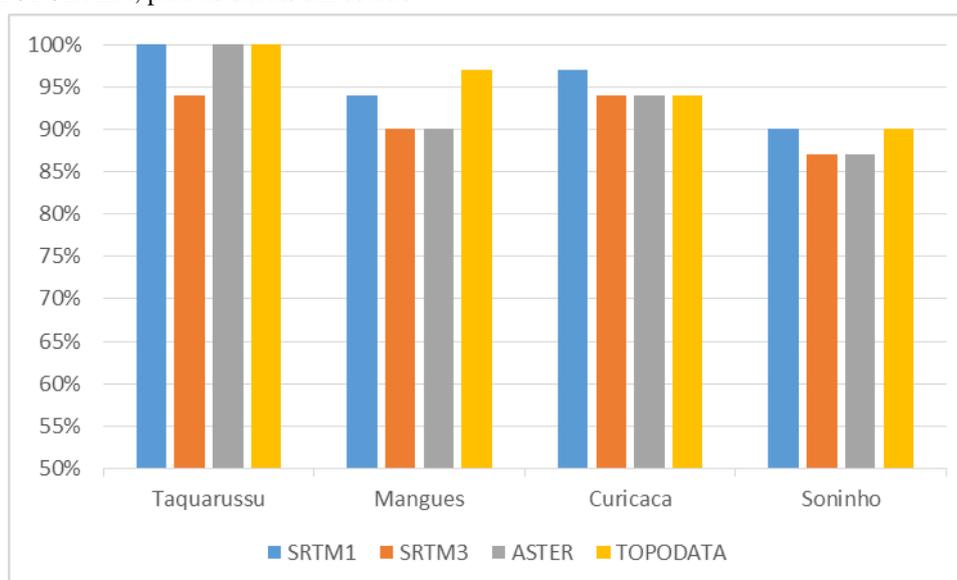
Fonte: O Autor

Tabela 12 - Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do Rio Soninho.

Escala	Classe	Classe/tolerância	% quanto as condições de tolerância			
			SRTM1	SRTM3	ASTER	TOPODATA
1:50.000	A	90% dos pontos A < 10 m	77%	77%	68%	77%
	B	90% dos pontos B < 12 m	77%	77%	71%	81%
	C	90% dos pontos C < 15 m	81%	81%	74%	81%
1:100:000	A	90% dos pontos A < 25 m	90%	87%	87%	90%
	B	90% dos pontos A < 30 m	97%	100%	87%	94%
	C	90% dos pontos A < 36,6 m	100%	100%	97%	100%

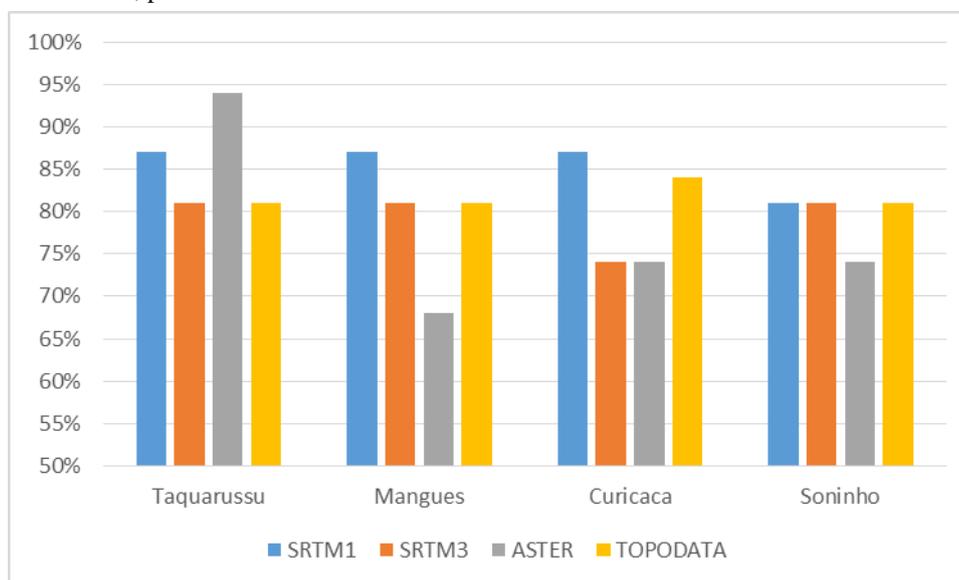
Fonte: o Autor.

Gráfico 6 – Tolerância vertical considerando a escala 1:100.000 classe A, para os MDE's: SRTM1, SRTM3, ASTER e TOPODATA; para as bacias em estudo.



Fonte: o Autor.

Gráfico 7 – Tolerância vertical considerando a escala 1:50.000 classe C, para os MDE's: SRTM1, SRTM3, ASTER e TOPODATA; para as bacias em estudo.



Fonte: o Autor.

6.2.4.2 Verificação quanto o EMQ

A tabela 12 traz os resultados dos cálculos do Erro Médio Quadrático. Em relação ao EMQ, para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu, os MDE's SRTM 1 e TOPODATA atendem aos critérios (quadro 5) para serem usados para fins hidrológicos para a escala 1:50.000 classe C, já que o EMQ para estes MDE's foi menor que 10 m; o mesmo ocorre para a bacia do ribeirão Curicaca. Apesar disso, o uso destes MDE's para trabalhos que requeiram a escala de 1:50.000 classe C encontra-se limitado, pois os MDE's não atenderam a verificação quanto aos padrões de exatidão cartográfica do item anterior.

Em relação ao EMQ, praticamente todos os MDE's para as quatro bacias, atendem as condições para serem usados para fins hidrológicos (quadro 5) para a escala 1:100.000 classe A, já que os EMQ's estão abaixo de 16,6 m. Apenas o MDE SRTM 3 para a bacia do ribeirão Curicaca e o MDE TOPODATA para a bacia do rio Soninho, não atendem a verificação quanto ao EMQ para a escala de 1:100.000 classe A.

Souza (2015) alerta ainda que haverá variações na precisão dos dados dos MDE's a depender da área de estudo, pois os erros dos modelos estarão sempre ligados à forte variação altimétrica da área, áreas de baixa declividade e de densa cobertura vegetal. Para exemplificar essa variação, Souza (2015) ainda listou o EMQ do MDE SRTM3 de algumas pesquisas: 2,9 (Bhang e Schwartz, 2008); 7m (Pinheiro, 2006); 9,6m (Rodrigues et al., 2011); 11m (Santos et

al., 2006); 18,4m (Saholiariliva et al., 2011) e 25,5m (Miliareisis e Paraschou, 2005); as áreas de estudo desses trabalhos foram evidenciadas no Quadro 12. E agora, nesta pesquisa, o EMQ para o SRTM3 variou de 11,80 a 19,44 m; já para o SRTM1, obteve-se melhores resultados, como esperado, diante da melhor resolução espacial, variando de 8,68 a 12,10 m.

Quadro 12 - Valores do EMQ para o MDE SRTM3 em diversas pesquisas.

Obra	Local	EMQ (SRTM3)
BHANG, K.J., SCHWARTZ, F. Limitations in hydrologic applications of C-Band SRTM DEM in low-relief settings. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 5, 497-501, 2008.	Minnesota (EUA)	2,9 m
PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, Cartas Topográficas e GPS: numa área com relevo escarpado. Revista Brasileira de Cartografia 58, 1-9, 2006.	Planalto das Araucárias, Rio Grande do Sul (Brasil)	7,0 m
RODRIGUES, T. G., PARADELLA, W. R., OLIVEIRA, C. G. Evaluation of the altimetry from SRTM-3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon Region. Anais da Academia Brasileira de Ciências 83, 953-966, 2011.	Serra dos Carajás, Pará (Brasil)	9,6 m
SANTOS, P. R. A., GABOARDI, C., OLIVEIRA, L. C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. Revista Brasileira de Cartografia 58, 101-107, 2006.	Manaus, Amazonas (Brasil)	11,0 m
SAHOLIARILIVA, N. G., GUNNELL, Y., PETIT, C., MERING, C. Techniques for quantifying the accuracy of gridded elevation models and for mapping uncertainty in digital terrain analysis. Progress in Physical Geography 35, 739-764, 2011.	Wasatch, Utah, (EUA)	18,4 m
MILIAREISIS, G. C., PARASCHOU, V. E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7, 49-59, 2005.	Ilha de Creta, (Grécia)	25,5 m

Fonte: o Autor.

Tabela 13 - Verificação quanto o Erro Médio Quadrático.

Sub-bacia	Erro Médio Quadrático			
	SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER
Taquarussu	9,93	12,75	8,71	10,53
Mangues	12,10	15,30	15,64	12,80
Curicaca	8,68	19,44	4,02	10,88
Soninho	11,93	11,80	17,03	11,79

Fonte: o Autor.

6.2.4.3 Verificação quanto a existência de tendências

A tabela 14 mostra os valores dos testes de tendência realizado para os MDE's em análise para as sub-bacias em estudo. O teste de tendência irá demonstrar o quanto as altitudes de cada MDE são tendenciosas, a ponto de não permitir a correta representação do relevo da região em estudo e a utilização dos MDE's para fins hidrológicos.

Portanto, observando um nível de confiança $(1 - \alpha)$ igual a 90% ($\alpha = 0,10$), deve ser realizada uma comparação entre os "th's" com um valor limite "t" tabelado. Dessa forma, pela tabela "t" bicaudal, da distribuição "t" de Student, para $t = t_{31, 0,05}$, tem-se um valor limite $t = 2,040$. O que diz que apenas o SRTM1 e o SRTM3 estão livres de erros sistemáticos em relação à altitude para a bacia do ribeirão Taquarussu. Sendo a princípio, o SRTM3 com $th=1,15$, o MDE mais recomendado para fins hidrológicos, comparando-o com o $th=1,98$ do SRTM1. Por outro lado, o SRTM3 encontra-se limitado para o estudo de áreas pequenas devido a sua resolução (LANDAU e GUIMARÃES, 2011), o que é o caso da bacia do ribeirão Taquarussu. Com isso, conclui-se que o SRTM1, dentre os MDE's em estudo, o mais recomendado para ser utilizado para fins hidrológicos para escalas menores que 1:100.000 classe A.

Em relação aos MDE's da sub-bacia do ribeirão dos Mangues, apenas o TOPODATA não mostrou resultados satisfatório para o teste de tendência. Isto é explicado pelo fato de muitos pontos de altitude do MDE TOPODATA serem o resultado do processo de interpolação derivado do SRTM3. Dentre os demais MDE's, verificou-se que todos atendem os critérios de validação hidrológica para a escala de 1:100.000 classe C. Para este trabalho, optou-se por utilizar o SRTM1

Em relação aos MDE's da sub-bacia do ribeirão Curicaca, todos os MDE's analisados apresentaram resultados satisfatórios na verificação quanto a existência de tendências. Sendo os MDE's mais indicados, o SRTM 1, TOPODATA e ASTER, visto que o SRTM3 não passou

no teste quanto ao EMQ. Para fins deste trabalho optou-se por utilizar o SRTM 1. O mesmo ocorre para a bacia do rio Soninho, agora descartando-se o MDE TOPODATA.

Observa-se que os “th’s” calculados apresentam valores positivos, acima dos pontos de controle, subestimando a distribuição espacial de elevação do terreno. Isso já era esperado, visto que na presente pesquisa buscou-se selecionar pontos de referência dentre os vértices dos imóveis do SIGEF, em sua maioria em limites artificiais, diminuindo a interferência da vegetação.

Tabela 14 - Resultados do teste de tendência para os MDE's em estudo.

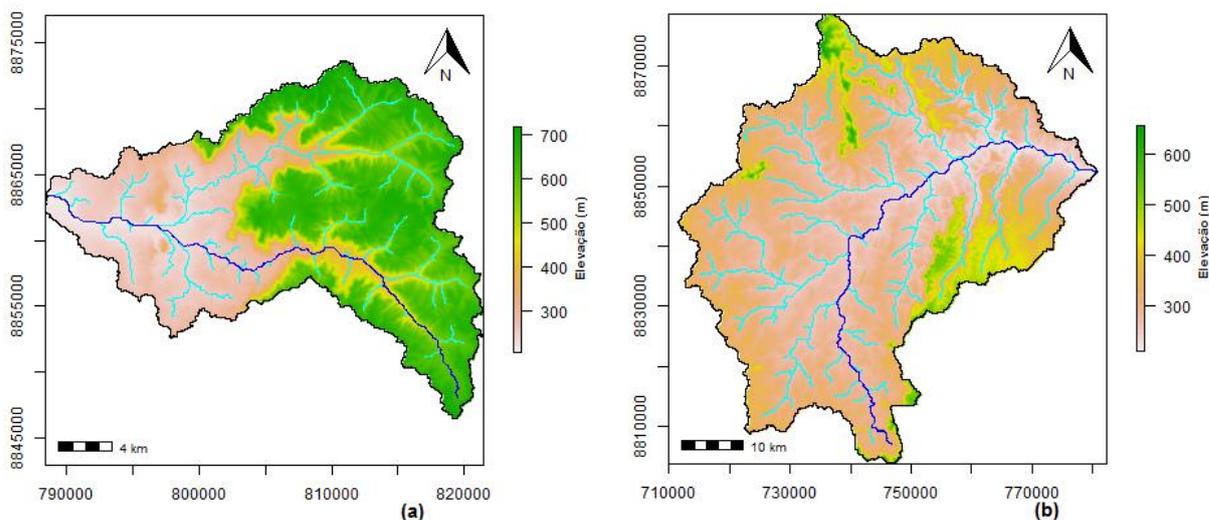
Sub-bacia	Teste de tendência (t_h)			
	SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER
Taquarussu	1,98	1,15	2,89	2,84
Mangues	1,83	0,33	3,99	1,45
Curicaca	0,86	0,97	0,90	0,88
Soninho	1,80	1,56	1,21	1,62

Fonte: o Autor.

6.3 Delimitação e caracterização morfométrica das bacias

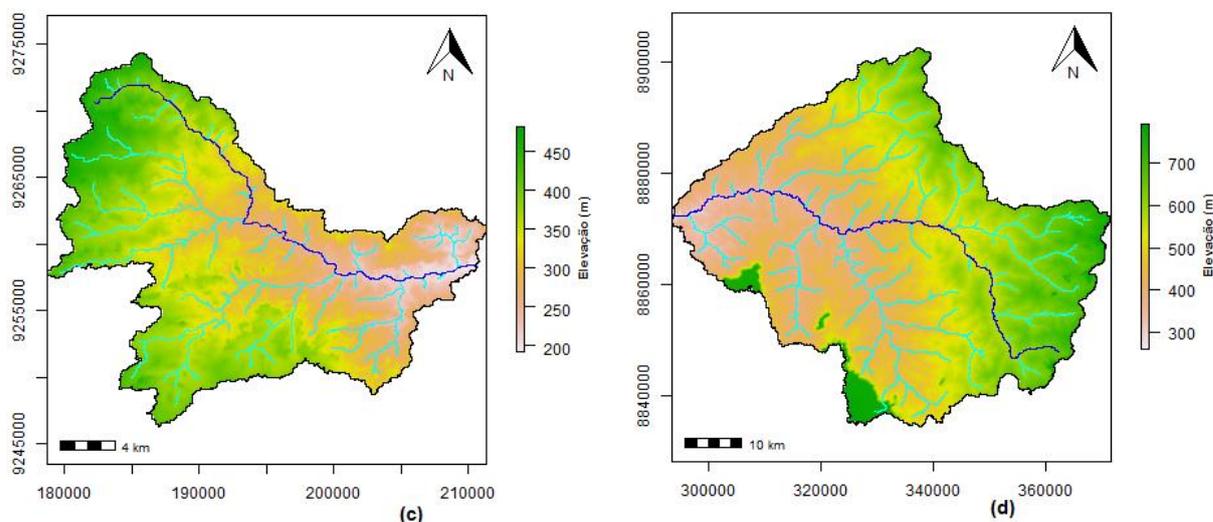
Foram delimitadas e extraídas as sub-bacias hidrográficas do Ribeirão Taquarussu, Mangues, Curicaca e Rio Soninho utilizando a ferramenta proposta, os mapas de elevação das bacias podem ser conferidos nas figuras 38 e 39.

Figura 38 - Mapa de elevação da sub-bacia do Ribeirão Taquarussu (a) e do Ribeirão dos Mangues (b).



Fonte: o Autor.

Figura 39 - Mapa de elevação da sub-bacia do Ribeirão Curicaca (a) e do Rio Soninho (b).



Fonte: o Autor.

6.4 Comparação entre a ferramenta elaborada e o programa r.basin do Grass GIS

O software SIG utilizado para comparação com os resultados da ferramenta elaborada foi o Sistema de Análise de Recursos Geográficos (GRASS-GIS), em execução no sistema operacional Linux Ubuntu. GRASS é um projeto de código aberto, disponível gratuitamente na internet, que oferece um sistema integrado para *raster* e análise vetorial, processamento de imagens e criação de mapas e gráficos (GROHMANN, 2004).

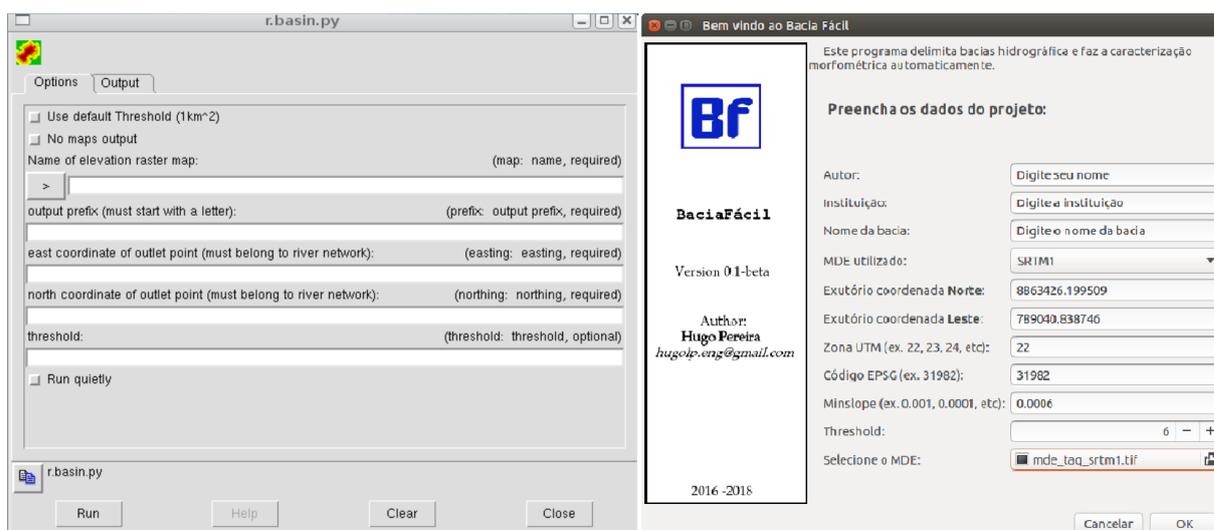
Análoga à ferramenta proposta, em Grass GIS, a delimitação de bacias hidrográficas e caracterização morfométrica de forma automática é possível a partir do módulo *r.basin*, desenvolvido por Margherita e Massimo (2013).

Esse programa, tem como entrada apenas o modelo digital de elevação, as coordenadas do exutório e o *threshold*. Depende também de outros algoritmos existentes para Grass que devem ser instalados: *r.hypso*, *r.stream.basins*, *r.stream.distance*, *r.stream.extract*, *r.stream.order*, *r.stream.snap*, *r.stream.stats* e *r.width.funct*.

A figura 40 apresenta as janelas para inserção dos dados de entrada tanto para o *r.basin* quanto para a ferramenta proposta. É possível notar similaridade nos parâmetros de entrada, porém *r.basin* não requer dados básicos (autor, instituição, etc.) pois não tem por finalidade gerar um relatório em pdf da bacia. Também não requer informações sobre o sistema de referência de coordenadas, pois seu funcionamento é a partir do software Grass GIS e estes dados são configurados diretamente no Grass através da ferramenta *g.region*. Outro ponto importante,

é que não é incrementado em *r.basin* o parâmetro *minslope*, pois o algoritmo de Jensen e Domingue (1988) utilizado para eliminação dos dados espúrios não objetiva manter uma inclinação mínima para um fluxo de escoamento constante, que é o caso do algoritmo de Wang e Liu (2006) utilizado na ferramenta proposta.

Figura 40 – Diálogos para inserção dos dados de entrada na ferramenta *r.basin* do Grass GIS (esquerda) e da ferramenta proposta (direita).



Fonte: o Autor.

No Grass, são geradas automaticamente 25 características morfométricas, conforme foi apresentado na tabela 5, enquanto na ferramenta proposta são geradas automaticamente 43 características. Nem todas as características geradas em *r.basin*, foram incrementadas na ferramenta proposta, pois buscou-se apresentar as características mais comuns no Brasil, conforme o estudo de Machado et al. (2011).

Das 25 características geradas automaticamente por *r.basin*, 16 coincidem com as seguintes características geradas pela ferramenta proposta: área, perímetro, altitude máxima da bacia, altitude mínima da bacia, amplitude altimétrica, altitude média da bacia, coordenadas do centróide da bacia, comprimento total dos cursos d'água, número de canais, densidade de drenagem, ordem da bacia, densidade hidrográfica, número de canais de primeira ordem, comprimento do canal principal, índice de circularidade, coeficiente de compacidade, forma da bacia e tempo de concentração (Giandotti). As tabelas 15, 16, 17 e 18 estão presentes as comparações dos resultados para as bacias em estudo.

Tabela 15 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Ribeirão Taquarussu. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).

Característica	Método utilizado		Diferença (Fp – G)/G
	Ferramenta proposta (Fp)	r.basin/Gass GIS (G)	
Área (km ²)	448.104	451.711	-0.80%
Perímetro (km)*	154.556	179.360	-16.05%
Índice de circularidade *	0.235	0.177	32.77%
Coeficiente de compacidade *	2.044	2.363	-13.50%
Comprimento do canal principal (m)	44539.988	46619.154	-4.46%
Número de canais (und)**	144	190	-24.21%
Número de canais de 1 ^a ordem**	73	137	-46.72%
Comprimento total dos cursos d'água (km)	238.515	249.207	-4.29%
Densidade de drenagem (km/km ²)	0.532	0.552	-3.52%
Altitude mínima (m)	206.729	202	2.34%
Altitude máxima (m)	716.728	717	-0.04%
Amplitude altimétrica (m)	510	515	-0.97%
Altitude média (m)	469.246	469.632	-0.08%
Declividade média da bacia	8.389	7.430	12.90%
Centroide do eixo Y (m)	8861625.795	8861805	0.00%
Centroide do eixo X (m)	807341.140	807345	0.00%

Fonte: o Autor.

Tabela 16 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).

Característica	Método utilizado		Diferença (Fp – G)/G
	Ferramenta proposta (Fp)	r.basin/Gass GIS (G)	
Área (km ²)	2751.085	2777.476	-0.95%
Perímetro (km) *	361.782	379.463	-4.66%
Índice de circularidade *	0.264	0.242	9.00%
Coeficiente de compacidade *	1.931	2.016	-4.22%
Comprimento do canal principal (m)	104245.101	117728.513	-11.45%
Número de canais (und) **	205	415	-50.60%
Número de canais de 1 ^a ordem **	103	312	-66.99%
Comprimento total dos cursos d'água (km)	794.538	932.590	-14.80%
Densidade de drenagem (km/km ²)	0.289	0.336	-13.94%
Altitude mínima (m)	209	204	2.45%
Altitude máxima (m)	659.272	660	-0.11%
Amplitude altimétrica (m)	450.272	456	-1.26%
Altitude média (m)	319.280	319.209	0.02%

Característica	Método utilizado		Diferença (Fp - G)/G
	Ferramenta proposta (Fp)	r.basin/Gass GIS (G)	
Declividade média da bacia	4.6	4.2	9.02%
Centroide do eixo Y (m)	8843909.467	8844375	-0.01%
Centroide do eixo X (m)	743354.9083	743355	0.00%

Fonte: o Autor.

Tabela 17 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Ribeirão Curicaca. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).

Característica	Método utilizado		Diferença (Fp - G)/G
	Ferramenta proposta (Fp)	r.basin (Gass GIS) (G)	
Área (km ²)	429.742	432.088	-0.55%
Perímetro (km) *	160.393	190.954	-16.00%
Índice de circularidade *	0.210	0.149	40.94%
Coefficiente de compacidade *	2.166	2.572	-15.78%
Comprimento do canal principal (m)	42642.118	44337.173	-3.82%
Número de canais (und) **	143	176	-18.75%
Número de canais de 1ª ordem **	87	136	-36.03%
Comprimento total dos cursos d'água (km)	244.576	270.188	-9.48%
Densidade de drenagem (km/km ²)	0.569	0.625	-8.96%
Altitude mínima (m)	191.508	189	1.33%
Altitude máxima (m)	481.780	482	-0.05%
Amplitude altimétrica (m)	290.272	293	-0.93%
Altitude média (m)	335.806	335.290	0.15%
Declividade média da bacia	4.65	3.58	29.75%
Centroide do eixo Y (m)	9259491.917	9259515	0.00%
Centroide do eixo X (m)	192959.971	193005	-0.02%

Fonte: o Autor.

Tabela 18 - Comparação entre a ferramenta proposta e o programa r.basin para Grass GIS, para a sub-bacia do Rio Soninho. (* Parâmetros diretamente influenciados pelo perímetro da bacia, com diferenças mais significantes; ** parâmetros influenciados pelo grau de detalhamento da rede de drenagem, com diferenças mais significantes).

Característica	Método utilizado		Diferença (Fp - G)/G
	Ferramenta proposta (Fp)	r.basin (Gass GIS) (G)	
Área (km ²)	2931.994	2960.613	-0.97%
Perímetro (km)	362.224	417.027	-13.14%
Índice de circularidade *	0.281	0.214	31.31%
Coefficiente de compacidade *	1.873	2.146	-12.72%
Comprimento do canal principal (m)	112899.564	115569.182	-2.31%
Número de canais (und) **	193	435	-55.63%

Número de canais de 1ª ordem **	97	352	-72.44%
Comprimento total dos cursos d'água (km)	835.267	893.111	-6.48%
Densidade de drenagem (km/km ²)	0.285	0.302	-5.56%
Altitude mínima (m)	259.388	259	0.15%
Altitude máxima (m)	791.857	791	0.11%
Amplitude altimétrica (m)	532.469	532	0.15%
Altitude média (m)	516.450	516.4681	-0.09%
Declividade média da bacia	3.3	2.8	16.52%
Centroide do eixo Y (m)	8866272.829	8866665	0.00%
Centroide do eixo X (m)	333098.581	333975	0.26%

Fonte: o Autor.

Foram destacadas nas tabelas 15, 16, 17 e 18, as características geradas automaticamente que apresentaram as diferenças percentuais mais significativas. Esses percentuais elevados decorrem das diferenças no cálculo do perímetro que são transmitidas para os parâmetros derivados dele, como o índice de circularidade e o coeficiente de compacidade (*); do número total de canais e do número total de canais de 1ª ordem (**). Quanto às características altimétricas, área da bacia e às coordenadas do centroide, nota-se que apresentaram resultados similares para as quatro bacias em estudo.

As tabelas demonstram que para o cálculo da morfometria de uma mesma bacia, utilizando o mesmo MDE, pode haver resultados diferentes a depender dos métodos computacionais utilizados. Por exemplo, as diferenças existentes entre os valores do índice de circularidade e do coeficiente de compacidade, podem levar o pesquisador a tirar conclusões diferentes, quando se pretende estimar a propensão de uma determinada bacia à ocorrência de cheias. Tanto o índice de circularidade quanto o coeficiente de compacidade, estão relacionados à forma da bacia, que por sua vez influencia no escoamento superficial e quanto mais próxima do círculo for a forma da bacia maior será a potencialidade de produção de picos de enchentes elevados.

6.4.1 Análise entre os algoritmos de simplificação das linhas dos divisores

A diferença no perímetro é atribuída à diferença no algoritmo utilizado pelos dois programas para suavização das linhas dos divisores da bacia. Não se pode atribuir a um ou outro, qual que condiz de maneira mais adequada com a realidade, podendo variar de situação para situação. Porém pode ser feita uma análise para saber qual divisor gerado mais se adequa ao relevo representado pelo MDE utilizado.

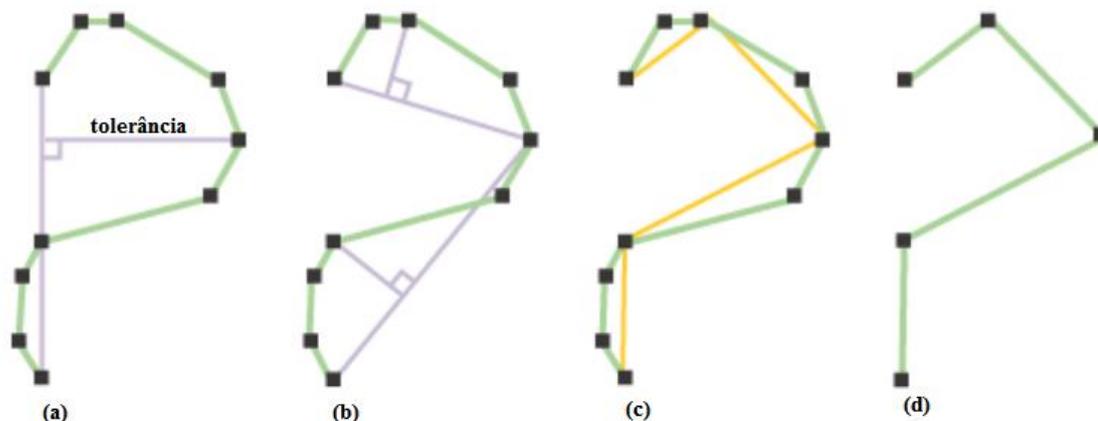
Os cálculos geométricos da morfometria da bacia hidrográfica, são realizados em sua maioria, a partir de arquivos vetoriais. O processo de vetorização automática de elementos lineares de mapas *rasters*, dão à linha divisória da bacia um formato de zigzag que não se assenta com o relevo real. Uma solução simples para o problema descrito, consiste em eliminar segmentos mais curtos do que um determinado comprimento, com o ângulo em relação ao segmento subsequente, menor do que um ângulo pré determinado (TUTIĆ e LAPAINE, 2009). No caso das linhas geradas a partir de mapas *rasters*, por exemplo, seria menor ou igual a 90°.

O processo descrito acima é comumente conhecido por simplificação de linha. Na literatura, podem ser encontrados algoritmos diferentes para a simplificação de linhas, por exemplo, cita-se os algoritmos de Ivanov 1965, Ramer 1972, Douglas e Peucker 1973, Cromley 1991, Visvalingam e Whyatt 1993, Wang e Müller 1998 e Guo et al. 2001. O mais conhecido entre eles, é o algoritmo de Douglas e Peucker 1973, ele é utilizado por vários pacotes de softwares, comercial como ArcInfo ESRI (através da ferramenta Point-Remove), MGE e Autodesk Map (AutoCAD Map) (VUCETIC, PETROVICE e STRUNJE, 2007). Também é implementado no Grass GIS pela ferramenta *v.generalize.simplify* e em R através do comando *gSimplify* que por sua vez foi incrementado na ferramenta proposta.

O algoritmo de Douglas-Peucker funciona identificando e removendo vértices relativamente redundantes ou que permeiam desnecessariamente uma única região. Ele é considerado o mais rápido dos algoritmos de simplificação. A angularidade das linhas resultantes aumenta significativamente à medida que a tolerância aumenta. Essa tolerância é a distância perpendicular máxima permitida entre cada vértice e a nova linha criada (ESRI, 2017). Para a ferramenta proposta, a fim de adaptar a forma final dos divisores das bacias à resolução dos MDE's, utilizou-se a tolerância de 30 m.

Para entender esse processo deve-se observar a figura 41. O algoritmo seleciona os possíveis pontos críticos na linha original, eles são os que têm maior distância perpendicular da linha base. A primeira linha base é definida pelo primeiro e o último da linha original (a). Se nenhuma distância perpendicular superar a tolerância o processo finaliza e os dois pontos serão considerados críticos. Caso exista algum ponto que exceda a tolerância este será visto como novo ponto crítico, que subdividirá a linha em duas (b) e o processo se repetirá até chegar ao final da mesma (c), ao final obtem-se a linha simplificada (d). (SANTANA, SALES, *et al.*, 2017)

Figura 41 – Exemplo do funcionamento do processo de simplificação de linhas do algoritmo de Douglas e Peucker 1973.



Fonte: (ESRI, 2016)

A ferramenta *r.basin*, difere da ferramenta proposta, pois apresenta os divisores com um grau de suavização das linhas e não apenas simplificadas. Ou seja, não promove a eliminação de pontos, mas realiza um aumento angular da forma em “zigzag” do processo de extração do contorno vetorial do raster e com isso ao invés de reduzir o número de segmentos, transforma dois segmentos em três ou mais com o intuito de aumentar a angulação. Esse processo certamente possibilita uma melhor estética visual para grandes escalas, o que não é o caso desse trabalho, considerando a utilização de MDE’s com resolução de no máximo 30 m. No tocante, se aplicado o algoritmo de Douglas-Peucker para grandes escalas, os resultados tanto da área, quanto do perímetro seriam distorcidos. Na figura 43 pode-se observar a diferença nos processos de generalização tanto pela ferramenta proposta, quanto pela ferramenta *r.basin*.

Diante de expressiva diferença de um e outro método, foi realizado o processo de simplificação a partir da ferramenta *Pit-Remove* no Arc GIS e obteve-se resultados muito próximos aos da ferramenta proposta. No teste para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues, originalmente os divisores apresentavam 8310 vértices, após a simplificação na ferramenta proposta por meio do algoritmo de Douglas-Peucker eles foram reduzidos para 2505 vértices e executando o mesmo algoritmo através da ferramenta *Pit-Remove* obteve-se resultado praticamente idêntico, com 2520 vértices. Já a generalização a partir de *r.basin*, o número de vértices aumentou para 11709 pontos (Tabela 19).

Tabela 19 – Quantidade de pontos e perímetro dos divisores da sub-bacia do Ribeirão dos Mangues

Divisores	Algoritmo	Ferramenta	Tolerância (m)	Vértices	Perímetro (km)
Original	-----	-----	-----	8310	436,76
Simplificado	Douglas-Peucker	Ferramenta proposta	30	2505	361,782
Simplificado	Douglas-Peucker	Pit-Remove (Arc GIS)	30	2520	361,706
Suavizado	-----	r.basin.py	-----	11709	379,463

Fonte: o Autor.

Conforme Santana, Sales, *et al.* (2017) o processo de simplificação automática, apesar de seguir um padrão de regras pré-definidas, deve ser vista com cuidado, tendo em vista que não existe teoria que explique qual algoritmo é mais conveniente para um mapa como todo e para feições específicas do mapa. Não descartando a necessidade de análise humana utilizando o quanto possível o apoio do computador (processo automático) e deixar a tomada de decisões para análise humana, e assim verificar se o processo foi satisfatório ou não.

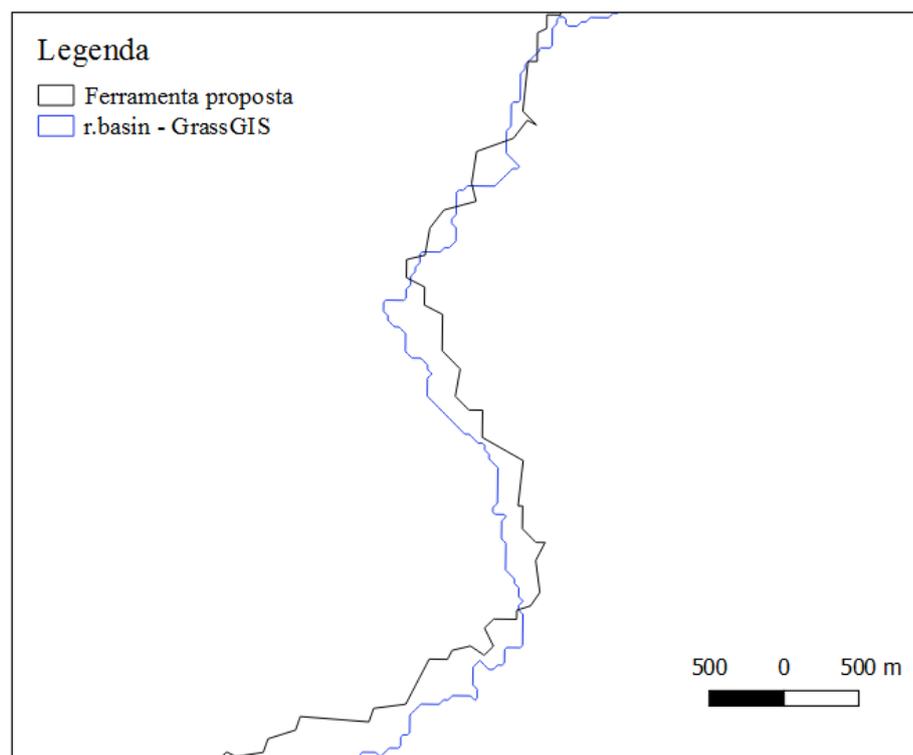
Desse ponto de vista, foram sobrepostos os divisores obtidos pelos três processos de simplificação apresentados na tabela 19, no relevo do *Google Earth* que por sua vez tem os dados de elevação oriundos do próprio SRTM. Foi verificado que o processo de simplificação adotado por *r.basin* não apresentou resultados satisfatórios, deixando muitas vezes de seguir corretamente os contornos dos divisores definidos pelo SRTM, conforme figura 42.

Figura 42 – Sobreposição dos divisores obtidos pelos processos de suavização pela ferramenta proposta (azul), Pit-Remove/Arc GIS (verde) e r.basin (vermelho)



Fonte: o Autor.

Figura 43 - Diferença entre as suavizações dos contornos das bacias gerados pela ferramenta proposta e por r.basin (Grass GIS).



Fonte: o Autor.

6.4.2 Análise quanto aos algoritmos de eliminação de dados espúrios.

A ferramenta *r.basin*, quando utilizados parâmetros de configuração semelhantes, apresentou um melhor detalhamento para definição de canais de primeira ordem. Só que o comprimento da maioria destes canais não chegaram a interferir de forma efetiva nos valores da densidade de drenagem devido a maioria desses canais adicionais de ordem 1 terem comprimento muito pequeno. Conclusões como a estimativa do número de nascentes existentes em uma bacia hidrográfica deverá levar em consideração fatores como este. Isso não se apresenta como uma limitação da ferramenta proposta, visto que melhores resultados para o detalhamento do número de canais de primeira ordem, pode ser obtido com a configuração inicial do valor do *threshold*.

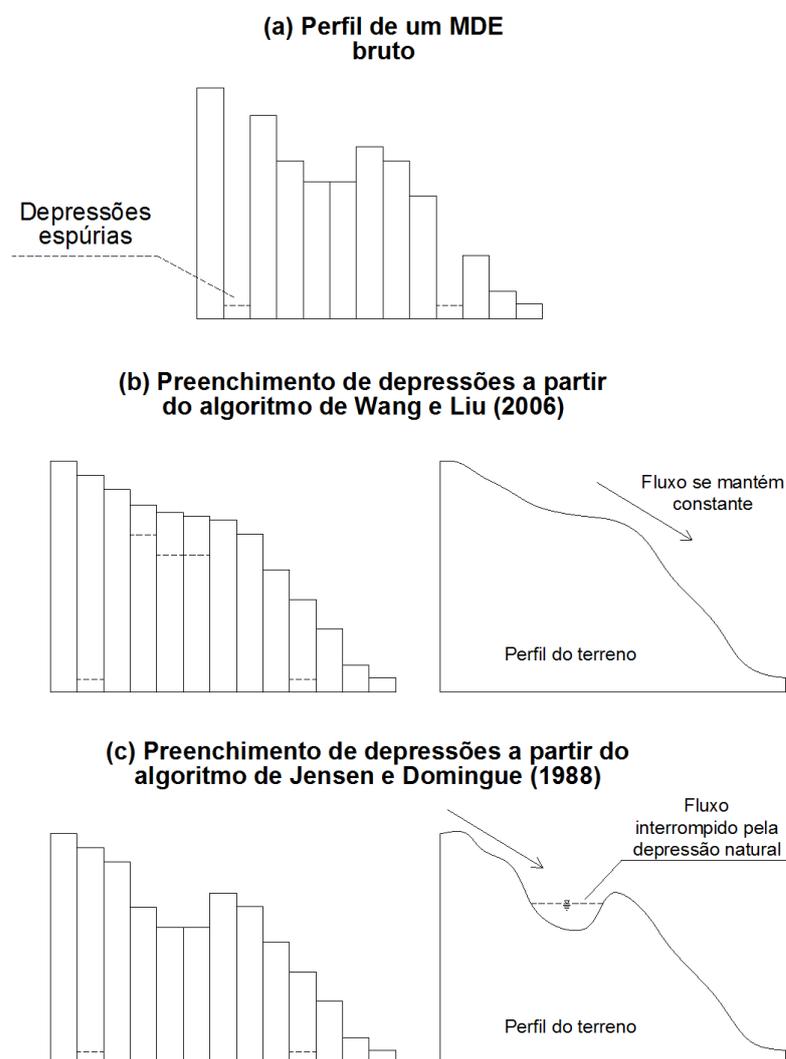
Em relação às características altimétricas das bacias, altitude máxima, altitude mínima, média e amplitude altimétrica, tanto no *r.basin* quanto na ferramenta proposta apresentaram resultados muito próximos. Pode-se observar que *r.basin* retorna valores inteiros para as altitudes enquanto a ferramenta proposta apresenta valores fracionados. Isso está relacionado às características do algoritmo utilizado para eliminar os dados espúrios dos MDE's, enquanto a ferramenta proposta utiliza o algoritmo Wang e Liu (2006), foi utilizado em Grass o algoritmo *r.fill.dir* baseado em Jenson e Domingue (1988).

O algoritmo de Jenson e Domingue (1988), consiste na atribuição de direções de fluxo conforme a maior declividade e o incremento artificial da altitude de células ou conjunto de células que configuram áreas de depressão, até que se encontre um caminho de escoamento. Inicialmente o algoritmo atribui o valor da altitude para as pequenas depressões como sendo a altitude da célula de menor altitude dentre as 8 células que a rodeiam (BUARQUE, et al. 2009). O método de Wang e Liu (2006), usado na ferramenta proposta, não só preenche as depressões, mas também preserva uma inclinação descendente ao longo do caminho. Por esse motivo o algoritmo Wang Liu (2006) não admite valores de altitudes iguais para uma célula vizinha mas preserva o valor de inclinação mínimo pré-definido.

Esta situação é melhor explicada na figura 44, de uma maneira geral o algoritmo de Wang e Liu (2006) faz a interpolação das altitudes diante da existência de depressões no terreno, com o propósito de manter o fluxo de escoamento constante. Já o algoritmo de Jenson e Domingue (1988) mantém as depressões naturais que não configuram falhas no MDE, o que irá gerar o escoamento do fluxo retido para superfícies adjacentes, aumentando assim o número de

canais gerados. No entanto, em situações de chuva extrema, o preenchimento completo de uma eventual depressão natural fará o escoamento se aproximar da situação provocada pelo algoritmo de Wang e Liu. O que se observa é que Jensen e Domingue reproduzem o terreno real de uma maneira melhor, enquanto Wang e Liu mantêm a consistência do fluxo de forma similar ao que se observa em situações de chuva extrema.

Figura 44 – Desenho esquemático comparando o preenchimento de dados espúrios de um MDE em seu estado bruto (a), a partir dos algoritmos de Wang e Liu (2006) (b) e do algoritmo de Jensen e Domingue (1988) (c).

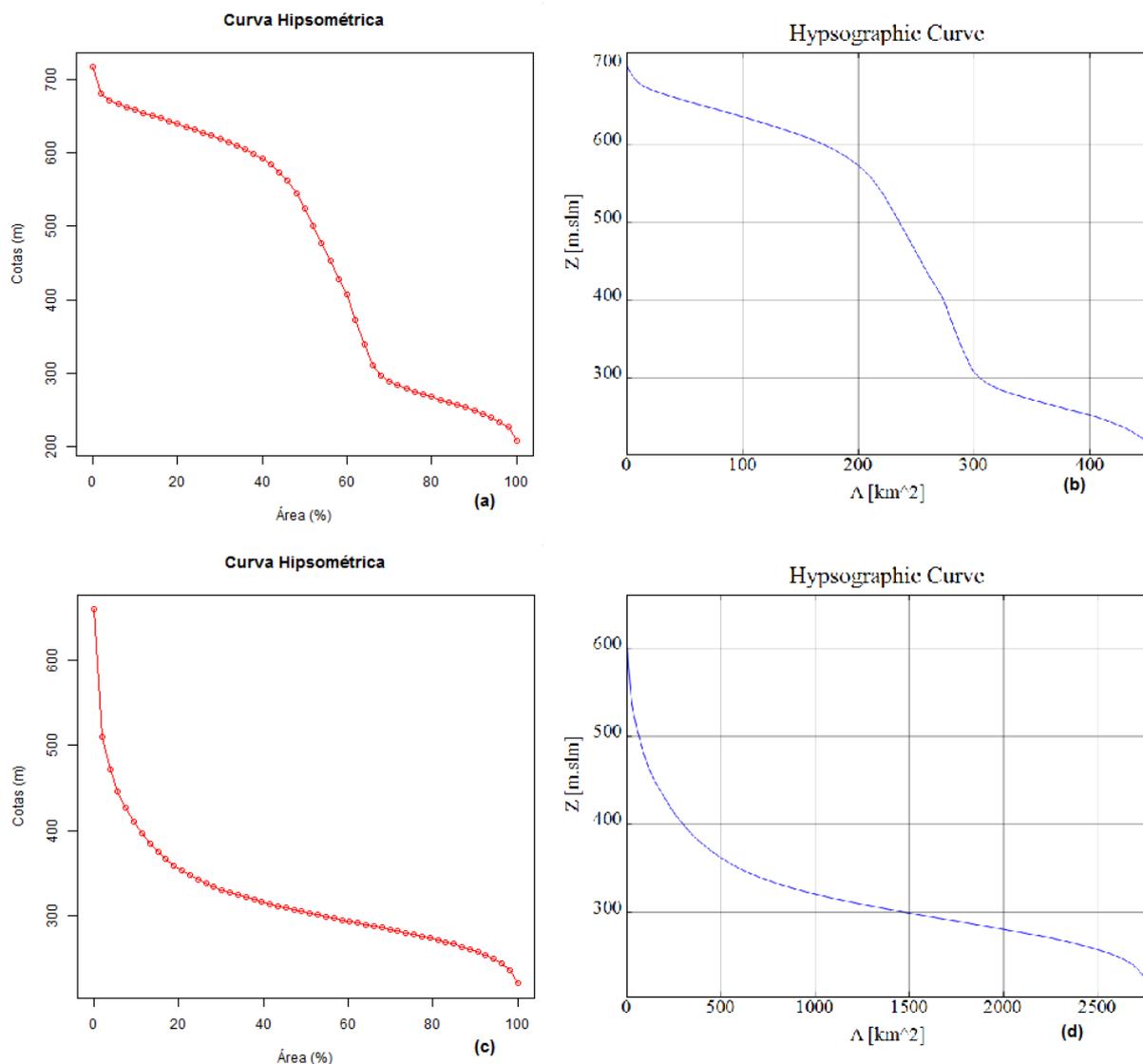


Fonte: o Autor.

6.4.3 Análise quanto à hipsometria

As curvas hipsométricas geradas automaticamente, tanto por r.basin quanto pela ferramenta proposta se apresentaram similares. Na figura 45 estão presentes as curvas hipsométricas para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu e para a bacia do ribeirão dos Mangues:

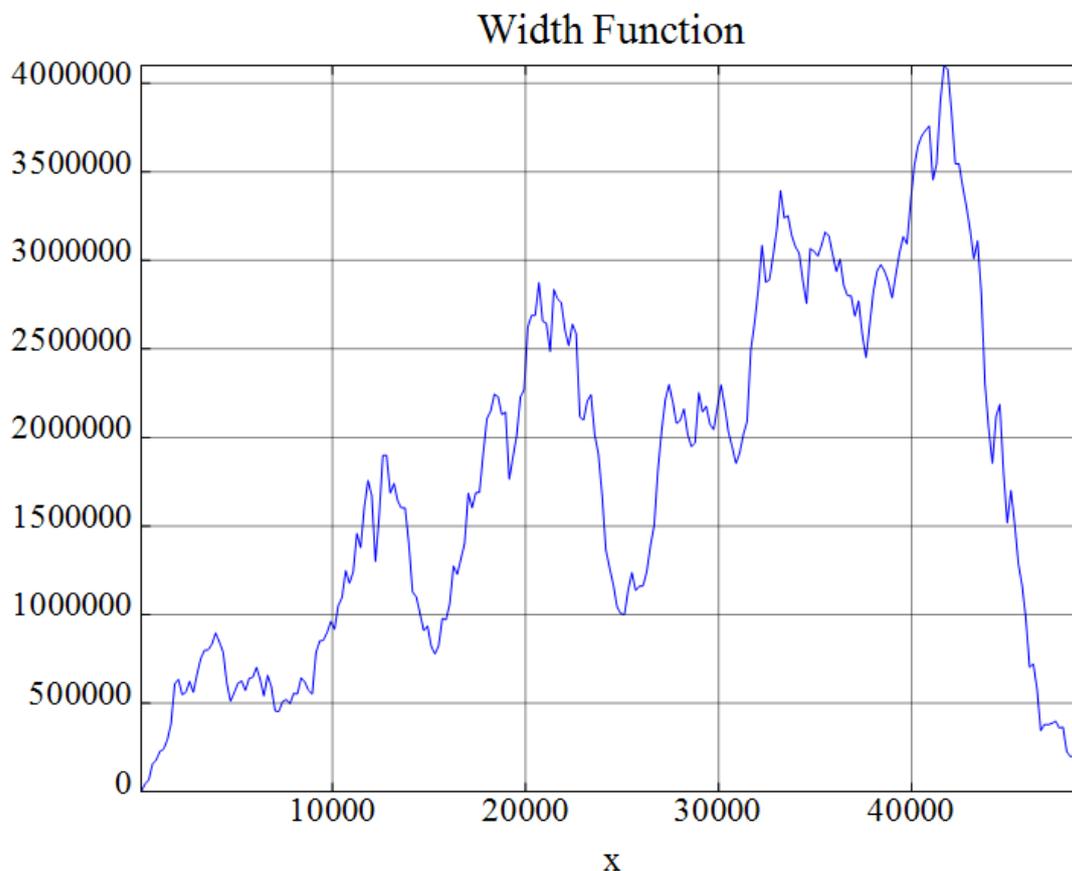
Figura 45 - Curva hipsométrica da sub-bacia do Ribeirão Taquaruçuzinho geradas automaticamente pela ferramenta proposta (a) e pelo programa r.basin (b). E curva hipsométrica gerada automaticamente para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues pela ferramenta proposta (c) e pelo programa r.basin (d).



Fonte: as figuras (b) e (d) foram geradas no programa r.basin no Grass GIS, OSGEO (2017).

O programa r.basin apresenta o gráfico *Width Function*, que relaciona o número de células do modelo que drenam para cada ponto do canal principal, esse produto se mostrou como um diferencial existente entre a duas ferremantas comparadas, conforme a figura 46.

Figura 46 - Gráfico gerado automaticamente por r.basin, demonstra o número de células que drenam para cada ponto do canal principal.



Fonte: Gerado no programa r.basin no GrassGIS, OSGEO (2017)

6.4.4 Comparação entre MDE's

A comparação a partir de diferentes MDE's foi realizada com o intuito de demonstrar a variação dos parâmetros morfométricos de uma bacia quando utilizado um ou outro MDE. O estudo comparativo foi realizado para as quatro bacias analisadas, apresentando resultados análogos. Os MDE's SRTM1, SRTM3 e ASTER apresentaram parâmetros morfométricos próximos. As maiores diferenças foram encontradas em relação ao MDE TOPODATA para as características morfométricas lineares. Estas diferenças podem ser conferidas na tabela 20, esta tabela relaciona os parâmetros: comprimento total dos cursos d'água (Lt), número total dos cursos d'água (Nt), comprimento dos canais de 1ª ordem (L1), número de canais de 1ª ordem (N1), textura topográfica (T) e coeficiente de manutenção (Cm); apenas em relação ao SRTM1, já que foi o MDE selecionado na validação hidrológica.

Da tabela 20, observou-se que não houve uma progressão ou regressão nas diferenças

em relação ao tamanho das bacias ou ao número de células do MDE. As diferenças tendem a se manter constantes, visto que o maior desvio padrão entre as diferenças se deu para o coeficiente de manutenção de 3,84%. Diante da tendência das diferenças permanecerem constantes independentemente do tamanho da bacia, será analisada de forma mais detalhada apenas a comparação para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu.

Foram utilizados os mesmos parâmetros de configuração na ferramenta propostas, $threshold = 5$ e $minslope = 0.0001$, para os quatro MDE's, SRTM1, SRTM3, TOPODATA e ASTERGEDEM. Na tabela 21 estão presentes as características morfométricas extraídas automaticamente para cada MDE, para a bacia do ribeirão Taquarussu.

Tabela 20 – Diferença percentual do MDE TOPODATA em relação ao SRTM1 para os parâmetros: Comprimento total dos cursos d'água (Lt), número total dos cursos d'água (Nt), comprimento dos canais de 1ª ordem (L1), número de canais de 1ª ordem (N1), textura topográfica (T) e coeficiente de manutenção (Cm).

Bacia	A (km ²)	Diferença					
		Lt	Nt	L1	N1	T	Cm
Curicaca	430	-25.37%	-44.20%	-28.56%	-44.39%	-41.29%	34.96%
Taquarussu	448	-26.42%	-37.28%	-30.62%	-37.86%	-31.86%	38.19%
Mangues	2751	-27.42%	-42.46%	-28.31%	-42.44%	-38.29%	35.84%
soninho	2932	-31.13%	-44.43%	-35.81%	-44.50%	-38.83%	44.78%
Média		-27.58%	-42.09%	-30.83%	-42.30%	-37.57%	38.44%
Desvio		±2.17%	±2.88%	±3.01%	±2.69%	±3.48%	±3.84%

Fonte: o Autor.

Tabela 21 - Comparação entre os parâmetros morfométricos gerados automaticamente pela ferramenta proposta em diferentes MDE's para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu. (*) Características com diferenças significativas.

Característica	unidades	SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER
Área	km ²	447.966	444.766	449.317	444.372
Perímetro *	km	150.930	151.637	138.940	150.121
Altitude máxima da bacia	m	716.728	711.643	715.220	711.332
Altitude mínima da bacia	m	206.623	209.003	207.654	209.003
Amplitude altimétrica	m	510.106	502.640	507.567	502.328
Comprimento ortogonal da bacia	m	33075.200	33227.200	33288.000	33257.600
Largura ortogonal da bacia	m	27086.400	27177.600	27116.800	27177.600
Centroide eixo X	m	807346.965	807488.061	807269.432	807503.756
Centroide eixo Y	m	8861624.882	8861565.664	8861607.560	8861525.430
Comprimento do maior segmento	m	4436.981	3803.797	3867.652	4488.244
Comprimento total dos cursos d'água *	m	539231.660	590498.753	391379.064	585497.966
Número de canais *	und	684.000	786.000	429.000	768.000
Densidade de drenagem	km/km ²	1.204	1.328	0.871	1.318
Ordem da bacia *	Adim.	6	6	5	6
Comp. canais de 1ª ordem *	m	299141.286	331995.388	207540.795	321539.144
Gradiente de canais do maior canal	m/km	43.635	43.545	43.072	43.626
Densidade hidrográfica	und/km ²	1.527	1.767	0.955	1.728

Característica	unidades	SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER
Num. canais 1ª ordem *	und	346.000	396.000	215.000	385.000
Coef. de torrencialidade	und/km ²	0.772	0.890	0.479	0.866
Extensão do percurso superficial	km	0.415	0.377	0.574	0.379
Comp. médio canais de 1ª ordem	m	864.570	838.372	965.306	835.167
Comp. médio canais de 2ª ordem	m	759.695	694.802	852.896	755.114
Relação Lm1/Lm2	Adim.	1.138	1.207	1.132	1.106
Textura topográfica *	und/km	4.532	5.183	3.088	5.116
Comp. médio dos canais	m	788.350	751.271	912.306	762.367
Coef. de manutenção *	m ²	830.748	753.204	1148.036	758.964
Comprimento linear da foz até a nascente mais distante	m	34464.766	34470.760Nn	33938.127	34482.418
Comprimento do canal principal *	m	48467.174	48331.192	45652.195	47745.845
Inclinação aparente do canal principal	%	0.971%	0.972%	1.012%	0.98%
Inclinação média do canal principal	%	0.583%	0.530%	0.596%	0.53%
Inclinação equivalente do canal principal	%	0.003%	0.002%	0.002%	0.00%
Índice de circularidade	Adim.	0.247	0.243	0.293	0.248
Relação de relevo	Adim.	0.015	0.015	0.015	0.015
Coef. de compacidade	Adim.	1.997	2.013	1.835	1.994
Fator de forma	Adim.	0.409	0.403	0.405	0.402
Forma da bacia *	Adim.	37.297	36.858	40.638	37.197
Declividade média da bacia	Graus	8.439	9.108	7.690	9.106
Declividade máxima da bacia	Graus	57.518	57.518	57.518	57.518
Declividade mínima da bacia	Graus	0.005	0.000	0.000	0.000
Índice de rugosidade *	Adim.	0.614	0.667	0.442	0.662
Coefficiente de rugosidade	km/km ²	0.003	0.004	0.002	0.004

Fonte: o Autor.

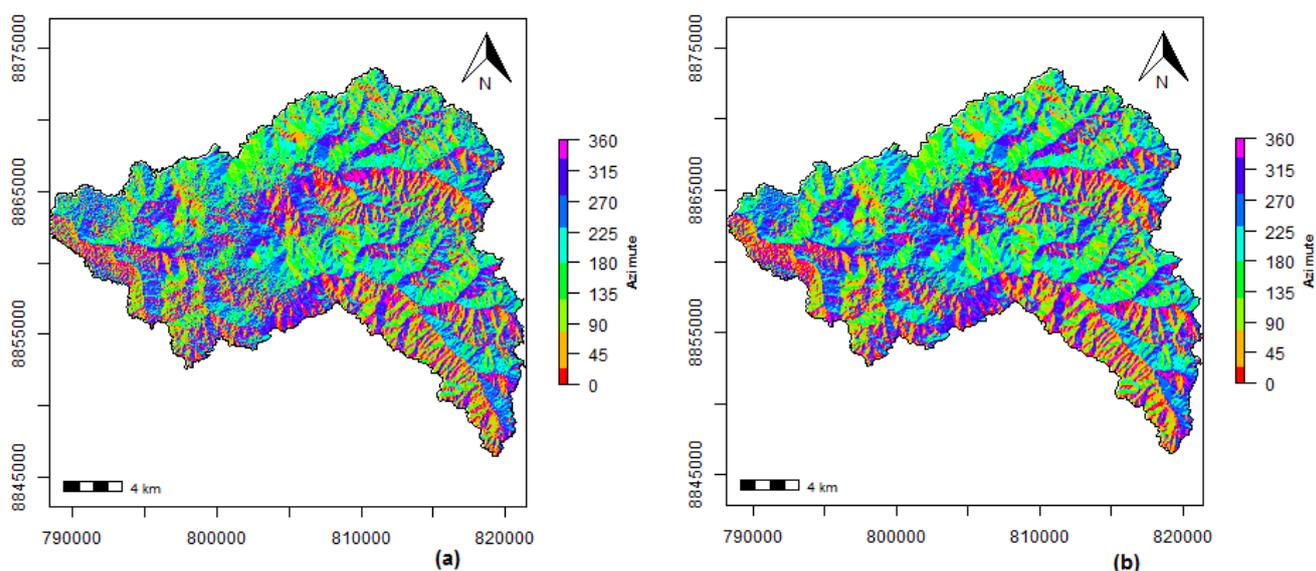
Da análise da tabela 21 observou-se que o MDE TOPODATA apresentou maior diferença em relação aos demais MDE's para algumas características, dentre elas pode-se destacar: número de canais, ordem da bacia, comprimento de canais de 1ª ordem, número de canais de primeira ordem, coeficiente de manutenção, comprimento do canal principal, forma da bacia e índice de rugosidade.

O MDE TOPODATA apresentou um detalhamento inferior para a rede de drenagem comparado com os outros MDE's. chegando a apresentar um número de canais 37 % menor do que para o SRTM1 e cerca de 45 % em relação aos MDE's ASTER e SRTM 3, o mesmo acontece para o número de canais de 1ª ordem gerado.

Analisando os mapas de direção de fluxo para a bacia do Ribeirão Taquarussu, figura 47, pode-se notar que para o MDE TOPODATA, as direções são mais bem definidas, uma vez que as mesmas são mantidas durante o processo de interpolação do SRTM3. Esse fato explica o menor número de canais de primeira ordem, que para SRTM1 onde existe uma agregação de

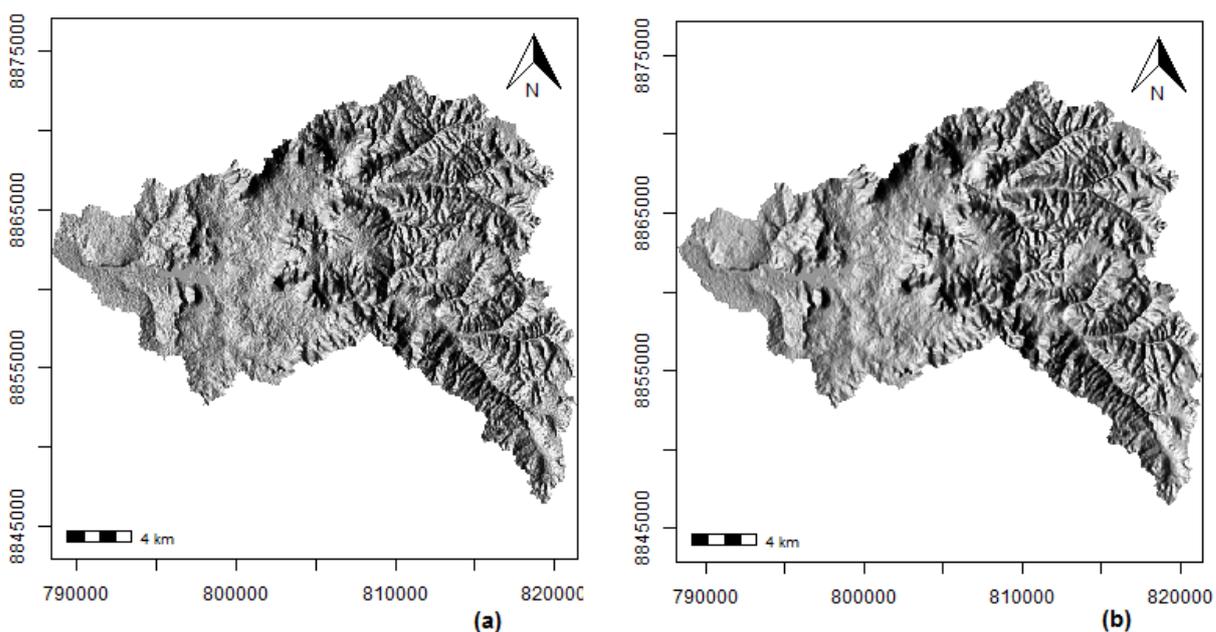
direções alternadas em áreas menores, o que propicia um maior número de canais de 1ª ordem comparadas ao TOPODATA. Isso pode ser percebido mais claramente, nos mapas de relevo sombreado na figura 48, onde é possível notar a maior definição do relevo para o mapa gerado a partir do SRTM1.

Figura 47 – Mapas de direção de fluxo para a bacia do Ribeirão Taquarussu a partir do MDE SRTM1 (a) e TOPODATA (b).



Fonte: o Autor.

Figura 48 – Mapas de relevo sombreado para a bacia do Ribeirão Taquarussu a partir do MDE SRTM1 (a) e TOPODATA (b).



Fonte: o Autor.

Para o MDE TOPODATA, o número de canais de primeira ordem não gerados influenciaram significativamente no valor do comprimento total de canais, afetando assim a densidade de drenagem, onde o MDE TOPODATA retornou valor de 0,871 km/km² para a sub-bacia do ribeirão Taquarussu, enquanto o SRTM1, SRTM3 e ASTER GEDEM retornaram os valores de 1,204; 1,328 e 1,318 respectivamente.

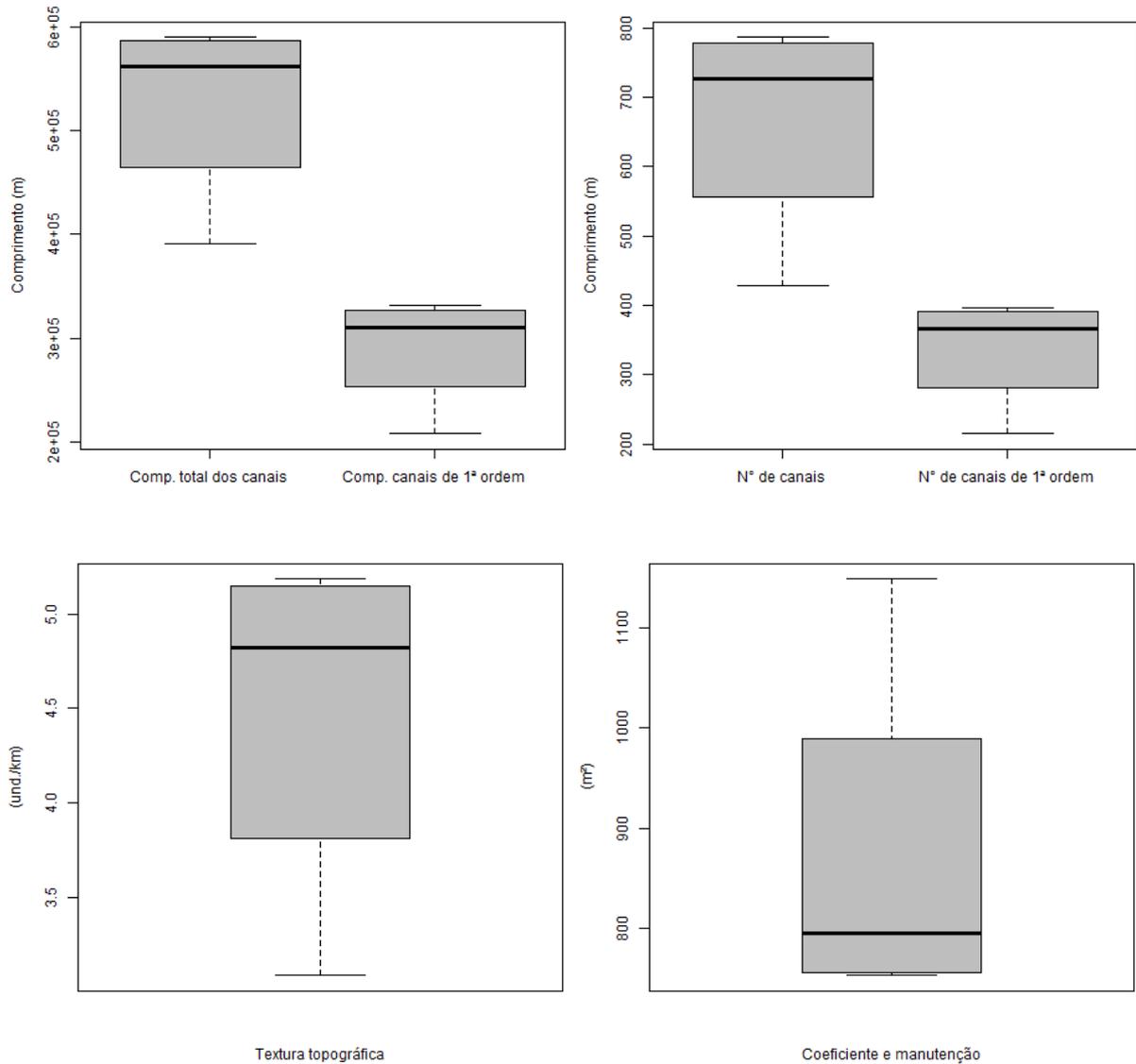
Em consequência da baixa densidade de drenagem apresentada pelo MDE TOPODATA, observou-se que o coeficiente de manutenção de 1148 m² foi relativamente superior aos MDE's SRTM1, SRTM3 e ASTER cujos coeficientes de manutenção são respectivamente: 830 m², 753 m² e 759 m². Isso implica que o MDE TOPODATA necessita cerca de 300 a 400 m² a mais de área necessária para manter o escoamento em 1 metro de canal. Induzindo a concluir precipitadamente, que do ponto de vista hidrológico as bacias delimitadas através do MDE TOPODATA seria menos susceptível a enchentes.

Outro parâmetro que chama a atenção é a textura topográfica, que indica o quão espessos são os canais da bacia hidrográfica. Quando gerada a partir do MDE TOPODATA, a textura topográfica é classificada como grosseira, já que o valor da textura topográfica calculado é menor que 4. Agora, quando calculada a partir dos demais MDE's, a textura topográfica é classificada como média.

Por fim, o MDE TOPODATA apresentou discrepâncias em relação aos parâmetros lineares das bacias. Quanto aos demais MDE's, não foram notadas diferenças significativas nos parâmetros morfométricos gerados automaticamente pela ferramenta proposta.

No gráfico 08, estão representados em boxplots a variabilidade verificada nos parâmetros lineares da bacia quando delimitada a partir do MDE TOPODATA, considerando os mesmos parâmetros de configuração para delimitação a partir dos MDE's SRTM1, SRTM3 e ASTER. A conclusão que se tira do gráfico 08, é que os valores dos parâmetros obtidos através do MDE TOPODATA são sempre os mais afastados da mediana de forma assimétrica, sendo representados pelo valor mínimo dos boxplot's para o comprimento de canais de 1ª ordem, comprimento total dos canais, número total de canais, número total de canais de primeira ordem e textura topográfica e sendo representado pelo valor máximo para o coeficiente de manutenção.

Gráfico 8 - Variabilidade dos parâmetros lineares (Comprimento total dos canais, comprimento dos canais de 1ª ordem, textura topográfica e coeficiente de manutenção) obtidos automaticamente pela ferramenta proposta, para o MDE TOPODATA, em relação aos MDE's SRTM1, SRTM3 e ASTER.



Fonte: o Autor.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho concentrou esforços para materializar o objetivo geral pretendido, apresentando processos e métodos que permitiram a elaboração de uma ferramenta computacional que condensasse todos os procedimentos necessários para delimitação, extração da rede de drenagem e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas. A fim de avaliar a aplicabilidade da ferramenta proposta, foi realizado um estudo de caso em quatro sub-bacias distintas utilizando os MDE's SRTM1, SRTM3, TOPODATA e ASTER, sendo então analisados os resultados obtidos, convergindo para a conclusão do trabalho.

A ferramenta elaborada apresentou resultados satisfatórios, proporcionando economia de tempo com a automatização das tarefas necessárias para o procedimento proposto. São gerados diversos produtos que servirão para concluir sobre os aspectos hidrológicos das bacias hidrográficas, auxiliando na gestão ambiental, além de fornecer dados necessários para subsidiar a definição da vazão de projeto para dimensionamento de obras hídricas.

A ferramenta proposta calcula automaticamente 43 características morfométricas, além dos mapas de elevação, aspecto, declividade, relevo sombreado, planialtimétrico e gráficos da curva hipsométrica, perfil longitudinal do canal principal, inclinações média, equivalente e aparente. A utilização da linguagem computacional R, para elaborar o algoritmo de caracterização morfométrica das bacias, favorecerá para que ferramenta proposta seja facilmente incrementada no futuro com mais características, ou que a ferramenta seja adaptada para um fim específico.

Por outro lado, a utilização da linguagem R para o processamento, apresentou problemas de *Big Data* para carregar cartas inteiras de MDE's TOPODATA para hardwares de até 4 gb de memória ram. Para importar o MDE TOPODATA que tem em média tamanho de 60 mb, hardwares de até 4 gb não conseguiram alocar memória ram suficiente para o processo de importação e reprojeção do MDE. Já hardwares com 8gb de memória ram, não apresentaram problemas para alocar cartas inteiras do MDE TOPODATA. Contudo, para os hardwares inferiores a 4 gb de ram, esse problema pode ser contornado, extraindo recorte da área de interesse do MDE com o auxílio de algum software SIG, diminuindo o volume de dados a serem alocados e também o tempo de processamento.

Quando comparada com a ferramenta *r.basin* para Grass GIS sob os mesmos parâmetros

de configuração, a ferramenta proposta se mostrou menos eficiente em relação ao detalhamento dos canais de 1ª ordem. Isso é atribuído aos diferentes algoritmos utilizados para eliminar os dados espúrios dos MDE's. No entanto, para a ferramenta proposta isso não se mostrou um problema, visto que maiores detalhamentos da rede de drenagem podem ser obtidos ajustando os parâmetros de configuração, *threshold* e *minslope*.

Foi feita uma análise comparativa dos resultados para os MDE's SRTM1, SRTM3 TOPODATA e ASTER. O MDE TOPODATA apresentou discrepâncias em relação aos parâmetros lineares das bacias. Quanto aos demais MDE's, não foram notadas diferenças significativas nos parâmetros morfométricos gerados automaticamente pela ferramenta proposta. Isso pode ser explicado devido a baixa resolução espacial vertical atribuída ao MDE TOPODATA, já que o processo de derivação estatística do SRTM1 não retoma suas características originais.

Apesar dos parâmetros morfométricos se apresentarem próximos para a maioria dos MDE's, os mesmos devem passar por validação hidrológica quanto à verificação da existência de tendências, Erro Médio Quadrático e quanto ao atendimento aos Parâmetros Cartográficos Nacionais. Esse procedimento visa limitar a escala de utilização dos MDE's. Para isso utilizou-se da coleta de pontos de controle a partir de dados altimétricos de GPS geodésico obtidos no SIGEF.

Os dados do SIGEF, mostraram-se ser uma boa opção para a coleta de pontos de controle para fins de validação hidrológica de Modelos Digitais de Elevação. No entanto deve-se verificar a ausência de erros ou a veracidade dos dados coletados no SIGEF, visto que o sistema não está completamente imune a erros de preenchimento da planilha de certificação pelo profissional responsável pelo georreferenciamento. Conforme a figura 30, cada vértice do polígono georreferenciado conta com a informação dos valores de desvios padrão (σ) indicados com duas casas decimais, em metros, tanto para as coordenadas planimétricas quanto para a altitude. Essas informações devem ser levadas em consideração na coleta dos pontos de controle.

Para as bacias em estudo, notou-se que a utilização dos MDE's: SRTM1, SRTM3, TOPODATA e ASTER GEDEM não cumpriram em sua totalidade os Parâmetros de Exatidão Cartográficos necessários para escalas maiores que 1:50.000. Mas apresentaram resultados satisfatórios para escalas de 1:100.000 classe A.

Por fim, a delimitação e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, deve ser precedida de validação hidrológica prévia para determinação da escala e escolha do melhor MDE. A existência de uma ferramenta que automatiza o processo de delimitação e caracterização morfométrica de bacias, permite ao usuário aplicar o método para todos os MDE's e poder concluir qual modelo mais se adequaria às suas necessidades.

Os métodos apresentados para elaboração da ferramenta proposta, utilizando ferramentas gratuitas e de código aberto, permitem que sejam personalizados de acordo com as necessidades do usuário, podendo alterar os formatos dos arquivos de saída no código fonte – converter arquivos de *shape* para *dxf* por exemplo – e implementar novos resultados. Isso garante o acesso a todos e o desenvolvimento crescente da ferramenta, abrindo novas perspectivas neste campo de pesquisa.

8 TRABALHOS FUTUROS

8.1 Primeira proposta

Elaborar estudo sobre a precisão e acurácia dos MDE's ASTER, SRTM, ALOS PALSAR (*Advanced Land Observation Satellite, res. 12 m*) e AW3D30 (*Advanced Land Observation Satellite World 3D res. 30m*) para o território do estado do Tocantins. Utilizando cerca de 2000 pontos amostrais com altitudes reais, coletados dos vértices dos imóveis georreferenciados no SIGEF. O estudo será baseado na metodologia do USGS, para avaliação dos MDE's ASTER para o território dos Estados Unidos, aplicada por Gesch et al. (2012).

8.2 Segunda proposta

Desenvolver método, para ajustar a extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação globais (gratuitos) de forma que propicie similiação com o número de nascentes perenes, ou número de canais de 1ª ordem com origem nessas nascentes, já que nos modelos, todo local onde há um acúmulo de água é considerado um curso d'água, independente da época do ano. Com o intuito de contribuir com valores adequados do parâmetro densidade de drenagem (Dd) a ser incrementado em modelos de regressão para representação da vazão específica mínima, muitas vezes utilizada como base em processos de outorga.

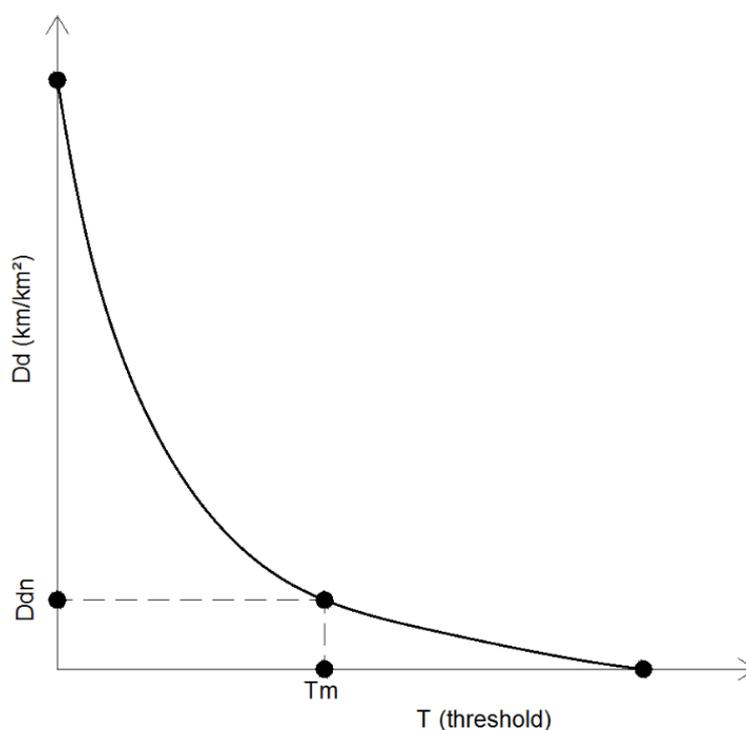
Este procedimento pode ser configurado variando o valor do *threshold*, o que aumenta ou diminui o número de canais de 1ª ordem. Pretende-se fazer esse ajuste comparando com drenagens oriundas de cartas topográficas em escalas de 1:50.000, onde é possível considerar apenas as drenagens com nascentes perenes. O ajuste será realizado à medida que se observa a variação dos valores das declividades e parâmetros hipsométricos de bacias hidrográficas. Em síntese, serão avaliadas as drenagens de uma quantidade amostral de bacias, e verificar se existe correlação entre os valores das declividades e hipsometria das bacias, no processo de extração de canais de primeira ordem.

O gráfico da figura 49, representa uma relação hipotética entre a densidade de drenagem e o valor do *threshold* ajustado na ferramenta computacional elaborada, para uma bacia com uma determinada declividade média, observa-se que quanto maior o *threshold* menor será a densidade de drenagem. Este gráfico tende a aumentar os valores da densidade de drenagem para os mesmos *thresholds* conforme aumenta-se a declividade média da bacia.

Haverá sempre um *threshold* que corresponderá com a densidade de drenagem que consideram apenas canais de 1ª ordem que se originam em nascentes perenes, essa densidade de drenagem foi representada no gráfico da figura 49 como “Ddn”, e o seu *threshold* correspondente de “Tm”. Portanto espera-se estimar através de um modelo matemático o *threshold* que melhor representa a densidade de drenagem “Ddn”.

Essa pesquisa tem boas possibilidades de retornarem resultados satisfatórios, visto que com a ferramenta computacional elaborada, o tempo necessário para realizar as simulações numa grande amostra de bacias hidrográficas será bastante reduzido comparado com os métodos semiautomáticos diretamente em softwares SIG, para delimitação e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas comumente utilizados.

Figura 49 – Gráfico da Densidade de drenagem (Dd) x *threshold* (T), para uma determinada declividade média de uma bacia.



Fonte: o Autor.

9 REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E. **Delimitação de bacias via SRTM**. Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente. 2014.
- ALMEIDA, I. K. et al. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, Novembro 2013.
- ALVES SOBRINHO, T. et al. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Eng. Agríc.**, Joboticabal, v. 30, n. 1, p. 46-57, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n1/a05v30n1>>. Acesso em: 6 Maio 2018.
- ANIDO, N. **Caracterização hidrológica de uma micro bacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz. São Paulo. 2002.
- BARBOSA, M. E. F.; FURRIER, M. Caracterização geomorfológica com apoio de índices morfométricos: o estudo de caso da bacia do rio Guruji. **Cadernos do Logepa**, v. 6, n. 1, 2011.
- BARROS, L. L.; STEINKE, V. A. Análise morfométrica automatizada para bacia do Rio Maranhão. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Abril 2009.
- BEELEY, C. **Web application development withy R using shiny**. Packt Publishing Ltd: [s.n.], 2013. 110 p.
- BORGES JUNIOR, C. R. **Incertezas perante o georreferenciamento de imóveis rurais e a retificação extrajudicial**. Uberlândia: Programa de pós-graduação em geografia da Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- BOSQUILIA, R. W. D. et al. Comparação entre modelos de mapeamento automático de drenagens utilizando SIG. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu -PR, Abril 2013.
- BRASIL. Lei 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Const. Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Janeiro 1997. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=370>>. Acesso em: 2 Maio 2016.
- BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 que Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d89817.htm>. Acesso em: 7 dezembro 2017.
- BRENNING, A. Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. **Hamburger Beitrage zur Physischen Geographie und Landschaftsoekologie**, v. 19, p. 23-32, 2008.
- BRENNING, A.; BANGS, D. Package ‘RSAGA’, 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/RSAGA/RSAGA.pdf>>. Acesso em: 16 Março 2017.
- BRIGANTE, J.; ESPÍNDOLA, E. **Limnologia fluvial, um estudo no rio Mogi-Guaçu**. São Carlos: Editora Rima, 2003.
- BROCHADO, G. T. **Atenuação do efeito de desflorestamento em dados SRTM por meio de**

diferentes técnicas de interpolação. São José dos Campo: Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE - Dissertação, 2015.

BRUBACHER, J. P. et al. Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba-PR, 2011.

BRUNO, L. O. GRASS: A free and open source solution for hydrographic body analysis. **Nativa, Sinop**, v. 5, n. 1, p. 24-30, jan-fev 2017.

BUARQUE, D. C. et al. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Abril/Junho 2009.

BUARQUE, D. C.; PAZ, A. R.; COLLISHONN, W. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. **Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**, Rio de Janeiro, 2008.

CAMOLEZI, B. A.; FORTES, E.; MANIERI, D. D. Controle estrutural da rede de drenagem com base na correlação de dados morfométricos e morfoestruturais: o caso da bacia do ribeirão São Pedro -Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2012.

CARDOSO, C. A. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **R. Árvore**, Viçosa-MG, 2006. 241-248.

CARDOSO, M. R. et al. Análise hipsométrica da parte brasileira da bacia do rio Paraguai utilizando dados SRTM. **Anais 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Bonito-MS, Outubro 2012.

CARTA Europeia da Água in Artigos de apoio Infopédia, Estrasburgo, 1968. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/\\$carta-europeia-da-agua](https://www.infopedia.pt/$carta-europeia-da-agua)>. Acesso em: 30 Janeiro 2017.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. **Hidrologia**. Apostila da disciplina IT-156/Hidráulica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. [S.l.]. 2003.

CARVALHO, E. L.; MIRANDA, D. A importância da bacia hidrográfica como unidade de planejamento para a gestão ambiental integrada. **Centro Universitário Leonardo da Vinci-UNIASSSELVI**, Agosto 2009. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/artigos>>. Acesso em: 26 Janeiro 2017.

CARVALHO, T. M.; CARVALHO, C. M. Sistemas de informações geográficas aplicadas à descrição de habitats. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, Maringá, v. 34, n. 1, p. 79-90, Jan-Jun 2012.

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo - GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Revista Scientia Plena**, v. 5, n. 2, 2009.

CATALUNHA, M. J. **Sistema integrado em rede para gestão do uso múltiplo da água e regionalização da Q7,10 para os períodos mensal, bimestral, trimestral e anual**. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Viçosa, p. 145. 2004.

CAVALLARI, R. et al. A importância de um sistema de informações geográficas no estudo de micro bacias hidrográficas. **Revista Científica eletrônica de Agronomia**, Garça-SP, v. Ano VI, N° 11, 2007.

CHARIM. **Caribbean handbook on risk information management**, 2018. Disponível em: <<http://www.charim.net/datamanagement/32>>. Acesso em: 10 Abril 2018.

CHAVES, A.; NETO, J. L. S. Uma Análise de Causa e Efeito da Questão Ambiental do Ribeirão Taquaruçuzinho. **Gestão das Unidades de Conservação do Tocantins**, Palmas, Outubro 2009. Disponível em: <http://www.gesto.to.gov.br/site_media/upload/gestao/documentos/Projeto_Catolica-TO__Uma_Analise_de_Causa_e_Efeito_da_Questao_Ambiental_do_Ribeirao_Taquarucuzinho.pdf>. Acesso em: 6 Dezembro 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª. ed. São Paulo: Edigard Blucher, v. único, 1980.

CUARTERO, A.; FELICÍSIMO, A. M.; ARIZA, F. J. Accuracy, Reliability, and Depuration of SPOT HRV and Terra ASTER Digital Elevation Models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 2, Fevereiro 2015. ISSN 0196-2892. Disponível em: <http://www.academia.edu/5534128/Accuracy_Reliability_and_Depuration_of_SPOT_HRV_and_Terra_ASTER_Digital_Elevation_Models>. Acesso em: 7 Maio 2018.

CURTARELLI, M. P. SIG aplicado à caracterização morfométrica de bacias hidrográficas – estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Cubatão do Sul – Santa Catarina/Brasil. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, p. 4693-4699, Abril 2009.

CUSTÓDIO, H. Princípios constitucionais da proteção das águas e da saúde pública. **Revista de Direito Sanitário**, v. 3, n. 1, Março 2002.

DI FRANCO, L.; CUELLO, A.; SERAFINI, M. C. Parametrización de la cuenca hidrográfica del río Luján, Argentina, basada en Geomática. **XV Symposium SELPER**, 2012. Disponível em: <http://www.selperbrasil.org.br/selper2012/PDF/FP_SELPER-215.pdf>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.

DIAS, F. et al. Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em Diferentes Configurações Topográficas para Médias e Pequenas Escalas. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, p. 4110-4117, maio 2011.

ELESBON. Comparação morfométrica utilizando plataforma SIG a partir de base de dados SRTM e IBGE para a bacia hidrográfica do rio Pancas, ES. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves – RS, 2013.

ESRI. ArcMAP. **ArcGIS for desktop**, 2016. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/coverage-toolbox/how-simplify-line-or-polygon-works.htm>>. Acesso em: 13 Fevereiro 2018.

ESRI. Simplify Line. **ArcGIS Pro**, 2017. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/proapp/tool-reference/cartography/simplify-line.htm>>. Acesso em: 13 Fevereiro 2018.

ESRI. How Flow Accumulation works. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/en/proapp/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2017.

ESRI. How Flow Direction works. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/proapp/toolreference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2017.

FARIA, V. G. et al. Avaliação de modelos numéricos do terreno na extração automática de redes de drenagem com SIG. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Abril 2015.

- FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996.
- FELTRAN FILHO, A.; LIMA, E. F. Considerações morfométricas da bacia do rio Uberabinha – Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, n. 19, Junho 2007.
- FERREIRA, C. W. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do açude cachoeira II, no município de Serra Talhada-PE, Brasil. **VI Seminário Latino Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero Americano de Geografia Física**, Coimbra, Maio 2010.
- FURNANS, J. E. **Topologic Navigation and the Pfafstetter System**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia) - The University of Texas. Austin, p. 214f. 2001.
- FURZE, S.; OGILVIE, J.; ARP, P. A. Fusing Digital Elevation Models to Improve Hydrological Interpretations. **Journal of Geographic Information System**, n. 9, p. 558-575, 2017. ISSN 2151-1950.
- GESCH, D. et al. validation of the ASTER global digital elevation model version 2 over the conterminous United States. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress**, Melbourne, v. 25, Setembro 2012. Disponível em: <<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B4/281/2012/isprsarchives-XXXIX-B4-281-2012.pdf>>. Acesso em: 9 Maio 2018.
- GNADILINGER, J. A declaração de Dublin sobre a água e o desenvolvimento sustentável, Dublin, Irlanda, 31 de janeiro de 1992 - Tradução do original em inglês, 2017. Disponível em: <http://www.abcmac.org.br/files/downloads/declaracao_de_dublin_sobre_agua_e_desenvolvimento_sustentavel.pdf>. Acesso em: 30 Janeiro 2017.
- GOERGEN, L. C. D. G.; SCHUH, M. S.; PEREIRA, R. S. Comparação entre a delimitação manual e automática da bacia do Arroio Curupá, RS, Brasil. **Rev. Elet. Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 8, n. 8, p. 777-1784, 2012. ISSN 2236-1170. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314931246_COMPARACAO_ENTRE_A_DELIMITACAO_MANUAL_E_AUTOMATICA_DA_BACIA_DO_ARROIO_CORUPA_RS_BRA_SIL>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.
- GRANZIERA, M. **Direito de Águas e Meio Ambiente**. São Paulo: Ícone, 1993.
- GRIBBIN, J. E. **Introdução a hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. 4ª edição Norte-Americana. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Tradução.
- GROHMANN, C. H. Morphometric analysis in Geographic Information Systems: applications of free software GRASS and R. **Computers & Geosciences**, v. 30, p. 1055-1067, Agosto 2004.
- GUERRA, A. J.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**, Bertrand-RJ, p. 337-339, 1996.
- HAMEID, N. A.; BANNARI, A.; KADHEM, G. Absolute surface elevations accuracies assessment of different DEMs using ground truth data over kingdom of Bahrain. **Journal of Remote Sensing & GIS**, v. 5, n. 2, Maio 2016. Disponível em: <<https://www.omicsonline.org/open-access/absolute-surface-elevations-accuracies-assessment-of-different-dems-using-ground-truth-data-over-kingdom-of-bahrain-2469-4134-1000166.pdf>>. Acesso em: 07 Maio 2018.
- HENGL, T. et al. On the uncertainty of stream networks derived from elevation data: the error

propagation approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, 2010.

IBGEO. Acervo Fundiário. Disponível em: <<http://acervofundiario.incra.gov.br>>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm>>. Acesso em: 6 dezembro 2017.

ISHIKAWA, M. I. **Georreferenciamento em imóveis rurais: Métodos de levantamentos na aplicação da Lei 10.267/2001**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Tese, 2007.

JACON, A. D. **Condicionamento hidrográfico em Modelos Digitais de Elevação: procedimentos e importância**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. [S.l.]. 2014.

JARGAS, A. M. **Shell script profissional**. São Paulo: Novatec, 2008.

JARGAS, A. M. **Expressões Regulares - Uma abordagem divertida**. 5ª. ed. São Paulo: Novatec, v. único, 2016.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation model data for geographic information system analysis. **Photogram. Engr. and Remote Sens**, v. 54, p. 593-1600, 1988.

LANDAU, E.; GUIMARÃES, D. Análise comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM e TOPODATA. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Curitiba-PR, 2011.

LEMO, M. C.; SOUZA, S. F.; ROCHA, R. Avaliação da qualidade dos dados altimétricos derivado do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM): Resultados preliminares. **I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias**, Recife, 2004.

LIMA, A. G. Índice de gradiente de canal: significados e diretrizes para aplicação. **Geosul**, Florianópolis, v. 28, n. 56, p. 147-162, julho/dezembro 2013.

LIMA, M. I. C. **Análise de drenagem e seu significado geológico-geomorfológico**. 3ª. ed. Belém-PA: [s.n.], 2006. Apostila.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2ª. ed. Piracicaba: USP, 2008. Disponível em: <<http://www.ipef.br/hidrologia/hidrologia.pdf>>. Acesso em: 30 Abril 2018.

MACÊDO, R. J.; FLOQUET, S. Análise digital de terreno utilizando a linguagem computacional R: Exemplo de aplicação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, p. 443-463, Junho 2017. ISSN 2236-5664.

MACHADO, G.; SOUZA, J. O. P. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Chôco – Ibaiti – PR. **Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina, Universidade de São Paulo**, Março 2005.

MACHADO, R. A. et al. Análise morfométrica de bacias hidrográficas como suporte definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Curitiba, Maio 2011.

MARCHETTI, D. A. B. Características da rede de drenagem e formas de relevo em três unidades de solo e Piracicaba, SP. **Pesq. agropec. bras**, Brasília, Julho 1980.

MARCUZZO, F. F. N. et al. Detalhamento hidromorfológico da bacia do Rio Paraíba. **XI**

Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João pessoa, Paraíba, Novembro 2012.

MARGHERITA, D. L.; MASSIMO, D. S. An Open-Source Approach for Catchment's Physiographic Characterization. **Fall Meeting**, San Francisco, 09-13 Dezembro 2013.

MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/2, p. 137-151, Agosto 2009. ISSN 0560-4612. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/347>>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. Modelos digitais de elevação na delimitação automática das sub-bacias do rio Taquari-Antas no Rio Grande do Sul. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, abril 2015.

MENEZES, N. N. C. **Introdução à programação com Python Algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. 2ª. ed. São Paulo: Novatec, v. único, 2014.

MICELI, B. S. et al. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/01, 2011.

MIOTO, C. L. et al. Morfometria de Bacias Hidrográficas Através de SIGs Livres e Gratuitos. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 37, n. 2, p. 16-22, 2014. ISSN 0101-9759.

NASCIMENTO, F. R. **Bacias hidrográficas intermitentes sazonais e potencialidades hidroambientais no nordeste setentrional brasileiro**. Universidade Federal Fluminense. [S.l.]. 2014.

NETELER, M. SRTM and VMAP0 data in OGR and GRASS. **GRASS-News**, v. 3, p. 2-6, Junho 2005. ISSN 1614-8746.

NUNES, F. G. et al. Propriedades morfométricas e aspectos físicos da bacia hidrográfica do rio Atuba: Curitiba-Paraná. **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Goiânia, 2006.

OLIVEIRA, A. N. et al. Delimitação automática de bacias de drenagens e análise multivariada de atributos morfométricos usando modelo digital de elevação hidrológicamente corrigido. **Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 8**, v. 1, 2007.

OLIVEIRA, G. D. C. **Precisão de modelos digitais de terreno, mapeamento automático de APPS em topos de morros e a eficácia do novo código florestal**. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Viçosa_MG. 2015.

ORTEGA, D. J. Avaliação dos efeitos das atividades antrópicas na bacia hidrográfica do córrego do Ipê, município de Ilha Solteira-SP. **Dissertação - Pós-Graduação em Engenharia – UNESP**, Ilha Solteira-SP, Outubro 2011.

OSGEO. Manual R.basin.py. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass64/manuals/addons/r.basin.py.html>>. Acesso em: 14 Março 2017.

PENHA, T. V.; NEVES, O. M. S. Avaliação da delimitação automática de sub-bacias utilizando a ferramenta ArcSWAT. **nais 4º Congresso Brasileiro de Geoprocessamento**, Rio de Janeiro, 2013.

PEREIRA, H. L. **Uma análise comparativa da delimitação e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas a partir dos modelos digitais de elevação, SRTM e TOPODATA, utilizando o SIG Quantum GIS**. Trabalho de conclusão de curso, UCAM. Coronel Fabriciano-

MG. 2014.

PERINE, Á. B. et al. Modelos Digitais de Elevação no mapeamento de suscetibilidade de inundação no município de Pedro Osório/RS. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu-PR, abril 2013.

PERONDI, D. et al. Uma solução computacional de aquisição, tratamento, armazenamento, disponibilização e apresentação de dados meteorológicos. **X Congresso Brasileiro de Agroinformática**, Outubro 2015.

PESTANA, A. **Elementos de Topografia**. [S.l.]: [s.n.], v. 1.20, 2006.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v. 46, p. 159-176, 2001.

POLETO, L. J. et al. Validação de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC). **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife-PE, p. 0000-0000, setembro 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/297001154_VALIDACAO_DE_MODELO_DIGITAL_DE_ELEVACAO_HIDROLOGICAMENTE_CONSISTENTE_MDEHC>. Acesso em: 07 dezembro 2017.

PORTO, M.; PORTO, R. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

PORTO, R. L. L. **Bacias hidrográficas**. Apostila, Disciplina PHD 307-Hidrologia Aplicada, Departamento de Engenharia Agrícola e Sanitária, Escola Politécnica da USP. São Paulo. 1999.

PRATES, I. Dados SRTM com resolução espacial de 30 m são disponibilizados. **Site MundoGeo**, Setembro 2014. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2014/09/25/dados-srtmcom-resolucao-espacial-de-30-m-sao-disponibilizados/>>. Acesso em: 15 fevereiro 2017.

PRINA, B. Z.; TRENTIN, R. GPS x GNSS: Constelação GLONASS maximizando a precisão e acurácia dos dados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 344–352, mai-ago 2015. ISSN 2236-1170.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project**, 2018. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>. Acesso em: 18 Abril 2018.

R. The R Project for Statistical Computing. **r-project**, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.

RABELO, A. B.; MANSO, F. F. **O Planímetro e o Teorema de Green**. EEUFMG, Departamento de Matemática – ICEx – UFMG, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais. [S.l.]. 2004.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. **Anais X SBSR**, Foz do Iguaçu, p. 485-492, 2001. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/43785054>>. Acesso em: 4 Fevereiro 2018.

RESNIZKY, H. G. **Learning Shiny**. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, v. I, 2015. 246 p.

RIBEIRO, H. **Análise da Consistência de dados hidrológicos a partir de diferentes modelos digitais do terreno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2015.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 9ª. ed. São Paulo: Contexto, 2017.

- RSAGA. SAGA Geoprocessing and Terrain Analysis in R. **cran.r-project**, 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/RSAGA/index.html>>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.
- RUSSEL, M. RPy2: Combining the Power of R + Python for Data Science. Disponível em: <<http://blog.yhat.com/posts/rpy2-combing-the-power-of-r-and-python.html>>. Acesso em: 15 Março 2017.
- SAGA-GIS. **SAGA, System for Automated Geoscientific Analyses**. Disponível em: <<http://www.saga-gis.org/>>. Acesso em: 16 março 2017.
- SAGA-GIS. SAGA, System for Automated Geoscientific Analyses. **SAGA**, 2017. Disponível em: <<http://www.saga-gis.org>>. Acesso em: 16 Março 2017.
- SALAMUNI, E. Morfotectônica da bacia sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, 2004.
- SALLES, M. M. **O uso do SIG na análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio São João**. XII curso de especialização em Geoprocessamento. Instituto de Geociências – UFMG, monografia. [S.l.]. 2010.
- SANTANA, T. A. et al. Avaliação dos operadores de generalização geométrica simplificação e suavização no processo de comunicação cartográfica: análise da representação hidrográfica nas cartas topográficas. **Revista Brasileiro de Geomática**, Curitiba, v. 5, n. 4, p. p. 484-503, out./dez 2017. ISSN 2317-4285.
- SANTIAGO, M. M. **Análise do erro altimétrico do MDE ASTER-2 na declividade**. Dissertação, Universidade Federal do Pernambuco. Recife. 2013.
- SANTILLI, J. A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433/97) e sua implementação no Distrito Federal. **Revista de Direito Ambiental**, São Paulo, v. 6/24, out-dez 2001.
- SANTOS et al. Análise hidrológica e socioambiental da bacia hidrográfica do córrego Romão dos Reis, Viçosa-MG. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, p. 931-940, 2007.
- SANTOS, A. M. et al. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 3, 2012.
- SANTOS, V. S.; BEHLING, A. A. Hierarquização da Rede de Drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, localizada no oeste do estado do Rio Grande do Sul. Gramado. **XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia**, 2014.
- SÃO PAULO. Lei Nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991, Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos, São Paulo, Dezembro 1991. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1991/lei-7663-30.12.1991.html>>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.
- SCARTAZZINI, L. S.; SILVA, J. T. V. D.; CONSUL, R. D. Á. Metodologias para determinar áreas em superfícies irregulares no ensino da geometria aplicando a proporcionalidade. **Actascientiae**, Canoas, v. 7, p. 65-74, Jul-Dez 2005.
- SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. **Conceitos de bacias hidrográficas teorias e aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002.
- SIGEF. **Sistema de Gestão Fundiária**. Disponível em: <<https://sigef.incra.gov.br/>>. Acesso

em: 7 dezembro 2017.

SILVA, A. M. **Princípios Básicos de Hidrologia**. Lavras-MG: Departamento de Engenharia. UFLA, 1995.

SOUZA, A. F.; COELHO, R. T. Tecnologia CAD/CAM – Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em ambiente fabril. **XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção**, Ouro Preto – MG, outubro 2003.

SOUZA, E. R.; FERNANDES, M. R. Sub-bacias hidrográficas unidades básicas para o planejamento das atividades rurais. **UFLA**, 2002. Disponível em: <http://deg.ufla.br/setores/engenharia_agua_solo/disciplinas/eng_170/Bacias%20-%20Artigo%20Informe%20Agropecuario.pdf>. Acesso em: 26 Janeiro 2018. Conferência.

SOUZA, I. C. **Aspectos da Morfometria de Drenagem e Produção de Sedimentos em Relação a Variante Chuva x Vazão de Diferentes Trechos da Bacia do Ribeirão do Gama – Distrito Federal nos anos de 2014 a 2015**. UNB. Brasília. 2015.

SOUZA, J. M.; LOCH, R. E. N. Análise e melhoria da qualidade altimétrica dos dados da shuttle radar topography mission, SRTM-3. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, n. 2, Agosto 2008. Disponível em: <https://www.academia.edu/7389528/AN%C3%81LISE_E_MELHORIA_DA_QUALIDADE_ALTIM%C3%89TRICA_DOS_DADOS_DA_SHUTTLE_RADAR_TOPOGRAPHY_MISSION_SRTM3_Analysis_and_improvement_of_altimetric_quality_of_Shuttle_Radar_Topography_Mission_data_SRTM3?auto=download>. Acesso em: 3 Agosto 2017.

SOUZA, J. O. P. Análise da precisão altimétrica dos modelos digitais de elevação para a área semi-árida do nordeste brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 30, p. 56-64, 2015.

SOUZA, R. et al. Caracterização morfométrica e delimitação da bacia hidrográfica do córrego samambaia – GO, a partir de dados SRTM. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Foz do Iguaçu – PR, 2013.

STIPP, N. A.; CAMPOS, R. A.; CAVIGLIONE, J. H. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Taquara – Uma contribuição para o estudo das ciências ambientais. **Portal da Cartografia**, Londrina, v. 3, n. 1, 2010.

TADONO, T. et al. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by alos prism. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Praga, República Tcheca, v. XLI-B4, Julho 2016.

TEODORO, V. L. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, 2007.

TOCANTINS. Lei Nº 1.307, de 22 de março de 2002., março 2002. Disponível em: <http://mpto.mp.br/intranet/caopma/leg_est/LEI%201.307,%20DE%2022%20DE%20MAR%C3%87O%20DE%202002.pdf>. Acesso em: 27 Janeiro 2018.

TONELLO, K. C. **Análise ambiental da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Viçosa. [S.l.]. 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª. ed. Porto Alegre: ABRH, 2004.

TUCCI, C.; MARQUES, D. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2000.

TUTIĆ, D.; LAPAINE, M. Kartografska generalizacija linija sa svojstvom čuvanja površina. **Prethodno priopćenje Primljeno, Prihvaćeno**, Junho 2009. Disponível em: <http://www.kartografija.hr/kig/upload/clanci/kig11_Tutic2.pdf>. Acesso em: 13 Fevereiro 2018.

USGS. **Digital Elevation Models, Data User Guide 5**. Reston, Virginia. 1993.

USGS. **Standards for Digital Elevation Models - Part 2**. National Mapping Program Technical Instructions. [S.l.]. 1998.

USGS. earth explorer. **USGS, science for a changing world**, 2018. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 27 jan. 2018.

VALERIANO, M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Derivação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em coordenadas geográficas. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Abril 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0369.pdf>>. Acesso em: 06 Maio 2018.

VALLE JUNIOR, R. F. et al. Diagnóstico do uso potencial do solo e conflito ambiental na microbacia hidrográfica do rio Veríssimo, Veríssimo – MG. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 7, n. 12, 2011.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

VU, D. H. Web application framework with Shiny. **github**, 2015. Disponível em: <<http://littleactuary.github.io/blog/Web-application-framework-with-Shiny/>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2018.

VUCETIC, N.; PETROVICE, S.; STRUNJE, A. Pojednostavljenje linija s fiksnim točkama Douglas-Peuckerovim algoritmom. **posebni broj, special issue**, 2007.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, p. 193-213, 2006.

ZAUPA, F. et al. Um Processo de Desenvolvimento de Aplicações Web baseado em Serviços. **SBCARS**, 2007. Disponível em: <<http://www.ic.unicamp.br/sbcars2007/tecnicas/files/sbcars2007-zaupa-processo.pdf>>. Acesso em: 19 Fevereiro 2018.

ZAVOIANU, I. **Morphometry of drainage basins**. Bucharest: Elsevier, v. 20, 1985. 258 p.

ZIEMER, G. L. Quantitative geomorphology of drainage basins related to fish production. **Informational leaflet. Department of fish and game**, Alaska, n. 162, Julho 1973.

10 APÊNDICE A: Script de instalação do Bacia Fácil

```
1  #!/bin/bash
2  #
3  #Instalador do BaciaFacil.sh
4  #
5  #Autor: Hugo Lopes Pereira
6  #
7  #
8
9  #Criando diretorios necessarios
10
11  echo a instalacao precisa de senha
12
13  sudo cp -r Bacia_Facil /home/ &&
14
15  echo Tem que dar permissao a pasta do Bacia_Facil, precisa de senha
16
17  sudo chmod -R 777 /home/Bacia_Facil &&
18
19  #Atualizando repositórios
20
21  echo Atualizando repositórios...
22  if ! sudo apt-get update
23  then
24      echo "Não foi possível atualizar os repositórios. Verifique seu
25  arquivo /etc/apt/sources.list"
26  fi
27  echo "Atualização feita com sucesso"
28
29  #Caso queira atualizar os pacotes ja instalados, descomente os comandos
30  abaixo
31  #echo "Atualizando pacotes já instalados"
32  #if ! sudo apt-get dist-upgrade -y
33  #then
34  #    echo "Não foi possível atualizar pacotes."
35  #fi
36  #echo "Atualização de pacotes feita com sucesso"
37
38
39  #Instalando bibliotecas GEO no linux. Estes pacotes sao necessarios
40  para instalar os pacotes rgdal e rgeos do R
41
42  echo Instalando bibliotecas GEO no linux...
43
44  echo
45  nome="libgeos-dev"
46  pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
47  echo
48  echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
49  sleep 2
50  if [ -n "$pacote" ] ;
51  then echo
52      echo "Pacote $nome ja instalado"
53  else echo
```

```
54     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
55     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
56 senha"
57     sudo apt-get install libgeos-dev
58 fi
59
60 echo
61 nome="libproj-dev"
62 pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
63 echo
64 echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
65 sleep 2
66 if [ -n "$pacote" ] ;
67 then echo
68     echo "Pacote $nome ja instalado"
69 else echo
70     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
71     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
72 senha"
73     sudo apt-get install libproj-dev
74 fi
75
76 echo
77 nome="libgdall-dev"
78 pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
79 echo
80 echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
81 sleep 2
82 if [ -n "$pacote" ] ;
83 then echo
84     echo "Pacote $nome ja instalado"
85 else echo
86     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
87     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
88 senha"
89     sudo apt-get install libgdall-dev
90 fi
91
92 #Instalando compiladores no linux
93
94 echo
95 nome="build-essential"
96 pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
97 echo
98 echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
99 sleep 2
100 if [ -n "$pacote" ] ;
101 then echo
102     echo "Pacote $nome ja instalado"
103 else echo
104     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
105     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
106 senha"
107     sudo apt-get install build-essential
108 fi
109
```

```
110 #Verifica se o programa R esta instalado, senao executa a instalacao
111
112 echo
113 nome="r-base"
114 pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
115 echo
116 echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
117 sleep 2
118 if [ -n "$pacote" ] ;
119 then echo
120     echo "Pacote $nome ja instalado"
121 else echo
122     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
123     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
124 senha"
125     sudo apt-get install $nome
126     sudo apt-get install r-base-dev
127 fi
128
129 #Verifica se o programa SagaGIS esta instalado, senao executa a
130 instalacao, lembrando
131 #que deve ser instalada a versao saga 2.2.3.
132
133 echo
134 nome="saga"
135 pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
136 echo
137 echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
138 sleep 2
139 if [ -n "$pacote" ] ;
140 then echo
141     echo "Pacote $nome ja instalado"
142 else echo
143     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
144     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
145 senha"
146     sudo apt-get install saga=2.2.3+dfsg-1build1 libsaga=2.2.3+dfsg-
147 1build1
148 fi
149
150 #Verifica se o programa Latex esta instalado, senao executa a
151 instalacao
152
153 echo
154 nome="texlive"
155 pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
156 echo
157 echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
158 sleep 2
159 if [ -n "$pacote" ] ;
160 then echo
161     echo "Pacote $nome ja instalado"
162 else echo
163     echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
164     echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
165 senha"
```

```
166         sudo apt-get install texlive texlive-latex-base texlive-latex-
167 recommended texlive-latex-extra texlive-lang-portuguese
168     fi
169
170     #Verifica se o programa libgnome2-bin esta instalado, senao executa a
171     instalacao
172
173
174     echo
175     nome="libgnome2-bin"
176     pacote=$(dpkg --get-selections | grep "$nome" )
177     echo
178     echo -n "Verificando se o Pacote $nome esta instalado."
179     sleep 2
180     if [ -n "$pacote" ] ;
181     then echo
182         echo "Pacote $nome ja instalado"
183     else echo
184         echo "Pacote $nome Necessario-> Nao instalado"
185         echo "Instalando Automaticamente Pacote $nome... pode precisar de
186     senha"
187         sudo apt-get install libgnome2-bin
188     fi
189
190     #Instalando pacotes necessarios no R
191
192     echo "Aguarde a intalacao de pacotes necessarios no R... isso pode
193     demorar..."
194
195     R CMD BATCH PacotesR.R
196
197     echo "instalacao concluida, digite qualquer coisa para sair."
198     read pergunta
199     if test "$pergunta" -eq 1
200     then
201         exit
202     else
203         echo "instalacao concluida"
204     fi
```

11 APÊNDICE B: Script para instalação dos pacotes necessários no R

```
1 #Este script instala os pacotes necessários em R para utilizar o
2 #BaciaFacil
3 #
4 #Autor: Hugo Lopes Pereira
5 #
6 #
7 install.packages('RSAGA', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
8 r.c3sl.ufpr.br")
9 install.packages('magrittr', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
10 r.c3sl.ufpr.br")
11 install.packages('raster', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
12 r.c3sl.ufpr.br")
13 install.packages('maptools', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
14 r.c3sl.ufpr.br")
15 install.packages('rgeos', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
16 r.c3sl.ufpr.br")
17 install.packages('rgdal', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
18 r.c3sl.ufpr.br")
19 install.packages('prettymapr', dependencies=TRUE, repos = "http://cran-
20 r.c3sl.ufpr.br")
```

12 APÊNDICE C: Shell script para coleta e armazenamento dos dados de entrada através de interface gráfica utilizando Zenity.

```

1  #!/bin/bash
2  #
3  #BaciaFacil.sh - Delimita bacias hidrograficas, extrai rede de drenagem
4  e faz a caracterizacao morfometrica automaticamente
5  #
6  #Autor: Hugo Lopes Pereira
7  #
8  #
9
10 #Este programa delimita bacias hidrograficas a partir de um ponto, o
11 #usuario deve entrar com as coordenadas do exeturio em
12 #UTM SIRGAS 2000 e tambem especificar os parametros de projecao. O
13 #usuario deve informar MDE a ser utilizado quando solicitado
14
15 question=$(zenity --info --title="Bacia Facil" --text="Este programa
16 delimita bacias automaticamente. <b>Pressione OK para continuar</b>" --
17 width=500 --height=200)
18 case $? in
19     1) exit
20 esac
21 Formdados=$(zenity --forms --title="Dados do projeto" --text="Preencha
22 todos os campos" --add-entry="Autor" --add-entry="Instituição" --add-
23 entry="Nome da Bacia" --add-entry="MDE utilizado" --width=500 --
24 height=200)
25 case $? in
26     1) exit
27 esac
28 Autor=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f1)
29 Instituicao=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f2)
30 Nome_da_bacia=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f3)
31 MDE_utilizado=$(echo $Formdados | cut -d "|" -f4)
32 echo $Autor > /home/Bacia_Facil/input/dados/autor.txt
33 echo $Instituicao > /home/Bacia_Facil/input/dados/instituicao.txt
34 echo $Nome_da_bacia > /home/Bacia_Facil/input/dados/nome_da_bacia.txt
35 echo $MDE_utilizado > /home/Bacia_Facil/input/dados/MDE.txt
36
37 Formcoord=$(zenity --forms --title="Coordenadas do exutório" --
38 text="Informe as coordenadas do exutório em <b>UTM SIRGAS 2000</b>" --
39 add-entry="Norte (ex. 888888.8888)" --add-entry="Leste (ex.
40 888888.8888)" --add-entry="ZonaUTM (ex. 22)" --add-entry="EPSG (ex.
41 31982)" --width=500 --height=200)
42 case $? in
43     1) exit
44 esac
45 Norte=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f1)
46 Leste=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f2)
47 ZonaUTM=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f3)
48 EPSG=$(echo $Formcoord | cut -d "|" -f4)
49 sed -i '2s/^\$1'.*$/'$Norte' '$Leste'/'
50 /home/Bacia_Facil/input/coordenadas.txt

```

```

51 sed -i '1s/^\$1'.*$/+init=epsg:'$EPSG' +proj=utm +zone='$ZonaUTM'
52 +south +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs/'
53 /home/Bacia_Facil/input/srcin.txt
54
55 Formconfig=$(zenity --forms --title="Parâmetros de configuração" --
56 text="Informe os parâmetros de configuração: \n Minslope = menor ângulo
57 de inclinação entre as células do MDE para gerar o MDEHC\n Threshold =
58 Grau de detalhamento para gerar a rede de canais" --add-entry="Minslope
59 (ex: 0.001, 0.0001, etc.)" --add-entry="Threshold (ex: 5, 6, 7, etc.)"
60 --width=500 --height=200)
61 case $? in
62     1) exit
63 esac
64 Minslope=$(echo $Formconfig | cut -d "|" -f1)
65 Threshold=$(echo $Formconfig | cut -d "|" -f2)
66 sed -i '2s/^\$1'.*$/'$Minslope' '$Threshold'/'
67 /home/Bacia_Facil/input/config.txt
68
69 MDE=$(zenity --file-selection --title "Selecione o MDE")
70 if [ $? = 0 ]; then
71 cp -f $MDE /home/Bacia_Facil/input/dem.tif
72 else
73     exit
74 fi
75
76 zenity --question --text="Delimitar agora? isto pode demorar alguns
77 minutos." --ok-label="Sim" --cancel-label="Sair"
78
79 morfometria=$(R CMD BATCH /home/Bacia_Facil/BaciaRcode.r) | zenity --
80 progress --pulsate --title="Delimitando a bacia" --width=700 --
81 height=150 --text="Aguarde enquanto trabalhamos..." --auto-close
82
83 cd /home/Bacia_Facil
84
85 pdflatex Relatorio_da_bacia_template.tex
86 pdflatex Relatorio_da_bacia_template.tex
87
88 gnome-open /home/Bacia_Facil/Relatorio_da_bacia_template.pdf
89
90 num_arq=$(ls /home/Bacia_Facil/output | wc -l)
91 if [ $num_arq -eq 40 ]; then
92 zenity --info --title="Concluido" --text="Processo concluido, seus
93 arquivos foram salvos em /home/Bacia_Facil/output" --width=500 --
94 height=200;
95 else
96 zenity --error --title "Erro inesperado" --text "<b>Algo deu errado,
97 consulte o arquivo BaciaRcode.r.Rout</b>"
98 fi
99
100

```

13 APÊNDICE D: Script em R para delimitação automática e caracterização morfológica de bacias hidrográficas

```

1 #Delimita bacias hidrograficas, extrai rede de drenagem e realiza a
2 #caracterização morfológica automaticamente
3 #
4 #Autor: Hugo Lopes Pereira
5 #
6 #
7 #Este programa delimita bacias hidrograficas a partir de um ponto, o
8 #usuario deve entrar com as coordenadas do exeturio em
9 #UTM SIRGAS 2000 e tambem especificar os parametros de projecao. O
10 #usuario deve salvar o MDE a ser utilizado com o nome dem.tif na pasta
11 #/home/Bacia_Facil/input/dem.tif. O usuário também deverá informar os
12 #valores do minslope e do threshold nos arquivos específicos na pasta
13 #dados.
14
15 # (1) Devem ser carregados previamente os seguintes pacotes:
16
17 library(RSAGA)
18 library(magrittr)
19 library(raster)
20 library(maptools)
21 library(rgeos)
22 library(rgdal)
23 library(prettymapr)
24
25 # Configurando os caminhos de entradas e saida de dados,
26 # O rsaga.env utiliza workspace direto na pasta home em Linux
27
28 # (2) É interessante criar uma pasta para o workspace
29
30 myenv = rsaga.env(workspace = '/home/Bacia_Facil', path = '/usr/bin',
31 modules = '/usr/bin', version = '2.2.3')
32
33 # (3) O formato suportado por rsaga e .sgrd, como os mde's sao
34 # geralmente em formato geotiff, faz-se a conversao pela biblioteca
35 # rgdal.
36 # É sempre importante importar o raster neste momento ainda em wgs
37 # latlong, pois assim nao há fatores de conversão para os pixels da
38 # imagem.
39 # Se for importar o dem.tif ja em utm, será feita um correcao na imagem
40 # e as bacias serão distorcidas.
41
42 rsaga.import.gdal ( '/home/Bacia_Facil/input/dem.tif' ,
43 '/home/Bacia_Facil/temp/demsaga.sgrd' , env = myenv)
44
45 # (4) Os dados srtm são configurados em wgs84-epsg:4326, a seguir será
46 # convertido o raster para utm sirgas 2000 epsg:3198x,
47 # a depender da zona do seu mde, basta alterar no arquivo srcin.txt na
48 # pasta /home/BaciaNoR/srcin.txt
49
50 r <-raster('/home/Bacia_Facil/temp/demsaga.sdat')
```

```

51 sr<-readLines("/home/Bacia_Facil/input/srcin.txt")
52 projected_raster <- projectRaster(r, crs = sr)
53 writeRaster(projected_raster,
54 filename="/home/Bacia_Facil/temp/demutm.sgrd", overwrite=TRUE)
55
56 # (5) Serão carregados os parâmetros de configuração, para o fill sinks
57 # e para a extração da rede de drenagem - estão no arquivo config.txt
58 # na pasta input.
59
60 config <- read.table('/home/Bacia_Facil/input/config.txt', head=T)
61 minslope<-config[1,1]
62 threshold<-config[1,2]
63
64 # (6) A seguir são feitas as correções dos dados espúrios do mde, para
65 # torná-lo consistente
66
67 rsaga.fill.sinks('/home/Bacia_Facil/temp/demutm.sgrd',
68 '/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sgrd', method = "wang.liu.2006",
69 out.flowdir='/home/Bacia_Facil/temp/flowdir.sgrd',
70 out.wshed='/home/Bacia_Facil/temp/wshed.sgrd',
71 minslope=minslope, env = myenv)
72
73 #caso o comando acima não funcionar executar o comando abaixo.
74
75 #rsaga.sink.removal('/home/hugo/BaciaNoR/temp/demutm.sgrd','sinkrout',
76 '/home/hugo/BaciaNoR/temp/demfilled.sgrd', method = "fill", env =
77 #myenv)
78
79 # (7) Se Saga for maior que 2.1.3, utilizar rsaga.topdown.processing.
80 # Se menor, utilizar rsaga.parallel.processing.
81 # este comando irá criar o raster da área de captação
82
83 rsaga.topdown.processing('/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sgrd',
84 out.carea = '/home/Bacia_Facil/temp/areacaptacao.sgrd', env = myenv)
85
86 # (8) Agora será indicada a célula do exutório em utm, x é longitude e
87 # y latitude, as coordenadas devem estar no arquivo coordenadas.txt na
88 # pasta input.
89
90 exutorio <- read.table('/home/Bacia_Facil/input/coordenadas.txt',
91 head=T)
92
93 # (9) Transformando para objeto espacial
94
95 coordinates(exutorio) <- ~ x + y
96
97 # (10) Atribuir o sistema de coordenadas atual
98
99 projection(exutorio) <- CRS(sr)
100
101 # (11) Plot o demfilled para conferir o mapa de inclinação
102
103 fill_dem <- raster('/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sdat')
104 projection(fill_dem) <- CRS(sr)
105 #plot(fill_dem)
106 #plot(exutorio, add=T)

```

```

107
108 # (12) Lendo o grid da área de influência
109
110 areacap <- raster('/home/Bacia_Facil/temp/areacaptacao.sdat')
111
112 # (13) Extrair uma janela em torno do ponto de início colocando um
113 # buffer de 500 m, este comando irá localizar um ponto no raster no
114 # raio de 500 m que seja um exutório pertencente a rede de drenagem
115
116 buffer <- extract(areacap, exutorio, buffer = 500, cellnumbers =
117 T)[[1]] %>%
118   as.data.frame
119
120 # (14) esta é a localização da área abrangida no grid , dada como o ID
121 # do raster
122
123 snap_loc <- buffer$cell[which.max(buffer$value)]
124
125 # (15) obter as coordenadas XY naquele local max , que agora vai ser o
126 # local do exutorio.
127
128 snap_loc <- xyFromCell(areacap, snap_loc)
129
130 # (16) Agora é quando você usa esse ponto e seu demfilled para calcular
131 # a área da curva ascendente
132
133 rsaga.geoprocessor(lib = 'ta_hydrology', 4,
134   param = list(TARGET_PT_X = snap_loc[1,1],
135     TARGET_PT_Y = snap_loc[1,2],
136     ELEVATION =
137     '/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sgrd',
138     AREA = '/home/Bacia_Facil/temp/area.sgrd',
139     METHOD = 0), env = myenv)
140
141 # (17) Agora será delimitada a bacia pretendida, será salva em arquivo
142 # .shp na pasta /home/Bacia_Facil/output
143
144 rsaga.geoprocessor(lib = 'shapes_grid', 6,
145   param = list(GRID = '/home/Bacia_Facil/temp/area.sgrd',
146     POLYGONS =
147     '/home/Bacia_Facil/output/divisores.shp',
148     CLASS_ALL = 0,
149     CLASS_ID = 100,
150     SPLIT = 0), env = myenv)
151
152 # (18) Plotando a bacia sobre o demfilled, aqui poderá ser visto se
153 # tudo ocorreu bem. Caso contrario, verifique os dados de input
154
155 basin <- readShapeSpatial('/home/Bacia_Facil/output/divisores.shp',
156   proj4string = CRS(sr))
157
158 # Suavizando o polígono da bacia
159
160 basin2 <- gSimplify(basin, tol=30)
161 basin2 <- spTransform(basin2, CRS(sr))
162 basin2 <- SpatialPolygonsDataFrame(basin2, basin@data, match.ID=F)

```

```
163 basin<-basin2
164 writeSpatialShape(basin,
165 '/home/Bacia_Facil/output/divisores_suavizados')
166 #plot(fill_dem)
167 #plot(basin, add = T)
168
169 # (19) Os comandos abaixo irão recortar o raster a partir da bacia
170 # delimitada e com isso reduzir tempo para extração da rede de
171 # drenagem,
172 # este arquivo irá pra pasta output
173
174 demrecortado <- raster('/home/Bacia_Facil/temp/demfilled.sdat')
175 demrecortado2 <- crop(demrecortado, extent(basin))
176
177 #plot(demrecortado2)
178 mascararecorte <- mask(demrecortado2, basin)
179 #plot(mascararecorte)
180
181 writeRaster(mascararecorte,
182 filename="/home/Bacia_Facil/output/recorte_bacia.sdat", format="SAGA",
183 overwrite=TRUE)
184
185 # (20) Sera extraida a rede de drenagem e sera gravada na pasta output
186 # em arquivo .shp alem do arquivo .shp dos nos da rede de drenagem
187 # estao sendo salvos na pasta temp alguns arquivos desnecessarios nesta
188 # fase de testes
189 # a rede de drenagem e classificada pela sua ordem
190
191 rsaga.geoprocessor("ta_channels", module=5, env=myenv,
192 param=list(DEM="/home/Bacia_Facil/output/recorte_bacia.sgrd",
193 DIRECTION="/home/Bacia_Facil/temp/direcao.sgrd",
194 CONNECTION="/home/Bacia_Facil/temp/conexoes.sgrd",
195 ORDER="/home/Bacia_Facil/temp/ordem.sgrd",
196 BASIN="/home/Bacia_Facil/temp/bacias.sgrd",
197 SEGMENTS="/home/Bacia_Facil/output/drenagem.shp",
198 BASINS="/home/Bacia_Facil/temp/bacias.shp",
199 NODES="/home/Bacia_Facil/output/nos.shp",
200 THRESHOLD=threshold))
201
202 # (21) será lida a rede de drenagem obtida no passo anterior
203
204 drenagem <- readShapeSpatial('/home/Bacia_Facil/output/drenagem.shp',
205 proj4string = CRS(sr))
206
207 # (22) Em seguida será extraido da rede de drenagem o shape do canal
208 # principal e colocado na pasta output
209 # Calcula o canal principal a partir da nascente mais distante
210
211 nascentes<-readShapeSpatial('/home/Bacia_Facil/output/nos.shp',
212 proj4string = CRS(sr))
213 nasc_data<-nascentes@data
214 nasc_coord<-coordinates(nascentes)
215 nasc_data["x"]<-nasc_coord[,1]
216 nasc_data["y"]<-nasc_coord[,2]
217 foz<-coordinates(exutorio)
```

```

218 foz_nasc<-(((foz[,1]-nasc_data[,3])**2)+((foz[,2]-
219 nasc_data[,4])**2)**(1/2)
220 no_nasc<-match(max(foz_nasc), foz_nasc)
221
222 attach(drenagem@data)
223 NO_A<-NODE_A
224 NO_B<-NODE_B
225 pontos_principais2<-c(no_nasc)
226 detach(drenagem@data)
227 NO_B<-NO_B[match(no_nasc, NO_A):length(NO_B)]
228
229 repeat{for(i in
230 1:length(NO_A)){if(NO_A[i]==NO_B[1]){pontos_principais<-c(NO_A[i])}}
231     teste<-subset(drenagem@data, NODE_A==pontos_principais)
232     teste2<-teste[,1]
233     attach(drenagem@data)
234     NO_A<-NODE_A
235     NO_B<-NODE_B
236     detach(drenagem@data)
237     NO_B<-NO_B[teste2:length(NO_B)]
238     pontos_principais2<-c(pontos_principais2,pontos_principais)
239     repetidos<-length(pontos_principais2)-
240     length(unique(pontos_principais2))
241     if(repetidos==1)break()}
242
243 # O código abaixo Calcula o canal principal optando pela região
244 #topográfica de menor altitude
245
246 #attach(drenagem@data)
247 #NO_A<-NODE_A
248 #NO_B<-NODE_B
249 #pontos_principais2<-c(NO_A[1])
250 #detach(drenagem@data)
251 #
252 #repeat{for(i in
253 1:length(NO_A)){if(NO_A[i]==NO_B[1]){pontos_principais<-c(NO_A[i])}}
254 #     teste<-subset(drenagem@data, NODE_A==pontos_principais)
255 #     teste2<-teste[,1]
256 #     attach(drenagem@data)
257 #     NO_A<-NODE_A
258 #     NO_B<-NODE_B
259 #     detach(drenagem@data)
260 #     NO_A<-NO_A[teste2:length(NO_A)]
261 #     NO_B<-NO_B[(length(NO_B)-length(NO_A)+1):length(NO_B)]
262 #     pontos_principais2<-c(pontos_principais2,NO_A[1])
263 #     attach(drenagem@data)
264 #     NO_A<-NODE_A
265 #     detach(drenagem@data)
266 #     repetidos<-length(pontos_principais2)-
267     length(unique(pontos_principais2))
268     #if(repetidos==1)break()}
269
270 pontos_principais2<-pontos_principais2[-length(pontos_principais2)]
271 canal_principal<-
272 drenagem[as.character(drenagem@data$NODE_A)%in%pontos_principais2,]

```

```

273 writeSpatialShape(canal_principal,
274   '/home/Bacia_Facil/output/canal_principal')
275
276 #png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/Mapa_da_bacia.png')
277 #plot(mascararecorte)
278 #plot(basin, add = T)
279 #plot(drenagem, add=T, col='cyan')
280 #plot(canal_principal, add=T, col='blue')
281 #dev.off()
282
283 #plot(mascararecorte)
284 #plot(basin, add = T)
285 #plot(drenagem, add=T, col='cyan')
286 #plot(canal_principal, add=T, col='blue')
287
288 #(23) em seguida serão extraídos os parâmetros morfométricos básicos da
289 # bacia
290
291 #(I) Cálculo da área
292
293 Area<-gArea(basin)
294 Area_km2<-Area/(1000**2)
295
296 #(II) Cálculo do perímetro
297
298 Perimetro<-gLength(basin)
299 Perimetro_km<-Perimetro/1000
300
301 #(III) Cálculo da altitude máxima da bacia (P2)
302
303 P2<-maxValue(mascararecorte)
304
305 #(IV) Cálculo da altitude mínima da bacia (P1)
306
307 P1<-minValue(mascararecorte)
308
309 #(V) Cálculo da amplitude altimétrica (Fm)
310
311 Fm<-P2-P1
312
313 #(VI) Cálculo da altitude média
314
315 Pm<-cellStats(mascararecorte,mean)
316
317 #(VI) Calculando o comprimento ortogonal da bacia (L)
318
319 D1<-xmax(mascararecorte)-xmin(mascararecorte)
320 D2<-ymax(mascararecorte)-ymin(mascararecorte)
321 if(D2>D1){L<-D2}else{L<-D1}
322
323 #(VIII) Calculando a largura ortogonal da bacia (B)
324
325 if(D2<D1){B<-D2}else{B<-D1}
326
327 #(IX) Calculando a coordenada X do centroide da Bacia (CX)
328

```

```

329  centroide<-geom(gCentroid(basin))
330  CX<-centroide[1,2]
331
332  #(X)Calculando a coordenada Y do centroide da Bacia (CY)
333
334  CY<-centroide[1,3]
335
336  #####
337
338  #(24)Em seguida serao calculados os parâmetros lineares da bacia
339
340  #(XI) Calculo do comprimento do maior segmento da rede de drenagem (Lm)
341
342  attach(drenagem@data)
343  Lm<-max(LENGTH)
344  detach(drenagem@data)
345
346  #(XII)Cálculo do comprimento total dos cursos d'agua (Ld)
347
348  Ld<-gLength(drenagem)
349
350  #(XIII)Cálculo do número total de canais da rede de drenagem (Nt)
351
352  Nt<-length(drenagem)
353
354  #(XVI)Cálculo da densidade de drenagem em km/km2
355
356  Dd<-(Ld/Area)*1000
357
358  #(XV)Cálculo da ordem da bacia (u)
359
360  attach(drenagem@data)
361  u<-max(ORDER)
362  detach(drenagem@data)
363
364  #(XVI) Cálculo do comprimento dos canais de primeira ordem (Lu)
365
366  primeira_ordem<-subset(drenagem@data, ORDER==1)
367  attach(primeira_ordem)
368  Lu<-sum(LENGTH)
369  detach(primeira_ordem)
370
371  #(XVII)Cálculo da densidade hidrográfica (Dh) em und/km2
372
373  Dh<-(Nt*1000**2)/Area
374
375  #(XVIII)Cálculo do número de canais de primeira ordem (Np)
376
377  attach(primeira_ordem)
378  Np<-sum(ORDER)
379  detach(primeira_ordem)
380
381  #(XIX)Cálculo do coeficiente de torrencialidade (Ctr)
382
383  Ctr<-(Np*1000**2)/Area
384

```

```

385 # (XX) Cálculo da extensão do percurso superficial (Eps)
386
387 Eps <- 1 / (2 * Dd)
388
389 # (XXI) Comprimento médio dos canais de primeira ordem (Lm1)
390
391 attach(primeira_orden)
392 Lm1 <- mean(LENGTH)
393 detach(primeira_orden)
394
395 # (XXII) Comprimento médio dos canais de segunda ordem (Lm2)
396
397 segunda_orden <- subset(drenagem@data, ORDER == 2)
398 attach(segunda_orden)
399 Lm2 <- mean(LENGTH)
400 detach(segunda_orden)
401
402 # (XXIII) Cálculo da relação entre os comprimentos médios dos canais de
403 primeira e segunda ordem (Rlm)
404
405 Rlm <- Lm1 / Lm2
406
407 # (XXIV) Cálculo da razão de textura topográfica (T)
408
409 T <- Nt / (Perimetro / 1000)
410
411 # (XXV) Cálculo do comprimento médio dos canais (Lmt)
412
413 attach(drenagem@data)
414 Lmt <- mean(LENGTH)
415 detach(drenagem@data)
416
417 # (XXVI) Cálculo do coeficiente de manutenção (Cm)
418
419 Cm <- 1000 / (Dd)
420
421 # (XXVII) Cálculo do comprimento Linear da foz até a nascente mais
422 distante (La)
423
424 # geometria drenagem <- geom(drenagem)
425 # GX <- geometria drenagem[1, 4]
426 # GY <- geometria drenagem[1, 5]
427 geometria_exutorio <-
428 read.table('/home/Bacia_Facil/input/coordenadas.txt', head=T)
429 EX <- geometria_exutorio[1, 2]
430 EY <- geometria_exutorio[1, 1]
431 x_dist <- nasc_coord[no_nasc, 1]
432 y_dist <- nasc_coord[no_nasc, 2]
433 La <- (((x_dist - EX)**2) + ((y_dist - EY)**2))**(1/2)
434 Lanum <- as.numeric(La)
435
436 # (XXVIII) Cálculo do comprimento do canal principal
437
438 Lp <- gLength(canal_principal)
439
440 # (XXIX) Cálculo da inclinação aparente do canal principal S1 (m/m)

```

```

441
442 nos_canais <- readShapeSpatial('/home/Bacia_Facil/output/nos.shp',
443 proj4string = CRS(sr))
444 nos_principais<-
445 nos_canais[as.character(nos_canais@data$NODE_ID)%in%pontos_principais2,
446 ]
447 writeSpatialShape(nos_principais,
448 '/home/Bacia_Facil/output/nos_principais')
449 coordenadasXYZ_nos <-coordinates(nos_principais)
450 attach(canal_principal@data)
451 L_nos<-LENGTH
452 detach(canal_principal@data)
453 cotas_nos<-as.vector(coordenadasXYZ_nos[,3])
454 cotas_nos<-rev(sort(cotas_nos))
455 cumL_nos<-cumsum(L_nos)
456 Iaparente<-(cotas_nos[1]-
457 cotas_nos[length(cotas_nos)])/gLength(canal_principal)
458 S1<-Iaparente
459
460 #(XXX) Cálculo da inclinação média do canal principal S2 (m/m)
461
462 integral<-c()
463 for(i in 1:(length(cumL_nos)-1)){integral[i]<-((cumL_nos[i+1]-
464 cumL_nos[i])*((cotas_nos[i]+cotas_nos[i+1])/2))}
465 cota_media<-(sum(integral)*2/cumL_nos[length(cumL_nos)])-
466 cotas_nos[length(cotas_nos)]
467 Imedia<-(cota_media-
468 cotas_nos[length(cotas_nos)]/cumL_nos[length(cumL_nos)])
469 S2<-Imedia
470
471 #(XXXI) Cálculo da inclinação equivalente do canal principal S3 (m/m)
472
473 Isegs<-c()
474 for(i in 1:(length(cumL_nos)-1)){Isegs[i]<-((cotas_nos[i]-
475 cotas_nos[i+1])/L_nos[i])}
476 Iequivalente<-(sum(L_nos[-length(L_nos)]/sum(L_nos[-
477 length(L_nos)]/sqrt(Isegs)))**2
478 S3<-Iequivalente
479
480 #(XXXII) Calculo do Gradiente de Canais (Gcp)
481
482 Gradiente<-c()
483 for(i in 1:(length(cumL_nos)-1)){Gradiente[i]<-((cotas_nos[i]-
484 cotas_nos[i+1])/L_nos[i])*(cumL_nos[i]-(L_nos[i]/2))}
485 Desnível<-c()
486 for(i in 1:(length(cumL_nos)-1)){Desnível[i]<-(cotas_nos[i]-
487 cotas_nos[i+1])}
488 Distância<-cumL_nos[1:length(cumL_nos)-1]
489 Declividade<-Desnível/(L_nos[1:length(L_nos)-1])
490 Altitude<-cotas_nos[1:length(cotas_nos)-1]
491
492 Caracteristicas_canal<-
493 data.frame(Altitude,Desnível,Distância,Declividade,Gradiente)
494 Caracteristicas_canal<-round(Caracteristicas_canal,5)
495 write.csv(Caracteristicas_canal,file='/home/Bacia_Facil/output/Caracter
496 istica_canal.csv',quote=FALSE, fileEncoding = "UTF-8")

```

```

497
498 #Cálculo do índice gradiente do canal como um todo
499
500 Gcp<- (cotas_nos[1]-
501 cotas_nos[length(cotas_nos)])/log(cumL_nos[length(cumL_nos)])
502
503 #(XXXIII)Cálculo do índice de sinuosidade (IS)
504
505 IS<-Lp/La
506
507 #####
508
509 #(24)Em seguida serão calculados os parâmetros zonais da bacia
510
511 #(XXXIV)Cálculo do índice de circularidade (Ic)
512
513 Ic<-12.57*((Area/1000**2)/((Perimetro/1000)**2))
514
515 #(XXXV)Cálculo da relação de relevo da bacia (Rr)
516
517 Rr<-Fm/L
518
519 #(XXXVI)Cálculo do coeficiente de compacidade (Kc)
520
521 Kc<-(0.28*Perimetro/1000)/((Area/1000**2)**(1/2))
522
523 #(XXXVII)Cálculo do fator de forma (Kf)
524
525 Kf<-(Area/1000**2)/((L/1000)**2)
526
527 #(XXXVIII)Cálculo da forma da bacia (Fb)
528
529 Fb<-(4*pi*(Area/1000**2))/(Perimetro/1000)
530
531 #####
532
533 ##(25) em seguida serão extraídos os parâmetros hipsométricos da bacia
534
535 #(XXXIX)Cálculo da declividade média da bacia (Dm)
536
537 rsaga.geoprocessor("ta_morphometry", module=0,
538
539 param=list(ELEVATION="/home/Bacia_Facil/output/recorte_bacia.sgrd",
540
541 SLOPE="/home/Bacia_Facil/output/declividade.sgrd",ASPECT="/home/Bacia_F
542 acil/output/aspecto.sgrd",METHOD=1))
543
544 declividade <- raster('/home/Bacia_Facil/output/declividade.sdat')
545
546 Dm<-cellStats(declividade,mean)
547
548 #(XL)Cálculo da declividade máxima da bacia (Dmax)
549
550 Dmax<-cellStats(declividade,max)
551
552 #(XLI)Cálculo da declividade mínima da bacia (Dmin)

```

```

553
554 Dmin<-cellStats(declividade,min)
555
556 #(XLII)Cálculo do índice de rugosidade (Ir)
557
558 Ir<-(Fm/1000)*Dd
559
560 #(XLIII)Cálculo do coeficiente de rugosidade (Cr)
561
562 Cr<-Dd*(tan(Dm*(pi/180)))
563
564 #####
565 #(26)Gerando os mapas de declividade e aspecto
566
567 aspecto<-raster('/home/Bacia_Facil/output/aspecto.sdat')
568 crs(mascararecorte)<-sr
569 aspecto_graus<-terrain(mascararecorte, opt=c('aspect'), unit='degrees',
570 neighbors=8)
571 my.colors <-
572 colorRampPalette(c('red','yellow','green','cyan','blue','magenta'))
573 brks <- c(0.1e-05, 45.0, 90.0, 135.0, 180.0, 225.0, 270.0,315.0, 360.0)
574 arg <- list(at=c(0.1e-05, 45, 90, 135, 180, 225, 270,315, 360),
575 labels=c(0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315,360))
576
577 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/declividade.png')
578 plot(declividade, interpolate= TRUE, col=gray.colors(50, start=0.0,
579 end=1.0,gamma=2.2), legend.args=list(text='Declividade (m/m)', side=4,
580 font=2,line=2.5, cex=0.8))
581 plot(basin, add = T)
582 addscalebar(ploteps=31980, widthhint = 0.15, style= 'bar', pos =
583 'bottomleft')
584 addnortharrow(pos = 'topright', scale = 0.8)
585 dev.off()
586
587 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/aspecto.png')
588 plot(aspecto_graus, maxpixels = 2e6, interpolate=TRUE,
589 col=my.colors(8), axis.args=arg, legend.args=list(text='Azimute',
590 side=4, font=2,line=2.5, cex=0.8))
591 plot(basin, add = T)
592 addscalebar(ploteps=31980, widthhint = 0.15, style= 'bar', pos =
593 'bottomleft')
594 addnortharrow(pos = 'topright', scale = 0.8)
595 dev.off()
596
597 #####
598 #(27)Calculando a curva hipsométrica
599
600 rsaga.geoprocessor("ta_morphometry", module=5,
601
602 param=list(ELEVATION="/home/Bacia_Facil/output/recorte_bacia.sgrd",TABL
603 E="/home/Bacia_Facil/temp/Hipsometria.csv"))
604
605 hipsometria<-read.csv("/home/Bacia_Facil/temp/Hipsometria.csv")
606 hipsometria2<-subset(hipsometria, Absolute.Height>=0)
607 attach(hipsometria2)
608 porcentagem<-Absolute.Area*100/max(Absolute.Area)

```

```

609 cotas<-Absolute.Height
610 detach(hipsometria2)
611 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/Curva_hipsometrica.png')
612 plot(cotas~porcentagem,type = "o", col = "red", xlab = "Área (%)", ylab
613 = "Cotas (m)",main = "Curva Hipsométrica")
614 dev.off()
615
616 names(hipsometria2)[1:4]<-c("Altura relativa", "Área relativa", "Altura
617 absoluta", "Área absoluta")
618
619 write.csv(hipsometria2,file='/home/Bacia_Facil/output/hipsometria.csv',
620 quote=FALSE, fileEncoding="UTF-8", row.names=FALSE)
621
622 #####
623 #(28)Criando uma tabela de dados das caracaterísticas calculadas
624
625 Característica<-c("Área","Perímetro","Altitude máxima da
626 bacia","Altitude mínima da bacia","Amplitude altimétrica","Altitude
627 média",
628                 "Comprimento ortogonal da bacia","Largura ortogonal
629 da bacia","Centroide eixo X","Centroide eixo Y",
630                 "Comprimento do maior segmento","Comprimento total
631 dos cursos d'água","Número de canais","Densidade de drenagem",
632                 "Ordem da bacia","Comp. canais de 1ª
633 ordem","Gradiente de canais do canal principal","Densidade
634 hidrográfica",
635                 "Num. canais 1ª ordem","Coef. de
636 torrencialidade","Extensão do percurso superficial",
637                 "Comp. médio canais de 1ª ordem","Comp. médio
638 canais de 2ª ordem", "Relação Lm1/Lm2","Textura topográfica",
639                 "Comp. médio dos canais","Coef. de
640 manutenção","Cmprimento linear da foz até a nascente mais
641 distante","Comprimento do canal principal",
642                 "Inclinação aparente do canal
643 principal","Inclinação média do canal principal","Inclinação
644 equivalente do canal principal",
645                 "Índice de circularidade","Relação de
646 relevo","Coef. de compacidade","Fator de forma","Forma da bacia",
647                 "Declividade média da bacia","Declividade máxima da
648 bacia","Declividade mínima da bacia","Índice de rugosidade",
649                 "Coeficiente de rugosidade","Índice de
650 sinuosidade")
651
652 Siglas<-
653 c("A","P","P2","P1","Fm","Pm","L","B","CX","CY","Lm","Ld","Nt","Dd","u"
654 ,"Lu","Gcp","Dh","Np","Ctr","Eps","Lm1","Lm2","Rlm","T","Lmt","Cm","La"
655 ,"Lp",
656
657 "S1","S2","S3","Ic","Rr","Kc","Kf","Fb","Dm","Dmax","Dmin","Ir","Cr","I
658 S")
659
660 Valores<-
661 c(Area_km2,Perimetro_km,P2,P1,Fm,Pm,L,B,CX,CY,Lm,Ld,Nt,Dd,u,Lu,Gcp,Dh,N
662 p,Ctr,Eps,Lm1,Lm2,Rlm,T,Lmt,Cm,Lanum,Lp,S1,S2,S3,Ic,Rr,Kc,Kf,Fb,Dm,Dmax
663 ,Dmin,Ir,Cr,IS)
664

```

```

665 Unidades<-
666 c("km2","km","m","m","m","m","m","m","m","m","m","m","m","und","km/km2","Ad
667 imensional","m","m/km","und/km2","und","und/km2","km","m","m","Adimensi
668 onal","und/km","m",
669
670 "km","m","m","m/m","m/m","m/m","Adimensional","Adimensional","Adimensio
671 nal","Adimensional","Adimensional","m/m","m/m","m/m","Adimensional","km
672 /km2","Adimensional")
673
674 Caracteristicas_morfometricas<-
675 data.frame(Característica,Siglas,Unidades,Valores)
676
677 write.csv(Caracteristicas_morfometricas,file='/home/Bacia_Facil/output/
678 Caracteristica_morfometrica.csv', quote=FALSE, fileEncoding = "UTF-8")
679
680 #####
681 #(29)Plotando o gráfico do perfil longitudinal do canal principal e
682 suas inclinações
683
684 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/Perfil_canal.png')
685 plot(cumL_nos,rev(sort(cotas_nos)),type = "o", col = "blue", xlab =
686 "Comprimento(m)", ylab = "Cotas (m)",main = "Perfil longitudinal do
687 canal principal")
688 lines(c(cumL_nos[1],cumL_nos[length(cumL_nos)]),c(cotas_nos[1],cotas_no
689 s[length(cotas_nos)]), type = "o", col = "green", xlab = "", ylab =
690 "",main = "")
691 lines(c(cumL_nos[1],cumL_nos[length(cumL_nos)]),c(cota_media,cotas_nos[
692 length(cotas_nos)]), type = "o", col = "red", xlab = "", ylab = "",main
693 = "")
694 lines(c(cumL_nos[1],cumL_nos[length(cumL_nos)]),c((Iequivalente*(cumL_n
695 os[length(cumL_nos)]))+cotas_nos[length(cumL_nos)],cotas_nos[length(cot
696 as_nos)]), type = "o", col = "cyan", xlab = "", ylab = "",main = "")
697 legend("topright", legend=c("Perfil", "Inclinação aparente",
698 "Inclinação média", "Inclinação equivalente"), lty=c(1,1,1,1),
699 lwd=c(2.5,2.5,2.5,2.5), col=c("blue","green","red","cyan"),
700 title="Legenda")
701 dev.off()
702
703 #(30)Plotando mapa de elevação
704
705 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/Mapa_da_bacia.png')
706 plot(mascararecorte, interpolate = TRUE, col=rev(terrain.colors(255)),
707 legend.args=list(text='Elevação (m)', side=4, font=2,line=2.5,
708 cex=0.8))
709 plot(basin, add = T)
710 plot(drenagem, add=T, col='cyan')
711 plot(canal_principal, add=T, col='blue')
712 addscalebar(plotepsg=31980, widthhint = 0.15, style= 'bar', pos =
713 'bottomleft')
714 addnortharrow(pos = 'topright', scale = 0.8)
715 dev.off()
716
717 #(31)Plotando mapa de relevo sombreado da bacia
718
719 mascararecorte_10x<-mascararecorte*10

```

```

720 slope_10x<-terrain(mascararecorte_10x, opt='slope', unit='radians',
721 neighbors=8)
722 aspecto_10x<-terrain(mascararecorte_10x, opt='aspect', unit='radians',
723 neighbors=8)
724 sombreado <- hillShade(slope_10x, aspecto_10x, angle = 40, direction =
725 270)
726 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/Sombreado.png')
727 plot(sombreado, col=grey.colors(100, start=0, end=1,gamma = 0.45, alpha
728 = NULL), legend= FALSE)
729 addscalebar(ploteps=31980, widthhint = 0.15, style= 'bar', pos =
730 'bottomleft')
731 addnortharrow(pos = 'topright', scale = 0.8)
732 dev.off()
733
734 #(32)Plotando mapa planialtimétrico da bacia
735
736 png(filename = '/home/Bacia_Facil/output/planialtimetrico.png')
737 contour(mascararecorte, col=8)
738 plot(basin, add=T)
739 plot(canal_principal, col='blue', add=T)
740 addscalebar(ploteps=31980, widthhint = 0.15, style= 'bar', pos =
741 'bottomleft')
742 addnortharrow(pos = 'topright', scale = 0.8)
743 dev.off()
744
745 #####
746 # Cálculo dos tempos de concentração
747
748 Método<-"Tc (h)"
749
750 #(I) Pelo método Corps Engineers
751
752 Engineers<-round((0.191*((Lp/1000)^0.76)*(Iaparente^-0.19)),2)
753
754 #(II) Pelo método Dooge
755
756 Dooge<-round((0.365*(Area_km2^0.41)*(Iaparente^-0.17)),2)
757
758 #(III) Pelo método Giandotti
759
760 Giandotti<-round((0.0559*(4*(Area_km2^0.5)+1.5*(Lp/1000))*((Lp/1000)^-
761 0.5)*(Iaparente^-0.5)),2)
762
763 #(IV) Pelo método Johnstone
764
765 Johnstone<-round((0.462*((Lp/1000)^0.5)*(Iaparente^-0.25)),2)
766
767 #(V) Pelo método Kirpich
768
769 Kirpich<-round((0.0663*((Lp/1000)^0.77)*(Iaparente^-0.385)),2)
770
771 #(VI) Pelo método Pasini
772
773 Pasini<-round((0.107*(Area_km2^0.333)*((Lp/1000)^0.333)*(Iaparente^-
774 0.5)),2)
775

```

```
776 # (VII) Pelo método Pickering
777
778 Pickering<-round((((0.871*((Lp/1000)^3))/(cotas_nos[1]-
779 cotas_nos[length(cotas_nos)]))^0.385),2)
780
781 # (VIII) Pelo método Picking
782
783 Picking<-round((0.0883*((Lp/1000)^0.667)*(Iaparente^-0.333)),2)
784
785 # (IX) Pelo método Ven te Chow
786
787 VenteChow<-round((0.160*((Lp/1000)^0.64)*(Iaparente^-0.32)),2)
788
789 # (X) Pelo método Ventura
790
791 Ventura<-round((0.127*(Area_km2^0.5)*(Iaparente^-0.5)),2)
792
793 Tempos_de_concentracao<-
794 data.frame(Método,Engineers,Dooge,Giandotti,Johnstone,Kirpich,Pasini,Pi
795 ckering,Picking,VenteChow,Ventura)
796
797 write.csv(Tempos_de_concentracao,
798 file='/home/Bacia_Facil/output/Tempos_de_concentracao.csv',quote=FALSE,
799 fileEncoding = "UTF-8", row.names=FALSE)
800
801
```

1 14 APÊNDICE E: Script em Latex para edição do relatório final da bacia

```

1 % Relatório da bacia
2
3 \documentclass[a4paper]{article}
4 \usepackage{csvsimple}
5 %\usepackage{csvtools}
6 \usepackage{graphicx}
7 \usepackage[top=2cm, bottom=2cm, left=2cm, right=2cm]{geometry}
8 %\usepackage{verbatim}
9 %\usepackage{alltt}
10 \usepackage[brazilian]{babel}
11 \usepackage[utf8]{inputenc}
12 \usepackage[T1]{fontenc}
13 %\usepackage{sverb}
14
15 \title{Relatório da bacia}
16
17 \begin{document}
18
19 \begin{titlepage}
20 \vfill
21
22 \begin{figure}[h]
23 \centering
24 \includegraphics[width=10cm]{/home/Bacia_Facil/input/dados/timbre.png}
25 \label{UFT}
26 \end{figure}
27
28 \begin{center}
29
30 {\LARGE\textbf
31 {\input{/home/Bacia_Facil/input/dados/instituicao.txt}}} \\[2.5cm]
32
33 {\large {Autor:
34 \input{/home/Bacia_Facil/input/dados/autor.txt}}} \\[6cm]
35
36 {\huge\textbf {Relatório automático da sub-bacia do
37 \input{/home/Bacia_Facil/input/dados/nome_da_bacia.txt}\footnote{Este
38 relatório foi gerado automaticamente a partir do programa "BACIA
39 FACIL". O referido programa foi parte de dissertação de mestrado
40 apresentada junto ao Programa de Pós-graduação Profissional em
41 Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins-UFT}}} \\[6cm]
42
43 %\begin{alltt}
44 %\large\center\input{C:/R/input/dados.txt}
45 %\end{alltt}
46
47 \vfill
48
49 \vspace{2cm}
50
51 \large \textbf{\today}

```

```
52 \end{center}
53 \end{titlepage}
54 %\verbatiminput{C:/R/input/dados.txt}
55 %\begin{alltt}
56 %\end{alltt}
57 %\verbatiminput {C:/R/input/dados.txt}
58 %\small\center\csvautotabular{C:/R/input/dados.txt}
59 \newpage
60
61 \tableofcontents
62 \newpage
63
64 \flushleft\section{Modelo Digital de Eleva\c{c}\~ao (MDE) utilizado}
65
66 Este relat\ 'orio foi gerado a partir do MDE
67 \input{/home/Bacia_Facil/input/dados/MDE.txt}
68
69 \flushleft\section{Caracter\ 'isticas morfom\ 'etricas}
70 \small\center\csvautotabular{/home/Bacia_Facil/output/Caracteristica_mo
71 rfometrica.csv}
72 \newpage
73
74 \flushleft\section{Dados morfométricos do canal principal}
75 \small\center\csvautotabular{/home/Bacia_Facil/output/Caracteristica_ca
76 nal.csv}
77
78 \flushleft\section{Tempos de concentração}
79 \small\center\csvautotabular{/home/Bacia_Facil/output/Tempos_de_concent
80 racao.csv}
81
82 \flushleft\section{Hipsometria}
83 \small\center\csvautotabular{/home/Bacia_Facil/output/hipsometria.csv}
84 \newpage
85
86 \flushleft\section{Mapas}
87 \subsection{Mapa da bacia e elava\c{c}\~ao}
88 \begin{figure}[h]
89 \centering
90 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/Mapa_da_bacia.png}
91 }
92 \label{elava\c{c}\~ao}
93 \caption{elava\c{c}\~ao}
94 \end{figure}
95 \newpage
96
97 \subsection{Mapa de relevo sombreado}
98 \begin{figure}[h]
99 \centering
100 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/Sombreado.png}
101 \label{Relevo sombreado}
102 \caption{Relevo sombreado}
103 \end{figure}
104 \newpage
105
106 \subsection{Mapa de declividade}
107 \begin{figure}[h]
```

```
108 \centering
109 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/declividade.png}
110 \label{Mapa de declividade}
111 \caption{Mapa de declividade}
112 \end{figure}
113 \newpage
114
115 \subsection{Mapa de aspecto}
116 \begin{figure}[h]
117 \centering
118 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/aspecto.png}
119 \label{Aspecto}
120 \caption{Aspecto}
121 \end{figure}
122 \newpage
123
124 \subsection{Mapa planialtimétrico}
125 \begin{figure}[h]
126 \centering
127 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/planialtimetrico.
128 png}
129 \label{Planiálmétrico}
130 \caption{Planiálmétrico}
131 \end{figure}
132 \newpage
133
134 \flushleft\section{Gr\'aficos}
135 \subsection{Curva hipsom\'etrica}
136 \begin{figure}[h]
137 \centering
138 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/Curva_hipsometric
139 a.png}
140 \label{Curva hipsometrica}
141 \caption{Curva hipsom\'etrica}
142 \end{figure}
143 \newpage
144
145 \subsection{Perfil longitudinal do canal e inclina\c c\~oes}
146 \begin{figure}[h]
147 \centering
148 \includegraphics[width=16cm]{/home/Bacia_Facil/output/Perfil_canal.png}
149 \label{Perfil longitudinal do canal e inclinacoes}
150 \caption{Perfil longitudinal do canal e inclina\c c\~oes}
151 \end{figure}
152
153
154
155 \end{document}
156
```

15 APÊNDICE F: Lançador desktop para Ubuntu

```
1 [Desktop Entry]
2 Name=Bacia Facil
3 Comment=Delimita bacias
4 Exec=/home/Bacia_Facil/BaciaFacil.sh
5 Icon=/home/Bacia_Facil/input/dados/icone.png
6 Terminal=false
7 Type=Application
8 Name[pt_BR]=Bacia Fácil
```

16 ANEXO A: Instalação e primeiros passos com R+SAGA (HENGL ET AL. 2010)

The following text provides instructions how to obtain and install SAGA and R and implement the analysis described in this article with your own data. R+SAGA can be run on Windows™ and Linux operating systems. Mac OS™ version of SAGA is still under development. Start with installing R and its spatial packages. Visit the

R project homepage⁴ and obtain the recent installation from CRAN. After you finish installing R, open the new session and install the contributed packages: select the *Packages ?! Install package(s)* from the main menu. Note that, if you wish to install a package on the fly, you will need to select a suitable CRAN mirror from where it will download and unpack a package. Another quick way to get all packages used in R to do spatial analysis⁵ (as explained in Bivand et al., 2008) is to install the *ctv* package and then execute the command:

```
> install.packages("ctv")
> library(ctv)
> install.views("Spatial")
```

This will allow most of the spatial packages available for R, including maptools, rgdal, gstat, geoR, and RSAGA.

Next, if you are a Windows™ user, obtain the SAGA binaries from a Source Forge repository. SAGA GIS is a fullfledged GIS with support for raster and vector data. It includes a large set of geoscientific algorithms (over 300 modules), being especially powerful for the analysis of DEMs. With the release of version 2.0 in 2005, SAGA works under both Windows and Linux operating systems. In addition, SAGA is an open-source package, which makes it especially attractive to users that would like extend or improve its existing functionality. To install SAGA simply unzip the binaries to your program files directory. Then open SAGA GUI and test its functionality using point-and-click operations. Now you can consider switching to the scripting environment. Go to your R session and load the RSAGA library:

```
> library(RSAGA)
```

First check if R is able to locate SAGA on your machine:

```
> rsaga.env()

$workspace
[1] "."

$cmd
[1] "saga_cmd.exe"

$path
[1] "C:/Progra~1/saga_vc"

$modules
[1] "C:/Progra~1/saga_vc/modules"
```

which means that you can now send operations from R to SAGA. Open the modules folder under the SAGA directory and you will notice a large number of DLL libraries. To get an info what can a certain module do, type:

```
> rsaga.get.modules("ta_channels")

$ta_channels
  code      name interactive
1  0      Channel Network    FALSE
2  1      Watershed Basins    FALSE
3  2 Watershed Basins (extended)  FALSE
4  3  Vertical Distance to CN    FALSE
5  4 Overland Flow Distance to CN  FALSE
6  5      D8 Flow Analysis    FALSE
7  6      Strahler Order    FALSE
8 NA          <NA>    FALSE
9 NA          <NA>    FALSE
```

Next, we need to get the list of parameters needed to extract channel network from a DEM map:

```
> rsaga.get.usage("ta_channels", 0)

SAGA CMD 2.0.4
library path: C:/Progra~1/saga_vc/modules
library name: ta_channels
module name : Channel Network
Usage: 0 -ELEVATION <str> [-SINKROUTE <str>]
-CHNLNTRK <str> -CHNLROUTE <str>
-SHAPES <str> -INIT_GRID <str>
[-INIT_METHOD <num>] [-INIT_VALUE <str>]
[-DIV_GRID <str>] [-DIV_CELLS <num>]
[-TRACE_WEIGHT <str>] [-MINLEN <num>]
-ELEVATION:<str> Elevation
    Grid (input)
-SINKROUTE:<str> Flow Direction
    Grid (optional input)
-CHNLNTRK:<str> Channel Network
    Grid (output)
-CHNLROUTE:<str> Channel Direction
    Grid (output)
-SHAPES:<str> Channel Network
    Shapes (output)
-INIT_GRID:<str> Initiation Grid
    Grid (input)
-INIT_METHOD:<num> Initiation Type
    Choice
    Available Choices:
    [0] Less than
    [1] Equals
    [2] Greater than
-INIT_VALUE:<str> Initiation Threshold
    Floating point
-DIV_GRID:<str> Divergence
    Grid (optional input)
-DIV_CELLS:<num> Tracing: Max. Divergence
    Integer
    Minimum: 1.000000
-TRACE_WEIGHT:<str> Tracing: Weight
    Grid (optional input)
-MINLEN:<num> Min. Segment Length
```

Finally, you can generate a stream network shown in Fig. 3, using the `rsaga.geoprocessor`:

```
> rsaga.geoprocessor(lib="ta_channels",
+ module=0, param=list(ELEVATION="DEM.sgrd",
+ CHNLNTRK="tmp.sgrd",
+ CHNLROUTE="tmp.sgrd",
+ SHAPES="streams.shp",
+ INIT_GRID="DEM.sgrd",
+ DIV_CELLS=3, MINLEN=40))
```

SAGA CMD 2.0.4

library path: C:/Progra~1/saga_vc/modules

library name: ta_channels

module name : Channel Network

author : (c) 2001 by O.Conrad

Load grid: DEM.sgrd...

ready

Load grid: DEM.sgrd...

ready

Parameters

Grid system: 30; 128x 129y;

6551817x 5070464y

Elevation: DEM.sgrd

Flow Direction: [not set]

Channel Network: Channel Network

Channel Direction: Channel Direction

Channel Network: Channel Network

Initiation Grid: DEM.sgrd

Initiation Type: Greater than

Initiation Threshold: 0.000000

Divergence: [not set]

Tracing: Max. Divergence: 3

Tracing: Weight: [not set]

Min. Segment Length: 40

Channel Network: Pass 1

Channel Network: Pass 2

Channel Network: Pass 3

Create index: DEM.sgrd

ready

Channel Network: Pass 4

Channel Network: Pass 5

Channel Network: Pass 6

ready

ready

Save grid: tmp.sgrd...

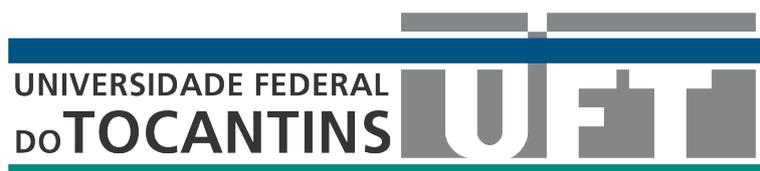
ready

```
Save grid: tmp.sgrd...  
ready
```

```
Save shapes: streams.shp...  
ready
```

```
Save table: streams.dbf...  
ready
```

17 ANEXO B: Relatório da bacia gerado automaticamente



Universidade Federal do Tocantins

Autor: Hugo Lopes Pereira

Relatório automático da sub-bacia do Ribeirão Taquarussu¹

20 de abril de 2018

¹Este relatório foi gerado automaticamente a partir do programa "BACIA FACIL". O referido programa foi parte de dissertação de mestrado apresentada junto ao Programa de Pós-graduação Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins-UFT

Sumário

1	Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado	2
2	Características morfométricas	2
3	Dados morfométricos do canal principal	3
4	Tempos de concentração	3
5	Hipsometria	4
6	Mapas	5
6.1	Mapa da bacia e elevação	5
6.2	Mapa de relevo sombreado	6
6.3	Mapa de declividade	7
6.4	Mapa de aspecto	8
6.5	Mapa planialtimétrico	9
7	Gráficos	10
7.1	Curva hipsométrica	10
7.2	Perfil longitudinal do canal e inclinações	11
8	Difinições	12
8.1	Área (A)	12
8.2	Perímetro (P)	12
8.3	Amplitude altimétrica (Hmax)	12
8.4	Altitude média (Pm)	12
8.5	Comprimento total dos cursos d'água (Ld)	12
8.6	Número de canais (Nt)	12
8.7	Densidade de drenagem (Dd)	12
8.8	Ordem da bacia (u)	12
8.9	Gradiente de canais do canal principal (Gcp)	13
8.10	Densidade hidrográfica (Dh)	13
8.11	Coefficiente de torrencialidade (Ctr)	13
8.12	Extensão do percurso superficial (Eps)	13
8.13	Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (Rlm)	13
8.14	Textura topográfica (T)	13
8.15	Comprimento médio dos canais (Lmt)	13
8.16	Coefficiente de manutenção (Cm)	13
8.17	Comprimento do canal principal (Lp)	14
8.18	Inclinação aparente do canal principal (S1)	14
8.19	Inclinação média do canal principal (S2)	14
8.20	Inclinação equivalente do canal principal (S3)	14
8.21	Índice de circularidade (Ic)	14
8.22	Relação de relevo (Rr)	14
8.23	Coefficiente de compacidade (Kc)	14
8.24	Fator de forma (Kf)	14
8.25	Forma da bacia (Fb)	15
8.26	Declividade média da bacia (Dm)	15
8.27	Índice de rugosidade (Ir)	15
8.28	Coefficiente de rugosidade (Cr)	15
8.29	Índice de Sinuosidade (IS)	15
9	Referências	15

1 Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado

Este relatório foi gerado a partir do MDE SRTM1

2 Características morfométricas

	Característica	Siglas	Unidades	Valores
1	Área	A	km ²	447.968769879022
2	Perímetro	P	km	150.734895459445
3	Altitude máxima da bacia	P2	m	716.728271484375
4	Altitude mínima da bacia	P1	m	206.62321472168
5	Amplitude altimétrica	Fm	m	510.105056762695
6	Altitude média	Pm	m	469.258243104611
7	Comprimento ortogonal da bacia	L	m	33075.2
8	Largura ortogonal da bacia	B	m	27086.4000000004
9	Centroide eixo X	CX	m	807346.95235672
10	Centroide eixo Y	CY	m	8861624.78985612
11	Comprimento do maior segmento	Lm	m	6619.6701838
12	Comprimento total dos cursos d'água	Ld	m	243203.241628297
13	Número de canais	Nt	und	142
14	Densidade de drenagem	Dd	km/km ²	0.542902224398313
15	Ordem da bacia	u	Adimensional	5
16	Comp. canais de 1ª ordem	Lu	m	123148.07056735
17	Gradiente de canais do canal principal	Gcp	m/km	40.5732404995576
18	Densidade hidrográfica	Dh	und/km ²	0.316986382864029
19	Num. canais 1ª ordem	Np	und	72
20	Coef. de torrencialidade	Ctr	und/km ²	0.160725489902888
21	Extensão do percurso superficial	Eps	km	0.920976149165974
22	Comp. médio canais de 1ª ordem	Lm1	m	1710.38986899097
23	Comp. médio canais de 2ª ordem	Lm2	m	1562.53360295966
24	Relação Lm1/Lm2	Rlm	Adimensional	1.09462597524383
25	Textura topográfica	T	und/km	0.942051271984362
26	Comp. médio dos canais	Lmt	m	1712.69888470197
27	Coef. de manutenção	Cm	km	1841.95229833195
28	Comprimento linear da foz até a nascente mais distante	La	m	34070.1956230608
29	Comprimento do canal principal	Lp	m	47459.6530702713
30	Inclinação aparente do canal principal	S1	m/m	0.00920524751301258
31	Inclinação média do canal principal	S2	m/m	0.00372331344118048
32	Inclinação equivalente do canal principal	S3	m/m	0.000794680114849438
33	Índice de circularidade	Ic	Adimensional	0.247830873596151
34	Relação de relevo	Rr	Adimensional	0.0154225841948861
35	Coef. de compacidade	Kc	Adimensional	1.99410474224838
36	Fator de forma	Kf	Adimensional	0.409489509518664
37	Forma da bacia	Fb	Adimensional	37.345974658356
38	Declividade média da bacia	Dm	m/m	0.148339346537771
39	Declividade máxima da bacia	Dmax	m/m	1.57079637050629
40	Declividade mínima da bacia	Dmin	m/m	9.93778303381987e-06
41	Índice de rugosidade	Ir	Adimensional	0.276937169993295
42	Coefficiente de rugosidade	Cr	km/km ²	0.00140558243250325
43	Índice de sinuosidade	IS	Adimensional	1.39299620100061



3 Dados morfométricos do canal principal

	Altitude	Desnível	Distância	Declividade	Gradiente
1	643.89679	75.19696	4732.70972	0.01589	37.59848
2	568.69983	47.97083	5826.21483	0.04387	231.604
3	520.729	68.1452	9158.36409	0.02045	153.2235
4	452.5838	33.98709	12420.17661	0.01042	112.4209
5	418.59671	3.59534	13234.86591	0.00441	56.60963
6	415.00137	11.00061	15438.78914	0.00499	71.5605
7	404.00076	3.43277	16673.86261	0.00278	44.62704
8	400.56799	0.07614	17724.37563	7e-05	1.2466
9	400.49185	18.98608	19015.03329	0.01471	270.22561
10	381.50577	28.75729	19705.96212	0.04162	805.80733
11	352.74847	49.41141	20769.06723	0.04648	940.60698
12	303.33707	12.70435	22510.50907	0.0073	157.86881
13	290.63272	10.17023	22700.28535	0.05359	1211.4371
14	280.46249	9.88385	23849.37464	0.0086	200.19761
15	270.57864	4.71088	26473.68206	0.0018	45.16729
16	265.86777	5.18942	27951.95553	0.00351	95.52956
17	260.67834	3.28418	28582.08436	0.00521	147.32539
18	257.39417	12.18031	29625.2211	0.01168	339.83234
19	245.21385	5.21135	31480.88667	0.00281	85.80352
20	240.0025	9.29851	33555.83363	0.00448	145.72528
21	230.70399	3.10185	35365.45175	0.00171	59.06872
22	227.60214	2.32924	36013.38849	0.00359	128.29831
23	225.2729	0.01817	38203.45406	1e-05	0.30793
24	225.25473	7.63867	39925.82243	0.00443	173.25095
25	217.61606	2.29538	43477.77729	0.00065	26.94895
26	215.32068	5.32036	45199.25076	0.00309	137.0319
27	210.00032	2.97754	46355.71633	0.00257	117.86278
28	207.02278	0.00385	46717.46098	1e-05	0.49467

4 Tempos de concentração

Método	Engineers	Dooge	Giandotti	Johnstone	Kirpich	Pasini	Pickering	Picking	VenteChow	Ventura
Tc (h)	8.75	9.9	13.18	10.28	7.87	30.79	7.88	5.52	8.48	28.02

5 Hipsometria

Altura relativa	Área relativa	Altura absoluta	Área absoluta
0	100	716.728271	0
1	100	680.790344	8958807.04
2	100	672.157776	17917614.08
3	100	666.958862	26876421.12
4	100	662.64917	35835228.16
5	100	658.680176	44794035.2
6	100	654.633301	53752842.24
7	100	650.927063	62711649.28
8	100	647.23407	71670456.32
9	100	643.532043	80629263.36
10	100	639.766174	89588070.4
11	100	635.885254	98546877.44
12	100	631.891968	107505684.48
13	100	627.892944	116464491.52
14	100	623.661804	125423298.56
15	100	619.354065	134382105.6
16	100	614.782776	143340912.64
17	100	610.011108	152299719.68
18	100	604.684021	161258526.72
19	100	598.829407	170217333.76
20	100	591.829102	179176140.8
21	100	583.846191	188134947.84
22	100	574.157593	197093754.88
23	100	562.058411	206052561.92
24	100	545.560547	215011368.96
25	100	524.610779	223970176
26	100	500.926758	232928983.04
27	100	476.674225	241887790.08
28	100	452.585175	250846597.12
29	100	428.579498	259805404.16
30	100	406.807953	268764211.2
31	100	373.162415	277723018.24
32	100	338.676331	286681825.28
33	100	310.941742	295640632.32
34	100	297.120575	304599439.36
35	100	289.239258	313558246.4
36	100	283.694031	322517053.44
37	100	279.179779	331475860.48
38	100	275.298065	340434667.52
39	100	271.36322	349393474.56
40	100	267.723846	358352281.6
41	100	264.041229	367311088.64
42	100	260.334869	376269895.68
43	100	257.138062	385228702.72
44	100	253.702545	394187509.76
45	100	249.741882	403146316.8
46	100	245.030991	412105123.84
47	100	239.734879	421063930.88
48	100	233.568481	430022737.92
49	100	225.381042	438981544.96
50	100	206.62587	447940352

6 Mapas

6.1 Mapa da bacia e elevação

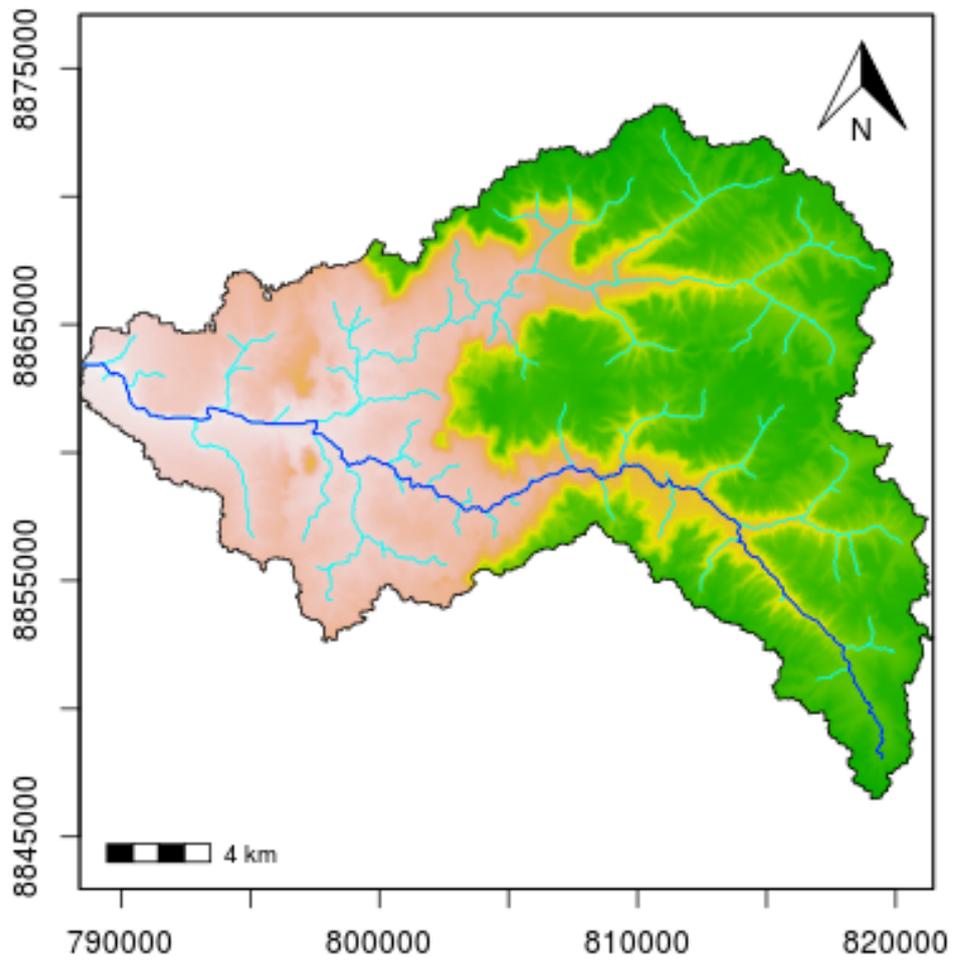


Figura 1: elevação

6.2 Mapa de relevo sombreado

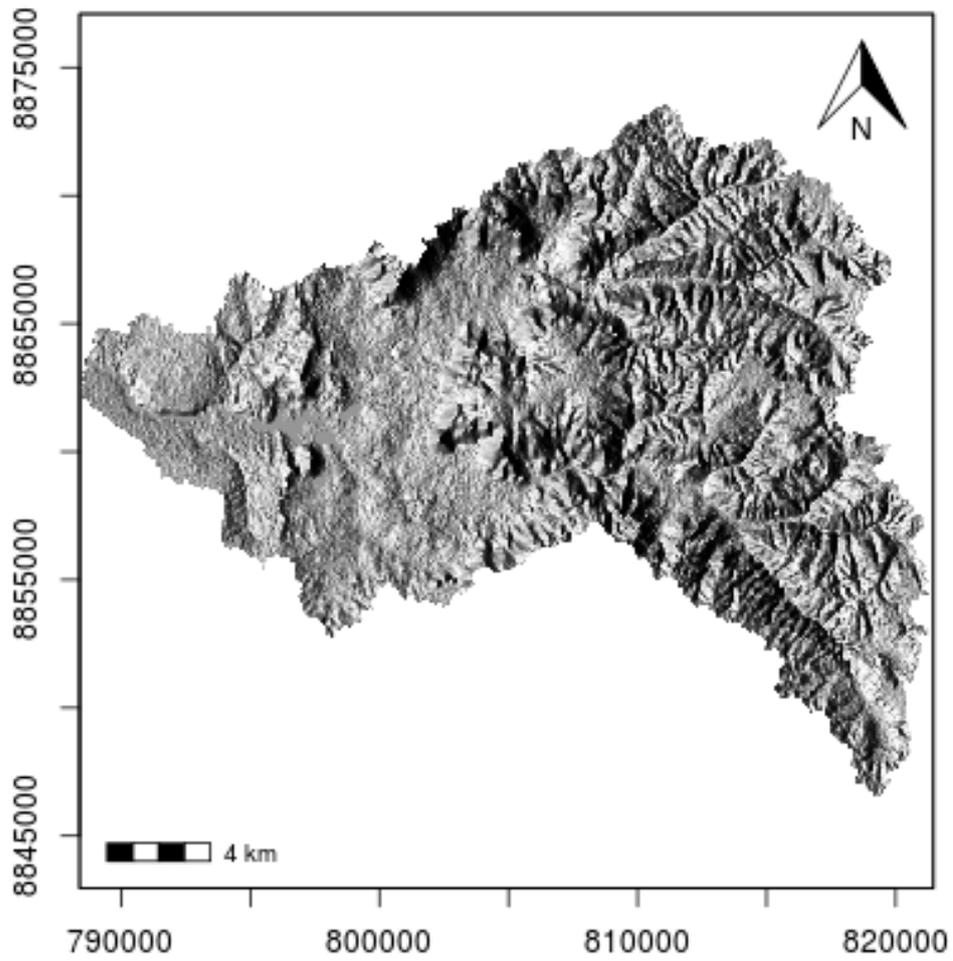


Figura 2: Relevo sombreado

6.3 Mapa de declividade

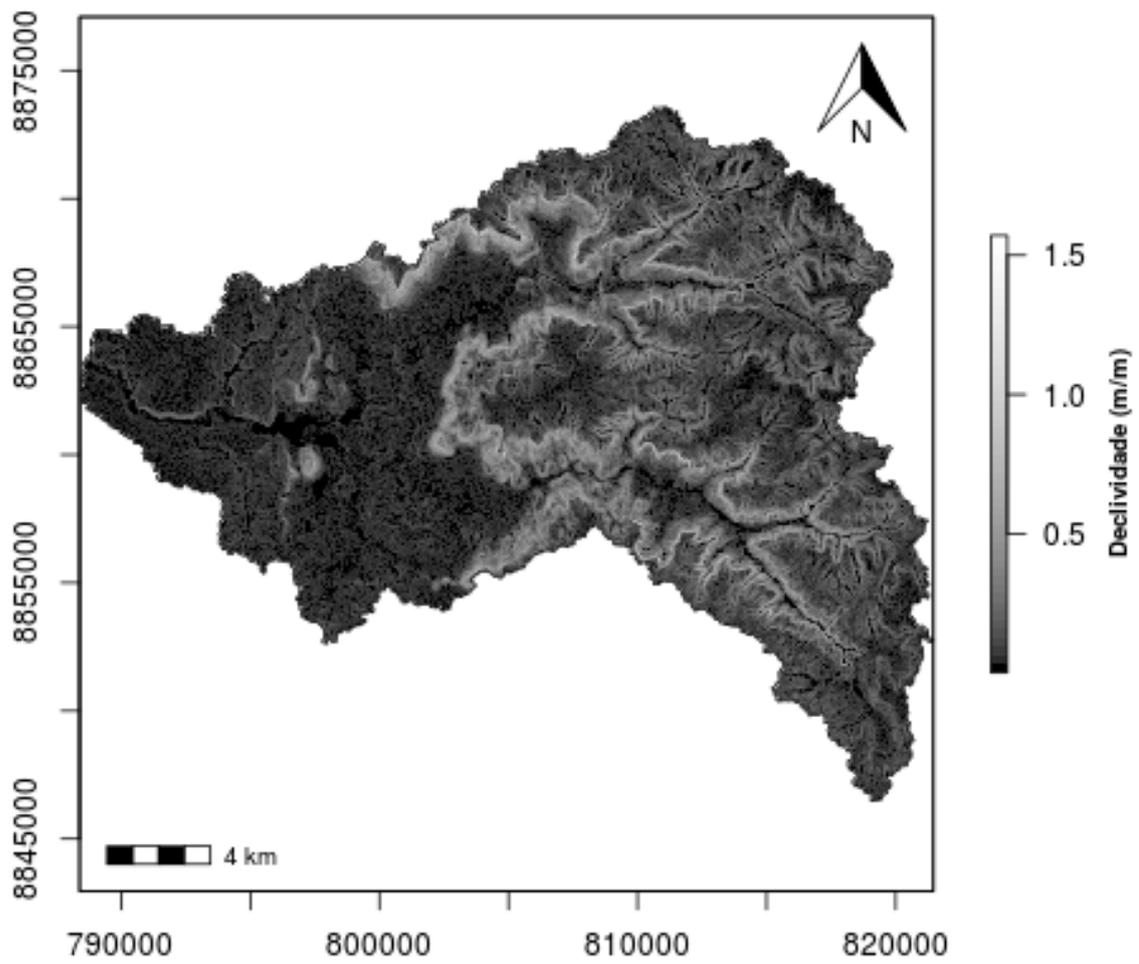


Figura 3: Mapa de declividade

6.4 Mapa de aspecto

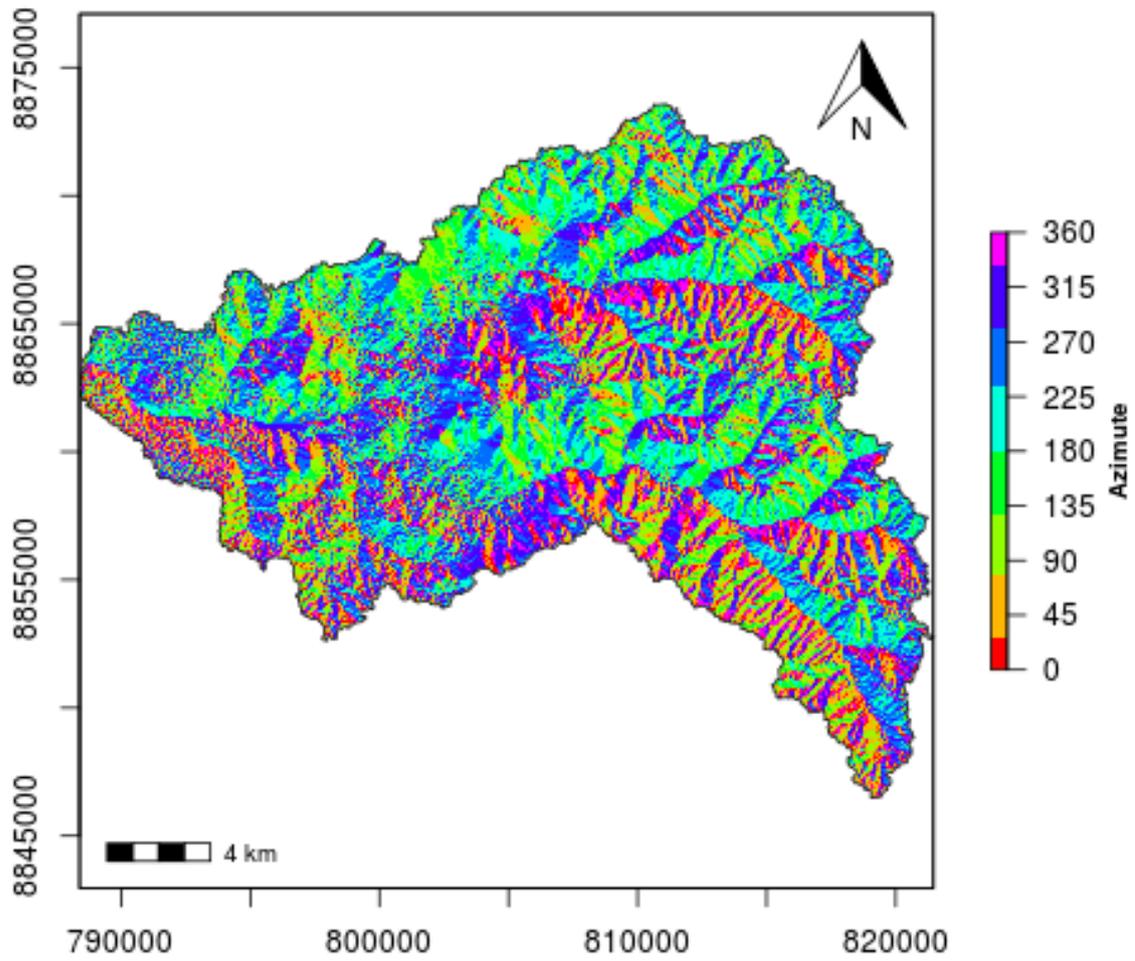


Figura 4: Aspecto

6.5 Mapa planialtimétrico

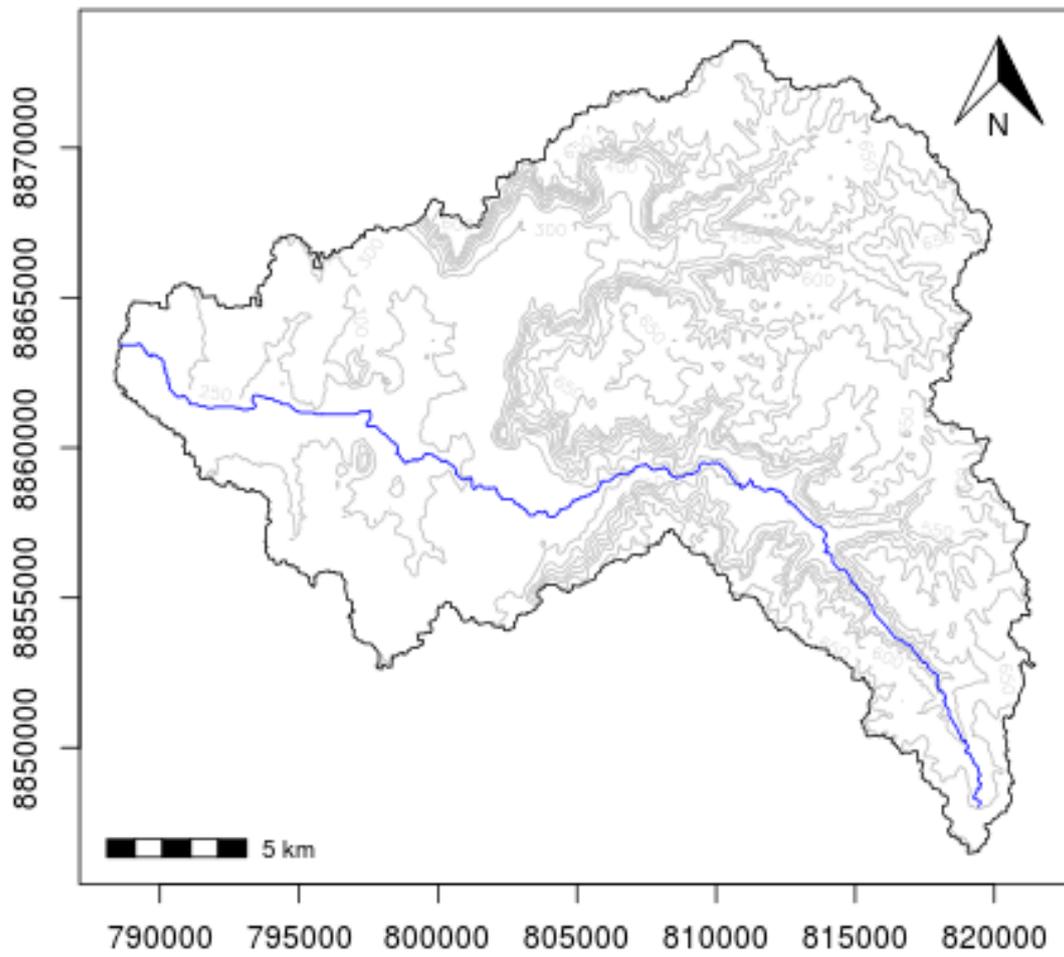


Figura 5: Planiálmétrico

7 Gráficos

7.1 Curva hipsométrica

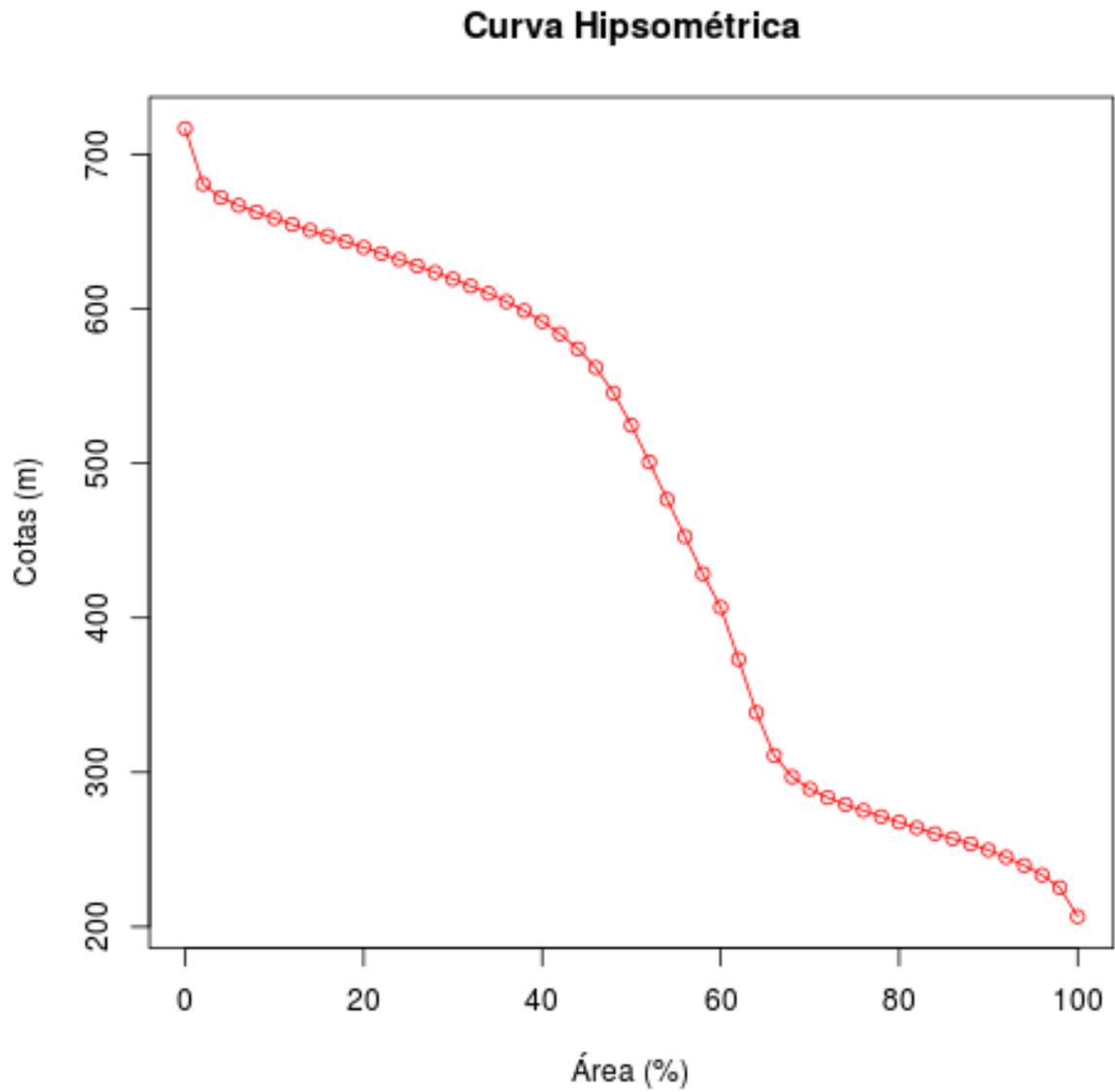


Figura 6: Curva hipsométrica

7.2 Perfil longitudinal do canal e inclinações

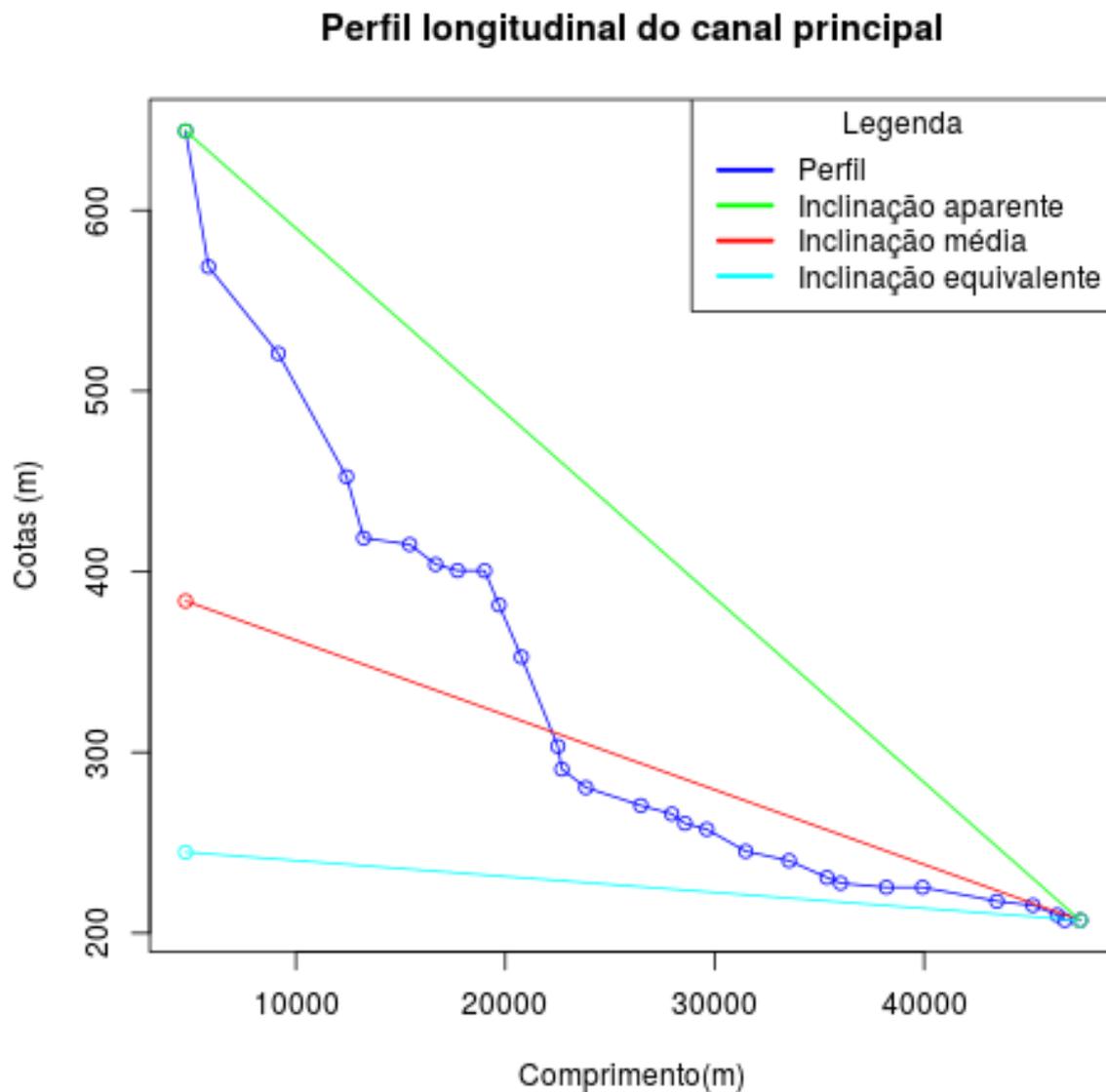


Figura 7: Perfil longitudinal do canal e inclinações

8 Definições

8.1 Área (A)

É a área plana em projeção horizontal da região entre os divisores topográficos da bacia hidrográfica, é o elemento básico para o cálculo de outras características físicas. (CARVALHO e SILVA, 2003)

8.2 Perímetro (P)

Comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas. (TONELLO, 2005)

8.3 Amplitude altimétrica (Hmax)

É a diferença altimétrica entre o ponto de desembocadura (P1) e a altitude do ponto mais alto situado em qualquer lugar da divisória topográfica (P2). (MARCUSO, 2012)

$$Fm = P_2 - P_1 \quad (1)$$

8.4 Altitude média (Pm)

É obtida através da média aritmética de todos os píxeis do Modelo Digital de Elevação no interior da divisória topográfica.

8.5 Comprimento total dos cursos d'água (Ld)

É o comprimento de todos os cursos d'água da bacia hidrográfica, sejam eles efêmeros, intermitentes ou perenes, medidos em projeção horizontal.

8.6 Número de canais (Nt)

Consiste na contagem da quantidade de canais de cada ordem. (MACHADO e SOUZA, 2005)

8.7 Densidade de drenagem (Dd)

Indica o grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem. É a relação entre o comprimento total dos cursos d'água (L) (sejam eles efêmeros, intermitentes ou perenes) e a área total (A) de uma bacia. (CARVALHO e SILVA, 2003)

$$Dd = \frac{Ld}{A} \quad (2)$$

Tabela 1: Classificação da drenagem da bacia a partir da densidade de drenagem.

Classificação da drenagem da bacia	Limites da Dd
Pobre	$< 0,5 \text{ km/km}$
Regular	$0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}$
Boa	$1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}$
Muito boa	$2,5 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}$
Bem drenada	$Dd \leq 3,5 \text{ km/km}$

8.8 Ordem da bacia (u)

Para um melhor entendimento deste índice, antes é preciso entender o processo de hierarquização dos canais de uma bacia hidrográfica. Os menores canais da bacia, sem afluentes, são considerados de primeira ordem; quando dois canais de primeira ordem se juntam, dão origem a um canal de segunda ordem podendo receber afluentes de primeira ordem; da confluência de dois canais de segunda ordem, surge um canal de terceira ordem podendo receber afluentes de primeira e/ou de segunda ordem; os canais de quarta ordem surgem da confluência de canais de terceira ordem com afluentes de qualquer ordem inferior e assim por diante, sendo a bacia classificada pela maior ordem de seus canais (STRAHLER, 1964 apud SANTOS et al. 2007)

8.9 Gradiente de canais do canal principal (Gcp)

Conforme Hack (1973) o cálculo do índice de gradiente de canais, deriva da declividade do perfil semilogarítmico do canal principal (apud LIMA, 2013)

$$G_{cp} = \frac{dh}{\ln L_2 - \ln L_1} = \frac{(h_2 - h_1)}{\ln L_2 - \ln L_1} \quad (3)$$

Onde, G_{cp} é índice de gradiente, dh é a diferença altimétrica entre dois pontos do perfil e $\ln L_2$ e $\ln L_1$ são, respectivamente, os logaritmos da distância da nascente ao ponto final e inicial do trecho considerado. E h_2 e h_1 representam as altitudes do final e do início do canal respectivamente.

8.10 Densidade hidrográfica (Dh)

É a relação existente entre o número de rios (N_r) ou cursos d'água e a área da bacia hidrográfica (A) expressa pela fórmula:" (TEODORO, et al. 2007)

$$Dh = \frac{N_r}{A} \quad (4)$$

8.11 Coeficiente de torrencialidade (Ctr)

O coeficiente de torrencialidade afere a predisposição natural da bacia hidrográfica a sofrer inundações. é representado pela relação entre o número de cursos de água de primeira ordem e da área total da bacia. Determinou-se com a seguinte fórmula: (ROMERO e LOPEZ, 1987)

$$Ctr = \frac{N_p}{A} \quad (5)$$

8.12 Extensão do percurso superficial (Eps)

É a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente. Seu valor aproximado é obtido pela metade do inverso da densidade de drenagem (Dd):(MARCUIZZO, et al. 2012)

$$Eps = \frac{1}{(2 * Dd)} \quad (6)$$

8.13 Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (Rlm)

É a relação entre o comprimento médio dos canais de determinada ordem (Lm_u) pelo comprimento médio dos canais de ordem imediatamente superior (Lm_{u+1}). (STIPP, et al. 2010)

$$Rlm = \frac{Lm_u}{Lm_{u+1}} \quad (7)$$

8.14 Textura topográfica (T)

A textura topográfica expressa o espaçamento entre canais, e é definido pela relação entre o número de canais (perenes ou temporários) e o comprimento do perímetro da bacia. Este espaçamento é classificado como grosseiro, se menor do que 4,0; médio, entre 4,0 e 10,0 e fino se maior do que 10,0. (MARCHETTI, 1980)

$$T = \frac{N_t}{Lm_P} \quad (8)$$

8.15 Comprimento médio dos canais (Lmt)

É a relação entre somatório do comprimento total dos canais por trecho, desde a ordem 1 até a enésima ordem, pelo número total dos canais de drenagem (N_t).

$$Lmt = \frac{\sum Lu_i}{N_t} \quad (9)$$

8.16 Coeficiente de manutenção (Cm)

Este índice indica a área mínima necessária para manter o escoamento em um metro de canal e pode ser obtido pela seguinte expressão:(SHUMM, 1956 apud hyperlinkMarcuzzo2012MARCUIZZO, 2012)

$$Cm = \frac{1}{Dd} * 1000 \quad (10)$$



8.17 Comprimento do canal principal (Lp)

o comprimento do canal principal é determinado medindo-se o comprimento do trecho entre a nascente mais distante e o exutório. (TUCCI, 2004)

8.18 Inclinação aparente do canal principal (S1)

É uma declividade aparente que superestima a declividade do curso d'água pois consiste apenas na divisão da diferença de altitude do exutório até a nascente pelo comprimento total do curso d'água. (CARVALHO e SILVA, 2003)

8.19 Inclinação média do canal principal (S2)

Traçando-se o perfil longitudinal de um curso d'água de forma aproximada a consecutivos segmentos de reta, a declividade média consiste no coeficiente angular de uma função de 1º grau, tal que sua integral em relação ao eixo das abscissas, se equivalha a área entre o perfil longitudinal e o eixo das abscissas. (CARVALHO e SILVA, 2003)

8.20 Inclinação equivalente do canal principal (S3)

Da mesma aproximação para o perfil longitudinal da declividade média, a declividade equivalente leva em consideração uma declividade tal que seja equivalente ao perfil do curso d'água com uma declividade constante. (CARVALHO e SILVA, 2003)

$$S_3 = \left(\frac{\sum L_i}{\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{D_i}} \right)} \right)^2 \quad (11)$$

Onde L_i e D_i são o comprimento e a declividade de cada segmento do canal principal respectivamente.

8.21 Índice de circularidade (Ic)

Este índice indica o quão se aproxima da forma circular a forma da bacia hidrográfica. Aproximando-se da unidade à medida que se aproxima da forma circular. (TONELLO, 2005)

$$Ic = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad (12)$$

8.22 Relação de relevo (Rr)

Relaciona a amplitude altimétrica máxima (H_{max}) da bacia e sua extensão, ou seja, seu comprimento (L). A fórmula utilizada para esse cálculo é: (CASTRO e CARVALHO, 2009)

$$Rr = \frac{H_{max}}{L} \quad (13)$$

8.23 Coeficiente de compacidade (Kc)

O coeficiente de compacidade relaciona o quão irregular é a forma da bacia hidrográfica, quando comparada com a forma circular. Ao contrário do índice de circularidade, esta característica indica formas irregulares com a proporção que o índice é maior que a unidade. É definido com a relação entre o perímetro da bacia (P) e a circunferência do círculo de área igual a da bacia. (PORTO, 1999)

$$Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

8.24 Fator de forma (Kf)

O fator de forma indica o quão estreita é a forma da bacia, é a relação entre a largura média da bacia (\bar{L}) e o maior comprimento da mesma (L). É utilizado para indicar a propensão que a bacia tem às enchentes, quanto maior o fator de forma, ela é mais susceptível a enchentes aumentando a possibilidade de uma chuva intensa abranger toda a bacia. (CARVALHO e SILVA, 2003)

$$Kf = \frac{\bar{L}}{L}; \bar{L} = \frac{A}{L}; Kf = \frac{A}{L^2} \quad (15)$$

8.25 Forma da bacia (Fb)

Segundo Miller (1953), “a forma da bacia é a relação existente entre a área da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro” (apud BARROS e STEINKE, 2009). O que levou à seguinte dedução:

$$Fb = \frac{A}{Ac} = \frac{A}{\pi r^2} = \frac{2A}{P * r}; \quad (16)$$

em que:

$$r = \frac{P}{2\pi}; \quad (17)$$

substituindo 17 em 16:

$$Fb = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (18)$$

8.26 Declividade média da bacia (Dm)

Conforme Carvalho e Silva (2003), a declividade média de bacias hidrográficas, consiste em determinar um valor médio de declividade entre curvas de nível que representam a topografia de uma bacia hidrográfica. A partir da declividade da bacia é possível ter perspectivas da velocidade do escoamento e obter parâmetros de erodibilidade e vazão, por exemplo.

Tabela 2: Índices de dissecação do relevo a partir do valor da declividade média da bacia.

Declividade média	Graus de dissecação
Até 5%	Muito fraca
Entre 5 e 10%	Fraca
Entre 10 e 20%	Média
Entre 20 e 30%	Forte
Acima de 30%	Muito forte

8.27 Índice de rugosidade (Ir)

“Combina as qualidades de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, expressando-se como número adimensional que resulta do produto entre a amplitude altimétrica (Fm) e a densidade de drenagem (Dd).” (MARCUSOZZO, et al. 2012)

$$Ir = Fm * Dd \quad (19)$$

8.28 Coeficiente de rugosidade (Cr)

Segundo Rocha e Kurtz (2001), este coeficiente indica a propensão à erosão das bacias à medida que o índice aumenta. Pode ser obtido pelo produto entre a densidade de drenagem (Dd) e a declividade média da bacia (Dm). (apud, VALLE JUNIOR, et al. 2011)

$$Cr = Dm * Dd \quad (20)$$

8.29 Índice de Sinuosidade (IS)

É a relação entre o comprimento real do curso d'água principal (Lp) e o comprimento vetorial entre os extremos do canal (La). Indica o quão sinuoso é o curso d'água, o que implica diretamente na velocidade de escoamento. Ou seja, quanto maior for o índice de sinuosidade, menor será a velocidade de escoamento e obtido através da seguinte fórmula: (SCHUMM 1963 apud BRUBACHER, et al. 2011)

$$IS = \frac{Lp}{La} \quad (21)$$

9 Referências

BARROS, L. L.; STEINKE, V. A. Análise morfométrica automatizada para bacia do Rio Maranhão. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Abril 2009.

BRUBACHER, J. P. et al. Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba-PR, 2011.



-
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. Hidrologia. Apostila da disciplina IT-156/Hidráulica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2003.
- CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo - GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Revista Scientia Plena, v. 5, n. 2, 2009.
- LIMA, A. G. Índice de gradiente de canal: significados e diretrizes para aplicação. Geosul, Florianópolis, v. 28, n. 56, p. 147-162, julho/dezembro 2013.
- MACHADO, G.; SOUZA, J. O. P. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Chôco – Ibaíti – PR. Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina, Universidade de São Paulo, Março 2005.
- MARCHETTI, D. A. B. Características da rede de drenagem e formas de relevo em três unidades de solo e Piracicaba, SP. Pesq. agropec. bras, Brasília, Julho 1980.
- MARCUZZO, F. F. N. et al. Detalhamento hidromorfológico da bacia do Rio Paraíba. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João pessoa, Paraíba, Novembro 2012.
- ROMERO D. M. A.; LOPEZ B. F.; Morfometria de redes fluviais: revisión critica de los parametros mas utilizados y aplicacion al alto uadalquivir, Revista Papeles de Geografia (Física), n. 12, pag 47-62, 1987.
- SANTOS et al. Análise hidrológica e socioambiental da bacia hidrográfica do córrego Romão dos Reis, Viçosa-MG. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 31, p. 931-940, 2007.
- STIPP, N. A.; CAMPOS, R. A.; CAVIGLIONE, J. H. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Taquara – Uma contribuição para o estudo das ciências ambientais. Portal da Cartografia, Londrina, v. 3, n. 1, 2010.
- TEODORO, V. L. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. Revista Uniara, 2007.
- TONELLO, K. C. Análise ambiental da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Viçosa. 2005.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 3a. ed. Porto Alegre: ABRH, 2004.
- VALLE JUNIOR, R. F. et al. Diagnóstico do uso potencial do solo e conflito ambiental na microbacia hidrográfica do rio Veríssimo, Veríssimo – MG. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 7, n. 12, 2011.