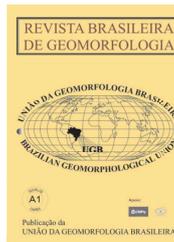


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 4 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>



ANÁLISE DE TÉCNICAS DE SEGMENTAÇÃO PARA MELHORIA NA OBTENÇÃO DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS COM BASE EM FERRAMENTAS OPEN SOURCE

ANALYSIS OF SEGMENTATION TECHNIQUES FOR IMPROVED GEOMORPHOMETRIC DATA FROM OPEN SOURCE TOOLS

Olavo Amancio de Oliveira

*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Distrito Federal. CEP 70910-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0304-2700>
E-mail: olavotop@gmail.com*

Edilson de Souza Bias

*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Distrito Federal. CEP 70910-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0334-0476>
E-mail: edbias@gmail.com*

Valdir Adilson Steinke

*Departamento de Geografia, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Distrito Federal. CEP 70910-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8738-6975>
E-mail: valdirsteinke@gmail.com*

Rogério Baptista de Sousa

*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Distrito Federal. CEP 70910-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6256-2178>
E-mail: rogeriobsousa@gmail.com*

Denilson Pereira Passo

*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Distrito Federal. CEP 70910-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2811-9524>
E-mail: geodenilson@gmail.com*

Gustavo Macedo de Mello Baptista

*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Distrito Federal. CEP 70910-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1973-2725>
E-mail: gmbaptista@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
09/06/2020

Aceito (Accepted):
05/08/2020

Palavras-chave:

Segmentação; Geomorfometria;
Bacia hidrográfica.

Keywords:

Segmentation; Geomorphometry;
Watershade.

Resumo:

O objetivo da pesquisa é demonstrar a viabilidade do uso de segmentação de imagens na obtenção de dados geomorfométricos para gestão de bacias hidrográficas. O estudo foi desenvolvido na bacia do Córrego Bandeirinha (BHCB), situada no estado de Goiás, no município de Formosa-GO. Para aplicação do estudo, utilizou-se o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com dados de 1" x 1" (um segundo de arco) ou 30 m de resolução espacial. Para a segmentação do SRTM, com intuito de efetuar a separação de classes para identificação dos alvos que subsidiaram a pesquisa, foi utilizado o algoritmo ODR_Obia, adaptado do algoritmo de segmentação TA Baatz Segmenter, via plataforma do sistema open source QGIS, cujo resultado da segmentação e extração dos índices pré-definidos, resultou-se em nova imagem raster segmentada. Para a obtenção dos dados geomorfométricos, utilizou-se modelo ODR_Hidro, acessado via plataforma

do QGIS, desenvolvido em linguagem Python. As formulações matemáticas foram compiladas dentro do modelo ODR_Hidro, assim como sua adaptação, por intermédio de outros algoritmos hidrológicos que são utilizados por software como o QGIS, GrassGIS e SagaGIS, subsidiando a extração dos índices geomorfométricos, a delimitação da bacia e a extração dos canais da rede de drenagem. Os resultados foram avaliados a partir da aplicação do teste de hipóteses utilizando a estatística do Teste Mann-Whitney, para verificar se as médias das discrepâncias das coordenadas encontradas para os eixos E e N dos pontos de bifurcações são iguais ou similares àquelas que foram produzidas pelo modelo ODR_Hidro, tanto na imagem SRTM segmentada quanto na do SRTM original. O Teste de Mann-Whitney foi aplicado em seis conjuntos de amostras, sendo que em quatro, as hipóteses foram aceitas e apenas em dois conjuntos de amostras as hipóteses foram rejeitadas. Através dos resultados obtidos, infere-se que a aplicação do modelo ODR_Hidro para caracterização e definição de índices geomorfométricos utilizando a imagem do SRTM segmentado, ser bastante eficiente, haja visto que a validação de campo demonstrou a eficiência do modelo ao comprovar a existência das drenagens de 1ª ordem não mapeada na carta da DSG. Assim, é possível concluir que a segmentação de imagens, visando à caracterização geomorfométrica de bacias hidrográficas, poderá contribuir de forma eficiente para o fornecimento de dados morfométricos.

Abstract:

The objective of this paper is to demonstrate the practicality of using segmenting images for obtaining geomorphometric data for the environmental management of watershade. This study was conducted on the Bandeirinha Stream basin (BHCB), located in Goiás State in the municipality of Formosa-GO. *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) was used, with data 1" x 1" (one second of arc) or 30m spatial resolution. The ODR_Obia algorithm was applied for SRTM segmentation in order to separate the classes and identify the research targets. This algorithm was adapted from the *TA Baatz Segmenter* using the QGIS open *source* platform. The results from the segmentation and extraction of pre-defined indices resulted in a new segmented raster image. To obtain geomorphometric data the ODR_Hidro model was used, accessed via the QGIS platform, developed in *Python* language. The mathematical calculations, along with its adaptation, were compiled within the ODR_Hidro model through the use of intermediary hydrologic algorithms used in *softwares* such as QGIS, GrassGis and SagaGIS, which extract geomorphometric indices, the delineation of the basin, and the extraction of drainage channel networks. The results were evaluated by testing the hypothesis in the *Mann-Whitney statistic test* to check if the average discrepencies of the coordinates for E and N

bifurcation points were equal or similar to those produced by the ODR_Hidro model, for both the SRTM segmented image and the original SRTM. The *Mann-Whitney test* was applied to six samples, four of which accepted the hypothesis and only two rejected. The results suggest that applying the ODR_Hidro model for characterizing and defining geomorphometric indices using SRTM image segmentation is quite efficient as the field validation showed the effectiveness the model has for proving the existence of drainage in the 1st order which was unmapped in the DSG card. We can thus conclude that image segmentation for geomorphometric characterization of watershed will be able to efficiently contribute towards providing morphometric data.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de estudos referentes às características das bacias hidrográficas (BH) é cada vez maior, tendo em vista que a água é um recurso natural e escasso nos dias atuais, além de ser um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre, sendo essencial para todas as espécies do planeta (COELHO NETO, 2015). O conhecimento e, sobretudo, o entendimento do comportamento das bacias hidrográficas facilitam a implementação de métodos de gestão e monitoramento, minimizando a ocorrência de desastres, tais como inundações, movimentos de massas, erosões, além de potencializarem o aproveitamento da água para o abastecimento humano, atividades agroindustriais, construções de usinas hidroelétricas, dentre outros.

Eventos de mudanças na paisagem tem acontecido com frequência no mundo inteiro, tanto em ambientes urbanos quanto rurais, e vem crescendo cada vez mais devido à prática sistemática da produção agrícola intensivista, que ocorre nas partes planas do relevo e, principalmente, em áreas elevadas, onde estão localizados o início das drenagens, os olhos d'água e as nascentes das bacias hidrográficas (MENDOZA *et al.*, 2011). Em função de abarcar todos os elementos que compõem a paisagem ambiental, as bacias hidrográficas são tomadas como unidade de gerenciamento territorial das atividades urbanas e dos múltiplos usos agrícolas. Vanacker *et al.*, (2005) pontua que as condições geológicas e climáticas locais são responsáveis pela caracterização da bacia. A alteração de um destes condicionantes pode acarretar em mudanças na estrutura física dos canais, no carreamento de sedimentos, na composição da fauna e flora e no fluxo de matéria e energia. Analisar a bacia hidrográfica é essencial para caracterizar e compreender a dinâmica hidrogeomorfológica regional, por serem consideradas sistemas abertos, com entrada e saída de energia e matéria (CARVALHO & LATRUBESSE, 2004).

A descrição de bacia hidrográfica como unidade de análise, gerenciamento e aplicação das informações básicas decorre de longa evolução, que se inicia com a implementação do conceito de carga, por Vollenweider (1971), e solidifica-se com os estudos de Likens (1984), confirmando os ensaios e os trabalhos realizados em Hubbard-Brook, pequena bacia hidrográfica situada nos Estados Unidos. Tundisi *et al.* (2008) corroboram com a informação, que representa o conceito de BH e os principais elementos para pesquisa e gerenciamento.

Os elementos relacionados aos estudos geomorfométricos de bacias hidrográficas, segundo Christofolletti, (1980) subdividem-se em três grupos: aqueles que apresentam características geométricas, os que apresentam características da rede de drenagem e os que apresentam características do relevo. A análise geomorfométrica de bacias hidrográficas consiste no estabelecimento entre os parâmetros de mensuração e o estudo matemático de seus condicionantes (CHRISTOFOLLETTI, 1980). Assim, os estudos relacionados à morfometria de bacias hidrográficas auxiliam na gestão do território e na elaboração de planos de gestão e manejo (CAMPANHARO *et al.*, 2012). Diversos autores utilizaram a caracterização morfométrica para o planejamento ambiental e mensuração dos parâmetros físico em bacias hidrográficas (MOREIRA & SERRA, 2017); visando obter diagnóstico físico-ambiental conservacionista (PINTO *et al.*, 2014; APOLINÁRIO *et al.*, 2014; DÉSTRO, 2010); para gestão e planejamento ambiental diante dos diversos usos (FERREIRA *et al.*, 2016); como contribuição da morfometria para o estudo das inundações (FRANCO & SANTO, 2015); como subsídio para a análise de fragilidade ambiental (ALMEIDA *et al.*, 2016); e como suporte para a definição e elaboração de indicadores de gestão ambiental (TONELLO *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2010).

Os autores Christofolletti (1980), Tonello *et al.* (2006), Déstro (2010), Apolinário *et al.* (2014), Teodoro *et al.* (2015), Franco & Santo (2015), Almeida *et*

al. (2016) e Ferreira *et al.* (2016) corroboram em suas pesquisas que os índices geomorfométricos mais empregados em estudos relacionados à morfometria de bacias hidrográficas são eles: área, perímetro, Coeficiente de Compacidade (Kc), Coeficiente de Manutenção (Cm), Índice de circularidade (Ic), Fator de Forma (Kf), Razão de alongação (Re), Densidade de Drenagem (Dd), Número total dos canais, Densidade Hidrográfica (Dh), Relação de Bifurcação (Rb), Comprimento do canal principal (Ccp), linha reta da nascente a foz, Comprimento total da rede de drenagem (Ctr), hierarquização de canais, Índice de rugosidade (Ir), Coeficiente de rugosidade (CR), Amplitude altimétrica, Altitude máxima e Altitude mínima. Portanto, o procedimento realizado neste trabalho, permite a obtenção das variáveis citadas acima, entretanto as mesmas não foram interpretadas. Para Valeriano (2011) os elementos relacionados a morfometria pode ser obtidos a partir de Modelos Numéricos de Terreno (MNTs), gerados a partir de dados cartográficos com técnicas de geoprocessamento. Utilizando das ferramentas de geotecnologias (cartografia, sensoriamento remoto, GPS e Sistemas de Informação Geográfica – SIG), possibilita de forma semi-automatizada, com mínima interferência do usuário (operador) a delimitar e extrair os divisores de bacias hidrográficas, utilizando de dados de elevação, como o Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (CORREA *et al.*, 2017). Ainda assim, alguns dos índices geomorfométricos so podem ser extraídos de forma tradicional sem um processo automatizado tornando os estudos demorados e exaustivos. Entretanto, a concepção de um novo modelo hidrológico totalmente automatizado trará respostas mais eficientes para a extração de dados geomorfométricos com base em imagens do SRTM visando à caracterização geomorfométrica de bacias hidrográficas.

A segmentação de imagens é um dos métodos aplicados no processamento de imagens de satélites e consiste em discriminar e subdividir os objetos de interesse contidos nas imagens (FERREIRA *et al.*, 2013). Gonzalez & Woods (2008) afirmam que o processo de subdivisão do espaço de dados é pré-requisito para outros mais complexos, como o reconhecimento de objetos e a interpretação de dada cena. O processo de segmentação de imagens possibilitou o processo inicial da classificação baseada em objetos. Recentemente, diversos autores utilizaram a segmentação na aplicação localizada de defensivos agrícolas (SU & ZHANG, 2017); Doubrava *et al.* (2014) utilizaram a segmenta-

ção para avaliar a dinâmica na cobertura florestal e dos estoques de carbono na bacia do Rio Iguaçu; Ruiz *et al.* (2017) a utilizaram para avaliar a cobertura da terra a partir de imagens coletadas por VANT, integrando OBIA e árvore de decisão; e Gui *et al.* (2016) utilizaram a segmentação para análises urbanas em edifícios.

A segmentação envolve a etapa de divisão de objetos ou regiões homogêneas da imagem, em função de seus atributos, por meio de determinado algoritmo, e leva em consideração algumas de suas características essenciais, tais como o nível de cinza dos pixels e a textura que melhor representa os objetos presentes na cena (PIAZZA & VIBRANS, 2014). O processo de segmentação pode ser executado de modo manual ou automático. A segmentação manual fundamenta-se no reconhecimento visual das feições representadas na imagem por meio da comparação de diferenças apresentadas pelos elementos interpretativos, principalmente cor, tonalidade e textura (GOMES *et al.*, 2013). Dlugosz *et al.* (2009) pontuam que os processos automáticos de segmentação buscam simular o comportamento do foto-intérprete ao identificar áreas homogêneas na imagem, baseando-se em suas propriedades espectrais e espaciais.

Conforme afirmação de Gonzalez & Woods (2000), os algoritmos de segmentação em geral, baseiam-se nas duas propriedades básicas de valores digitais; descontinuidade e similaridade dos tons de cinza de uma imagem. Gonzalez & Woods (2000) pontua ainda que as principais áreas de interesse da primeira propriedade são a detecção de pontos isolados e detecção de linhas e bordas na imagem. Já a segunda propriedade, baseia-se na limiarização, crescimento de regiões, divisão e fusão de regiões. Estas duas propriedades de segmentação de imagem baseado em descontinuidade ou em similaridade dos valores dos níveis de cinza dos seus pixels, pode ser aplicados tanto em imagens estáticas como em imagens dinâmicas, ou seja, imagens que variam com o tempo (GONZALEZ & WOODS, 2000, p. 256). A metodologia que afere a descontinuidade leva em consideração a variação abrupta dos valores do pixel, e o método por similaridade baseia-se na junção de pixels que possuem alguma semelhança com os pixels vizinhos (DLUGOSZ *et al.*, 2009).

Existem outras metodologias de segmentação com diferentes aplicações, dentre as quais se destacam as de homogeneidade intrarregiões, utilizadas pelo segmentador do software Spring, como pontuado por

Gomes *et al.* (2013), e a metodologia de segmentação multirresolução, proposta por Baatz e Schäpe (2000), ambas segmentadoras de crescimento de regiões (PASSO *et al.*, 2013).

A segmentação do SRTM, principalmente utilizando o limiar de escala da segmentação poderá contribuir de forma significativa, uma vez a imagem segmentada, terão os pixels agrupados e reamostrados novamente, através de segmentos com a mesma altitude. Baseado nos conceitos apresentados e, visando contribuir para uma melhor obtenção de dados geomorfométricos, considerando ainda a importância dos índices de morfometria para estudos e compreensão dos processos que ocorrem em uma bacia, o objetivo do presente artigo foi a criação de um modelo para geração automatizada

de dados geomorfométricos baseados em técnicas de segmentação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Córrego Bandeirinha BHCB (Figura 1), localizada no meridiano central (-45), fuso (23) entre as coordenadas UTM E-235380.96 e N-8284826.96 e coordenadas UTM E-247147.25 e N-8297454.09 ocupando mais de 180 km² de extensão superficial e aproximadamente 92 km de perímetro. O córrego Bandeirinha tem importância fundamental para o município de Formosa-GO, sendo ele o principal corpo hídrico que abastece a cidade com água potável, captada pela SANEAGO – Saneamento de Goiás.

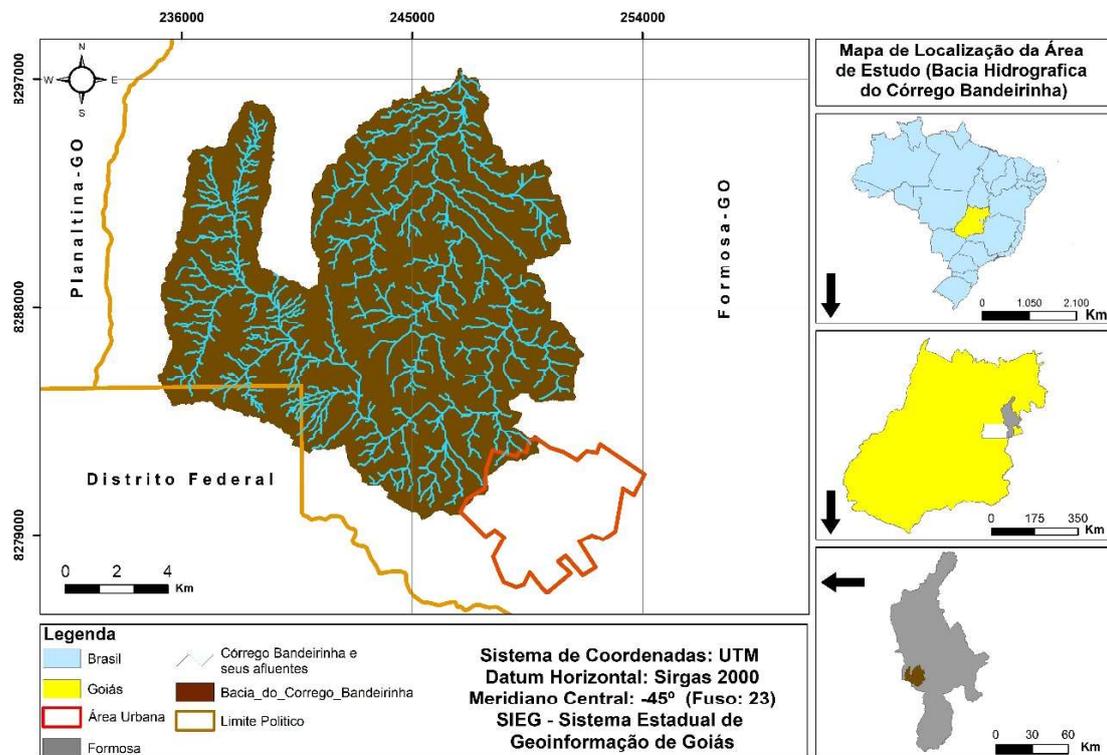


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

2.1 Metodologia

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os seguintes dados e *software*: imagem SRTM, obtida no *site* da *United States Geological Survey* (USGS), 30 m de resolução espacial; cartas topográficas do DSG Diretoria do Serviço Geográfico do Exército, na escala de 1:100.000, dados para a caracterização do meio físico como geologia, geomorfologia e solos

adquiridos junto ao Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). Para a realização da segmentação e desenvolvimento do modelo hidrológico para extração dos dados geomorfométricos e demais procedimentos, foram utilizados os seguintes programas computacionais: IDLE Python v 2.7.12; QGIS v 2.18.19 e ArcGIS v 10.5. As etapas de desenvolvimento encontram-se na Figura 2

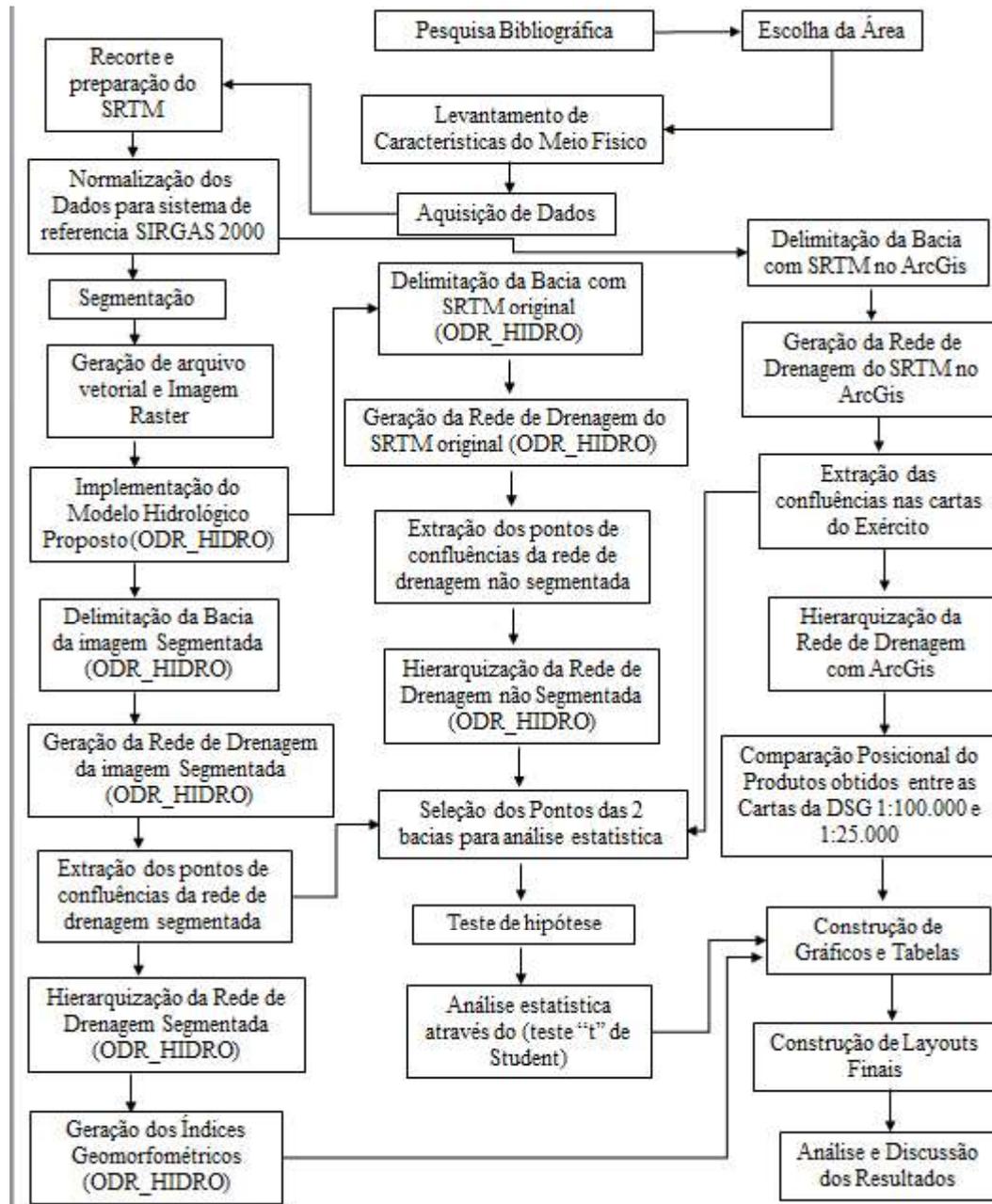


Figura 2 - Fluxo das etapas metodológicas a serem seguidas.

2.1.1 Segmentação do SRTM

Para a segmentação da imagem SRTM, utilizou-se o segmentador ODR_Obia, concebido em linguagem *Python*, cujo algoritmo foi adaptado do segmentador TA Baatz Segmenter (BAATZ; SCHÄPE, 2000). O ODR_Obia, é carregado por meio da plataforma do QGIS e efetua a segmentação da imagem *raster*, reproduzindo uma nova imagem *raster* e um arquivo vetorial. A nova imagem segmentada traz consigo o valor da média aritmética de todos os pixels que compõe um mesmo

segmento ou objeto. Os arquivos em formato vetorial seguem o mesmo padrão da imagem segmentada, a única diferença é que ele traz os atributos da média, mediana e valores máximo e mínimo da altimetria dos *pixels* que compõe o segmento.

2.1.2 Implementação do modelo hidrológico

O modelo hidrológico ODR_Hidro foi concebido em linguagem *Python* e executado no *software* QGIS

por meio do terminal *Python*. A implementação do ODR_Hidro foi realizada utilizando outras ferramentas oriundas de outros *software* de GIS: do SagaGis utilizou-se *Module Fill Sinks* e *Module Channel Network and Drainage Basins*; do GrassGis as ferramentas: *r.stream.extract* e *r.water.outlet, r.to.vect*; do QGIS utilizou-se a ferramenta *zonal statistics* e da Gdal a ferramenta: *clip raster by mask layer*. Auxiliado pelas bibliotecas GDAL, *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib*.

Para a extração dos índices geomorfométricos utilizando o ODR_Hidro, foi preciso estruturar as equações dentro do próprio *script*, visando a execução do cálculo matemático de forma automática, a fim de obter os índices propostos.

2.1.3 Extração e ordenação de canais

Ao iniciar o processamento da imagem segmentada, utilizando o modelo ODR_Hidro, utilizando a metodologia *fill sinks wang liu* proposta por Wang e Liu (2006), para eliminar os possíveis pontos expurios a fim

de realizar a correção das falhas, tanto no preenchimento quanto na remoção da elevação. O próximo passo, foi a determinação da direção do fluxo, usando o modelo ODR_Hidro através da imagem do SRTM segmentada, cujos *pixels* contêm a média da altimetria que foram separados por classes altimétricas, baseado no modelo *Deterministic infinity* - D_{∞} , proposto por Tarboton (1997). A metodologia utilizada para determinar o raster do fluxo de acumulação (Figura 3) com o ODR_Hidro, baseou-se no algoritmo *Deterministic infinity* - D_{∞} , onde, a direção do fluxo é definida utilizando-se o declive mais íngreme em facetas triangulares de cada ponto da grade; a célula é dividida em 8 triângulos e o fluxo é medido no sentido anti-horário (TARBOTON, 1997). A direção do fluxo é determinada a partir da declividade, ou seja, da descida mais íngreme, cujo método comumente é fundamentado na estimativa da área de captação, ou área de contribuição, é definido como a somatória das áreas superficiais das células em que o escoamento contribui para um ponto em questão (FERNÁNDEZ *et al.*, 2012).

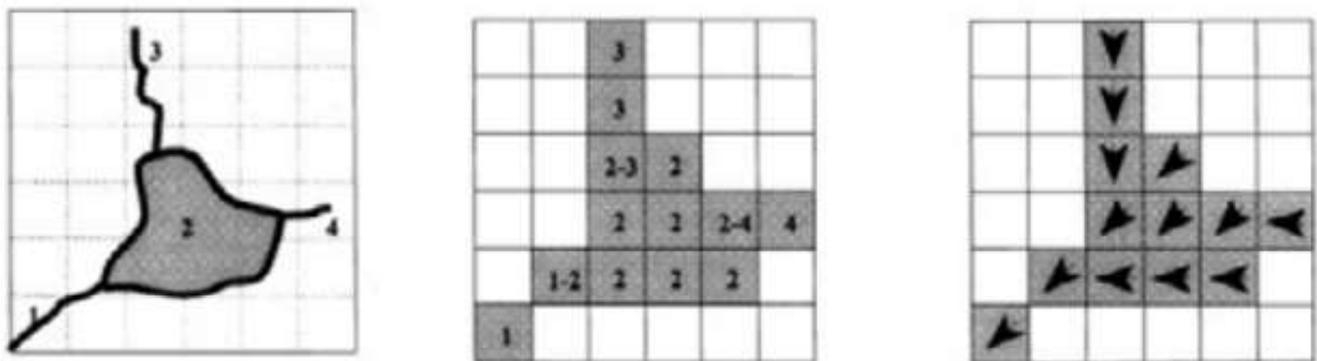


Figura 3 - Representação do fluxo acumulado com o algoritmo D_{∞} . Sobrinho *et al.* (2010).

Com o ODR_Hidro, utilizando o método *Deterministic infinity* - D_{∞} , estimou-se as direções de fluxo para o cálculo das áreas acumuladas com contínuas passagens de janelas móveis de tamanho 3×3 , em que se considera a maior declividade de seus vizinhos (FERNÁNDEZ *et al.*, 2012). O valor da área de captação é confrontado com um limiar, que representa a área mínima necessária para a definição de canal, a partir do qual as linhas de drenagem são iniciadas. O valor do limiar influencia diretamente a densidade da rede de drenagem definida. Os limiares não são valores fixos,

ou seja, podem ser alterados pelos usuários por meio da função *filled_file* do ODR_Hidro. Assim, altos valores de limiares geram redes de drenagens menos densas e valores menores produzem redes de drenagem com maior densidade de segmentos. Os limiares testados da função *filled_file* do ODR_Hidro foram 3, 4, 5, 6 e 7. O limiar utilizado foi o 4. Uma vez que a rede de drenagem foi delineada, ela é dividida em segmentos, sendo que um segmento é parte exclusiva de fluxo com pontos iniciais e finais correspondentes às coordenadas do fluxo (TARBOTON, 1997).

2.1.4 Delimitação da bacia

O modelo ODR_Hidro, utilizando a imagem segmentada, identifica a altimetria de cada segmento. No caso em que houver divisão de pixels em função da segmentação, originando em um mesmo segmento valores de altitudes diferentes, estes são recalculados e é verificada a média para que possam ser definidos apenas segmentos com altitudes iguais para cada segmento na imagem raster. O ODR_Hidro identifica também o início de cada um dos segmentos de fluxo de drenagem e suas respectivas confluências e saídas das redes

de fluxos, conforme explicitado na Figura 4.

Ao gerar a camada de pontos no início das confluências e na saída de rede de drenagem, o algoritmo ODR_Hidro pausa o processamento e reporta mensagem “*Debug*” ao usuário (Figura 5A), avisando que é preciso informar em qual ponto ele deseja iniciar o delineamento da bacia. Após ser informado pelo usuário o ponto inicial para delineamento, ou seja, o exutório, a bacia é gerada automaticamente (Figura 5B). Para gerar o vetor da bacia, o algoritmo ODR_Obia utiliza como referência a média da altimetria extraída dos *pixels* na imagem segmentada.

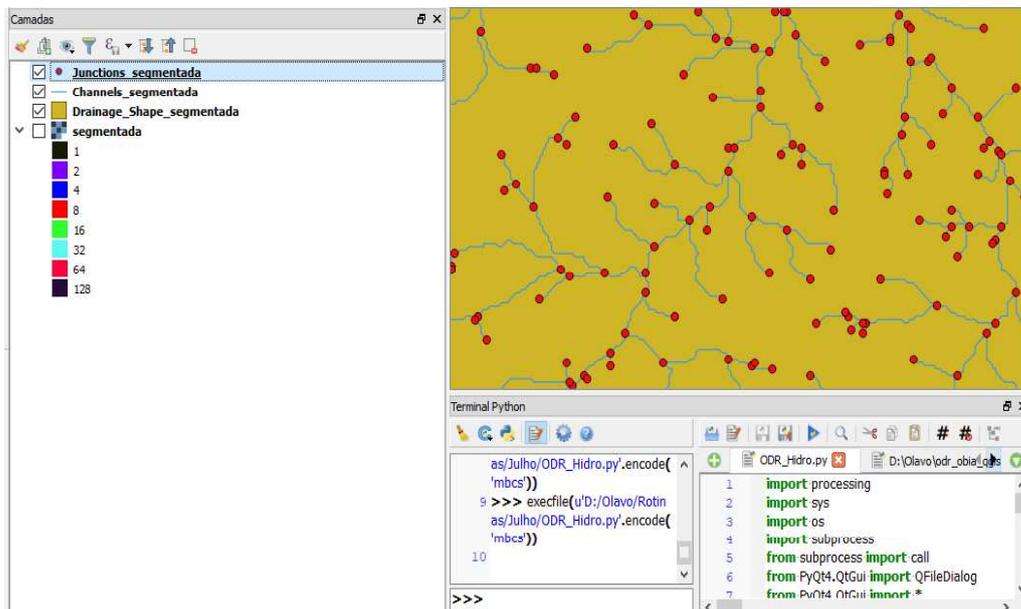


Figura 4 - Ponto indicativo de início e confluência de drenagem.



Figura 5 - (A) Indicação de ponto para o delineamento da bacia hidrográfica (B) BHC delineada pelo algoritmo ODR_Obia

Os arquivos vetoriais – bacia hidrográfica, canais de drenagem e bifurcações dos canais de drenagem foram extraídos do SRTM segmentado utilizando o ODR_Hidro. Embora não discutido nesta pesquisa, o modelo ODR_Hidro possibilita extrair outros elementos geomorfométricos, sendo eles área, perímetro, Coeficiente de Compacidade (Kc), Coeficiente de Manutenção (Cm), Índice de circularidade (Ic), Fator de Forma (Kf), Razão de alongação (Re), Densidade de Drenagem (Dd), Número total dos canais, Densi-

dade Hidrográfica (Dh), Relação de Bifurcação (Rb), Comprimento do canal principal (Ccp) linha reta da nascente a foz, Comprimento total da rede de drenagem (Ctr), Índice de rugosidade (Ir), Coeficiente de rugosidade (CR), Amplitude altimétrica, Altitude máxima e Altitude mínima (Figura 6). Esses índices foram extraídos de forma totalmente automatizada. Para que o usuário tenha acesso a esses dados, basta que acesse a tabela de atributos do arquivo, gerado e que fica disponível no QGis.



value	label	Area	Perimetro	Kc	Ic	Dd	Ir	Ampl Alt	Kf	Re	Dh	Cm	Rb	Ccp	Alt Min	Alt Max
1	1	182.869	92.106	1.907	0.271	2.436	1515.445	622.071	0.882	1.060	6.420	410.488	2.451	14.395	611.000	1233.071

Ctr	CO1	DT1	CO2	DT2	CO3	DT3	CO4	DT4	CO5	DT5	CO6	DT6
445492.449	598	240178.729	243	98506.663	154	54325.103	68	17516.992	88	26582.395	23	8382.568

Figura 6 - Tabela de atributos mostrando os índices geomorfométricos que foram extraídos.

Com o auxílio do ODR_Hidro, a bacia hidrográfica do Córrego Bandeirinha e os canais de drenagens foram extraídos do SRTM original, para serem utilizadas como parâmetro de comparação com os dados obtidos da imagem do SRTM, segmentado com o ODR_Obia. Da mesma forma, ainda com o objetivo de gerar dados para efetuar as devidas comparações entre os produtos obtidos, utilizou-se o *software* ArcGIS, por meio das ferramentas *Spatial Analyst Tools* e *hydrology* para a extração e delimitação das feições geomorfológicas (bacia hidrográfica, canais de drenagens e sua respectiva ordenação). Para este procedimento, serviu com fonte de dados o SRTM em seu formato original (Figura 6).

Os elementos geomorfométricos utilizados nesta pesquisa permitiram analisar a área, o perímetro, a forma, comparar a configuração posicional da rede de drenagem e o posicionamento das bifurcações dos canais, além da hierarquização dos mesmos, como também contribuíram para verificar a eficiência do ODR_Hidro na extração dos referidos dados, utilizando o SRTM segmentado, situação não realizada por outros softwares de SIGs de forma automática.

Os dados relacionados às coordenadas E e N, oriundos das bifurcações das drenagens contidas na

Base Cartográfica Vetorial do Exército na escala de 1:100.000, foram extraídos utilizando a função *Feature Vertice To Point* do ArcGIS (Figura 7), foram utilizados todos os 143 pontos identificados. Em relação às coordenadas E e N das bifurcações das drenagens do SRTM segmentado e do SRTM não segmentado, o ODR_Hidro insere os pontos no início e no final de cada segmento gerado. Os pontos do início de cada drenagem foram deletados. Estes elementos cartográficos auxiliaram no fornecimento de informações para a validação em campo, a fim de comprovar a existência das drenagens de 1ª ordem e as bifurcações das mesmas, além de comparar os dados extraídos da carta do Exército com os dados que foram mapeados com o ODR_Hidro, utilizando o SRTM segmentado e o SRTM não segmentado.

A validação de campo foi executada por meio da coleta de pontos in loco, a fim de obter as coordenadas das bifurcações e do registro fotográfico dos pontos coletados. Para o trabalho de campo, utilizou-se receptor GNSS de dupla frequência (L1/L2), modelo Hiper da marca Topcon e para o processamento dos pontos coletados, utilizou-se o *software* Topcon Tools, a precisão estabelecida para o processamento, seguiu-se as especificações contidas na Norma Técnica de Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR).

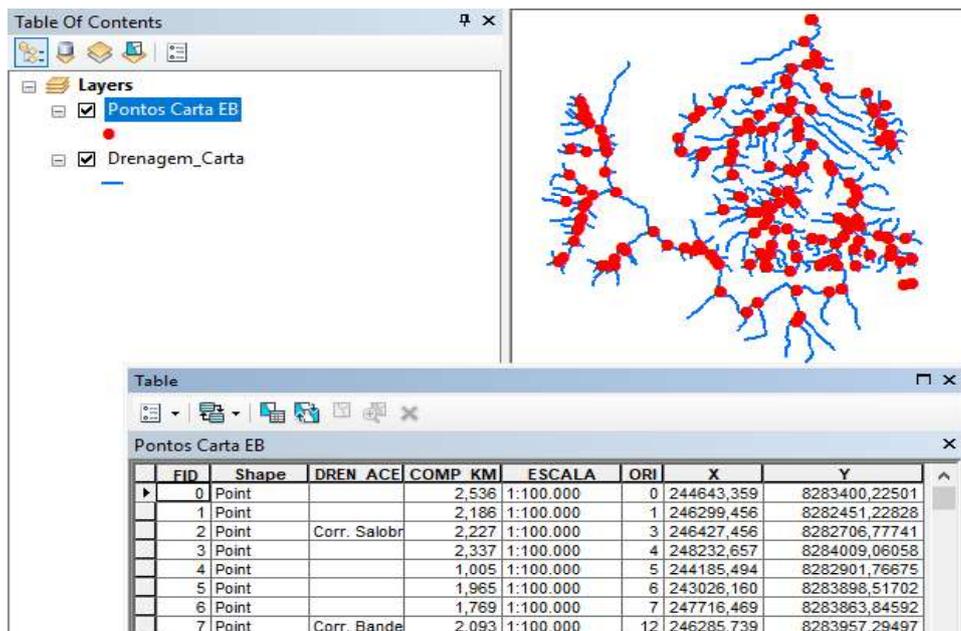


Figura 7 - Pontos nas junções das drenagens, extração das coordenadas dos respectivos pontos da Base Cartográfica do Exército.

A análise estatística foi realizada por meio do cálculo do desvio padrão amostral, em função das diferenças das amostras calculadas em cada uma das coordenadas no eixo E e no eixo N. A discrepância foi calculada para cada bifurcação, entretanto, o desvio foi calculado com base na massa das discrepâncias em função das diferenças das amostras calculadas em cada uma das coordenadas no eixo E e no eixo N. Sendo que uma menor discrepância, ou um desvio menor da discrepância, representa individualmente uma bifurcação melhor mapeada.

Foi usado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney (teste U) para verificar os afastamentos ou as discrepâncias encontradas, referente às coordenadas do eixo E e N dos produtos avaliados, obtidas da imagem segmentada e não segmentada do SRTM com as coordenadas de referência da carta topográfica, baseado no teste de hipótese da média do desvio padrão amostral, em função das diferenças das amostras calculadas em cada uma das coordenadas no eixo E e no eixo N. No cálculo das discrepâncias nas duas direções, utilizou-se as seguintes expressões: discrepância na coordenada “N” (Equação 1) e discrepância na coordenada “E” (Equação 2):

$$\overline{\Delta N} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Ni}{n} \sum_{i=1}^n (N_{i^c} - N_{i^d})/n \tag{1}$$

$$\overline{\Delta E} = \sum_{i=1}^n \Delta E_i/n \sum_{i=1}^n (E_i^c - E_i^d)/n \tag{2}$$

onde:

N = número de pontos de controle;

N_i^c, E_i^c = Coordenadas dos pontos de referências obtidas por meio do documento cartográfico; N_i^d, E_i^d = Coordenadas dos pontos do produto a ser avaliado.

Em seguida, foi realizado o teste de hipótese:

Para a coordenada do eixo N:

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

H_1 : se $\Delta N \neq 0$, então N é tendencioso.

Para a coordenada do eixo E:

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

H_1 : se $\Delta E \neq 0$, então E é tendencioso.

Primeiramente foi realizado o chamado “Teste de Tendências” para nível de confiança $(1-\alpha)$, que nesse caso é de 95%, assim, conclui-se que as coordenadas que têm variação média nula não possuem tendência. Para esta pesquisa, testou-se a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk.

Utilizando-se da estatística U ou teste de Mann-Whitney, onde o p valor for menor que o alfa 0,05, rejeita-se a hipótese nula que as coordenadas contêm a mesma média amostral. A discrepância de uma variável

é a medida de sua dispersão estatística que indica quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado (média). Desse modo, as hipóteses testadas ($\alpha = 0,05$) para mediana foram: $H_0: n_1 = n_2$ e $H_1: n_1 \neq n_2$. O teste Mann-Whitney é obtido por meio da Equação 3, onde m e n representam o tamanho amostral de cada grupo e S_n é a soma de classificação de rank para amostra n .

$$Z = \frac{S_n - \frac{n(n+m+1)}{2}}{\frac{\sqrt{mn(m+n+1)}}{12}} \quad (3)$$

No que concerne aos desvios padrão das discrepâncias nas direções N e E foram calculados por meio das seguintes equações: desvio padrão das coordenadas “N” (Equação 4) e desvio padrão das coordenadas “E” (Equação 6).

$$S_N = \sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \overline{\Delta N})^2 / (N-1) \quad (4)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \overline{\Delta E})^2 / (N-1) \quad (5)$$

Os graus de liberdade foram calculados utilizando a Equação 6:

$$n = n_1 + n_2 - 2 \quad (6)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os algoritmos ODR_Obia (usado para segmentar a imagem e atribuir valor médio dos pixels aos segmentos) e ODR_Hidro (usado para geração de índices geomorfométricos) foram confeccionados para atenderem à demanda da pesquisa, utilizando as plataformas – QGIS, SAGAGIS, GRASSGIS, e biblioteca Gdal, e objetivando efetuar os cálculos matemáticos dos índices geomorfométricos em uma única ferramenta para utilização no QGIS, implementadas em linguagem *Python*.

3.1 SRTM segmentado utilizando ODR_OBIA

Ao definir os limiares de entrada (Figura 8) a “compacidade”, que é um parâmetro de forma, proporcionou melhor agrupamento dos pixels dos objetos, tendo em vista que o limiar utilizado permitiu representar objetos menos compactos e mais espalhados. O parâmetro escala é um importante valor utilizado pelo algoritmo de segmentação multirresolução, determinando a média do tamanho do objeto a ser criado resultante da segmentação. Quanto mais alto for o valor atribuído ao parâmetro escala, maiores serão os segmentos produzidos e, com isto, menor será a quantidade de segmentos criados, por outro lado, um menor valor atribuído para esse parâmetro, menores serão e conseqüentemente, maior será a quantidade de segmentos criados. A escala utilizada na segmentação utilizando o ODR_Obia foi de 1.3 e a extração da rede de drenagem, utilizou o ODR_Hidro. O adensamento da rede de drenagem foi superior à escala de 1.100.000. Os segmentos gerados sinalizam que a escala de mapeamento executada pelo ODR_Hidro, seja melhor que a escala da carta topográfica.

Outros limiares com valores diferentes foram testados para o segmentador ODR_Obia. Ao utilizar uma escala 1.10 por exemplo, os segmentos de canais gerados eram menos adensados e mais espaçados. Ao elevar escala de segmentação para 1.50, 1.100, 1.300 e assim por diante, o modelo, utilizando o MDE segmentado para extração da rede de drenagem, gera um único canal dentro da bacia, modifica o traçado e deforma o formato da bacia, comprometendo a qualidade dos produtos (Figura 9 A). Por outro lado, valores de escala menores que 1.3, favoreceu a extração da rede de drenagem bastante adensada, mapeando até trechos de ravinas e pequenas depressões junto ao solo, como foram constatados com os trabalhos de campo (Figura 9 B). Os resultados produzidos com o limiar de escala inferior a 1.3, não pode ser confrontado com outras bases de dados, tendo em vista que no atual momento, a região não possui um aparato de cartas topográficas com escalas de maiores detalhes. Os valores utilizados para a compacidade próximo de 1, não permitiu o agrupamento dos pequenos objetos, tendo em vista que na parte mais elevada do relevo, há incidência de pequenos segmentos de canais, que são menores e menos compactos e relativamente estão espalhados ao longo da bacia. Assim, os limiares que melhor ajustaram na segmentação do SRTM, que possibilitaram uma extração de canais mais fidedignos das bacias, estão demonstrados na Figura 8.

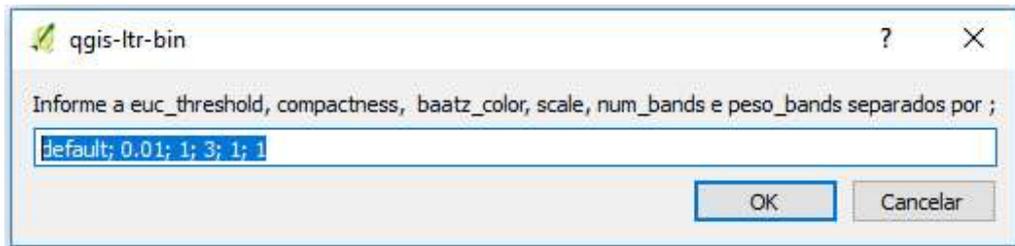


Figura 8 - Limiares utilizados para segmentar o SRTM.

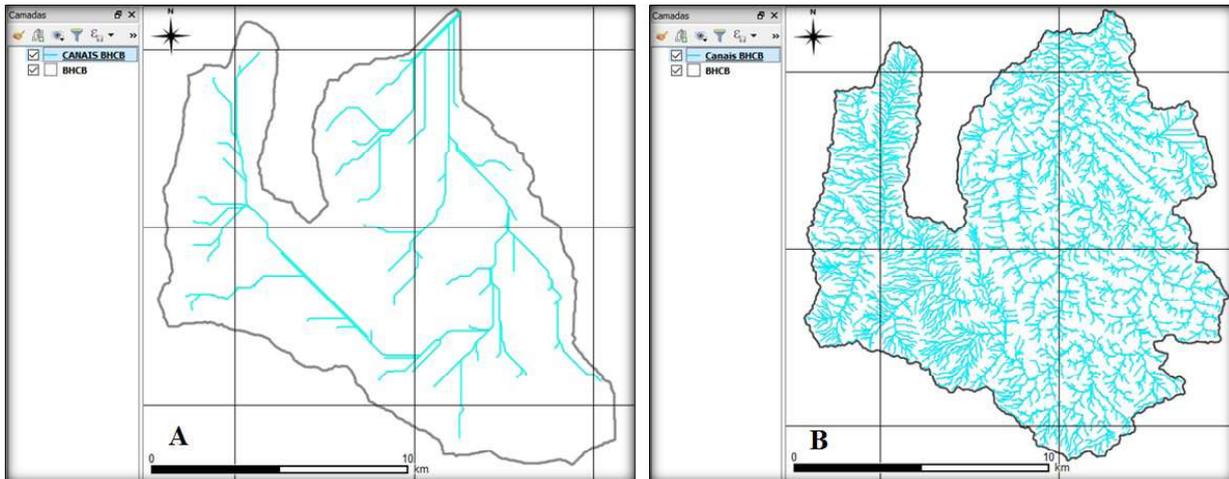


Figura 9 - (A) Bacia e canais gerados a partir da escala de segmentação 1.300. (B) Bacia e canais gerados a partir da escala de segmentação 1.1.

Para a segmentação do SRTM, utilizou-se 1:30 para o fator escala e 1 para o fator peso, visto que o dado é monocromático e o peso 1, define a relevância de cada banda para a segmentação, tendo em vista que o peso de cada banda da imagem pode variar de 0 a 1. O resultado obtido da segmentação em formato *raster*, traz o valor da média dos pixels que foram agrupados e atribuídos a cada segmento. O agrupamento dos pixels após a classificação resultou na separação das classes que foram transformadas em segmentos homogêneos, compostos pela junção da média da altimetria do agrupamento dos respectivos pixels.

3.2 Canais e Bacia Hidrográfica do Córrego Bandeirinha

Utilizando a imagem segmentada do SRTM, determinou-se a direção do fluxo com o auxílio do modelo ODR_Hidro (Figura 10A), para o cálculo do “Fluxo de acumulação”, a partir dos maiores valores altimétricos contidos no dado segmentado (Figura 10B). O modelo ODR_Hidro, utilizando a imagem segmentada do SRTM, definiu as direções do fluxo para o cálculo das áreas acumuladas “fluxo de acumulação” a partir da cota mais elevada (Figura 10B).

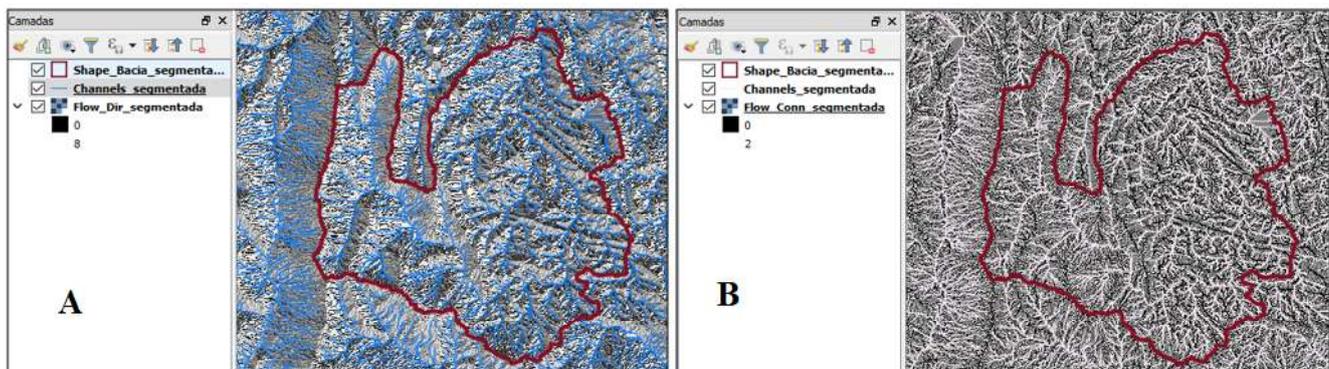


Figura 10 - (A) Imagem raster do indicativo da direção do fluxo. (B) Imagem raster do indicativo de fluxo

Os canais de drenagens demonstrados na Figura 11 foram extraídos com auxílio do algoritmo ODR_Hidro, a partir da imagem segmentada do SRTM. A extração da rede de canais do modelo foi consistida topologi-

camente, atendendo o pressuposto de Christofolletti (1980) que afirma que a rede hidrológica deve estar devidamente conectada e orientada para que os fluxos e ordens sejam definidos.

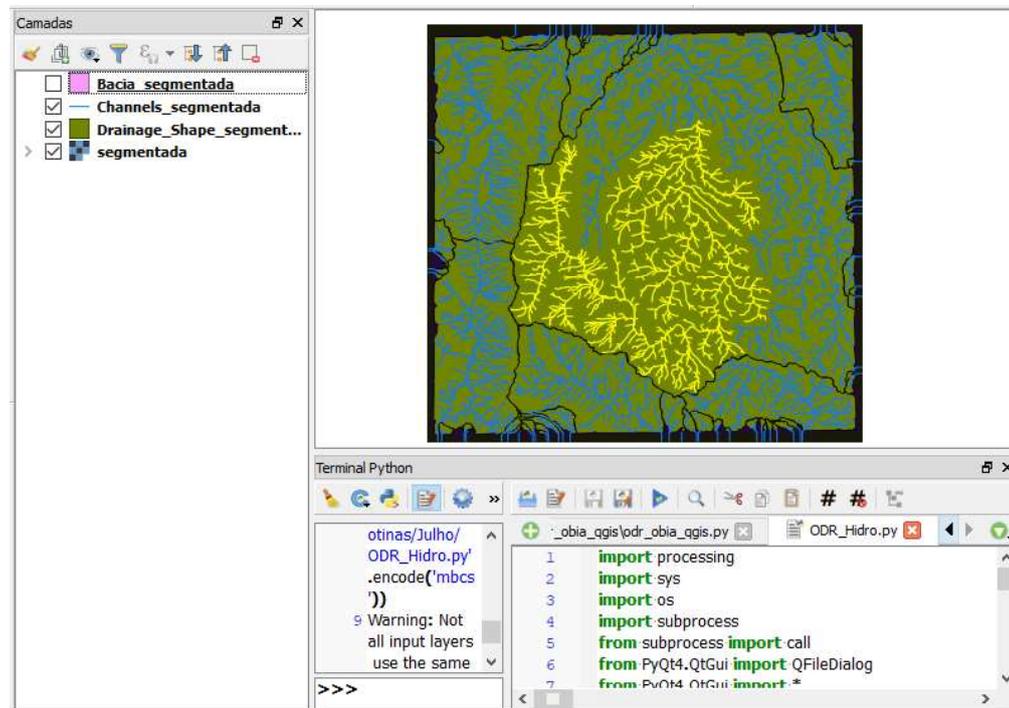


Figura 11 - Geração de drenagens a partir da imagem segmentada.

Das quatro ordenações hierárquicas demonstradas nas Figuras 12, A, B, C e D, duas foram efetuadas com o auxílio do modelo ODR_Hidro, através do SRTM segmentado (Figura 12 A) e SRTM não segmentado (Figura 12 B), uma com o software ArcGIS e com a mesma cena do SRTM não segmentado (Figura 12 C) e outra, finalmente, de forma manual (Figura 12 D) utilizando o arquivo vetorial da bacia e as duas cartas topográficas do Exército (DSG). As comparações dos dados gerados pelo ODR_Hidro com os dados do SRTM (original e segmentado) e da carta topográfica, mostraram-se similares, sendo que na primeira extração (Figura 12 A) por meio do SRTM segmentado, encontramos um número maior de canais de 1ª ordem do que nas outras 03 bases, sendo duas com o SRTM não segmentado e uma com os dados vetoriais da carta da DSG (Figuras 12 B, C e D). Desta forma, a hierarquização efetuada pelo ODR_Hidro, (Figura 12 A) com o SRTM segmentado, alcançou a 6ª ordem e as duas hierarquizações do SRTM sem a segmentação, assim como a hierarquização da carta topográfica e a realizada manualmente, somente alcançaram a 5ª ordem.

Outro aspecto a ser destacado nas hierarquizações é o ponto de formação do segmento de 5ª ordem. Ao comparar as quatro ordenações (Figura 12 A, B, C e D) observa-se que a formação desse segmento não coincide em nenhuma delas. O segmento de 5ª ordem que se formou mais próximo da nascente foi o da hierarquização feita com o SRTM original, utilizando o ArcGIS, (Figura 12 C). Em seguida, a formação do segmento de 5ª ordem mais próxima da nascente foi a ordenação extraída da imagem segmentada, utilizando o ODR_Obia, (Figura 12 A). Na sequência, a formação do segmento da 5ª ordem, foi a ordenação feita com ODR_Obia, utilizando o SRTM original (Figura 12 B). Por último, conforme demonstrado na classificação manual, através da carta vetorial da DSG (Figura 12 D), foi a que teve a formação do segmento de 5ª ordem mais próximo à foz. Para formação do segmento de 6ª ordem conforme demonstrado na figura 12 A, com a utilização da imagem segmentada, o ponto de bifurcação para a formação do segmento de 6ª ordem, coincide com o ponto de bifurcação das duas drenagens de 4ª ordem da hierarquização feita manualmente, com os

dados da carta da DSG (Figura 12 D), que formaram o segmento da 5ª ordem da classificação manual. Corroborando para a argumentação que existe um maior adensamento de canais para a extração utilizando o SRTM segmentado.

A validação de campo ocorreu para constatar a existência de drenagens de 1ª ordem na BHCb, mapeada pelo ODR_Hidro com auxílio da imagem do SRTM segmentado e, que não constam nas cartas topográficas da DSG na escala de 1:100.000, visto que a existência delas, pode ter sido o elemento que

elevou a ordem hierárquica dos canais de drenagem, gerados pelo modelo ODR_Hidro. O procedimento foi efetuado, através da comparação entre as coordenadas das bifurcações mapeadas, tanto com os dados das cartas da DSG, quanto dos dados mapeados com o ODR_Hidro. Os mapeamentos das bifurcações foram feitos in-loco onde foram mapeados e coletados 11 pontos de bifurcações (Figuras 13 A, B, C, D e E). Para tal procedimento, utilizou-se um conjunto GNSS para identificar o local das bifurcações e o rastreamento das coordenadas.

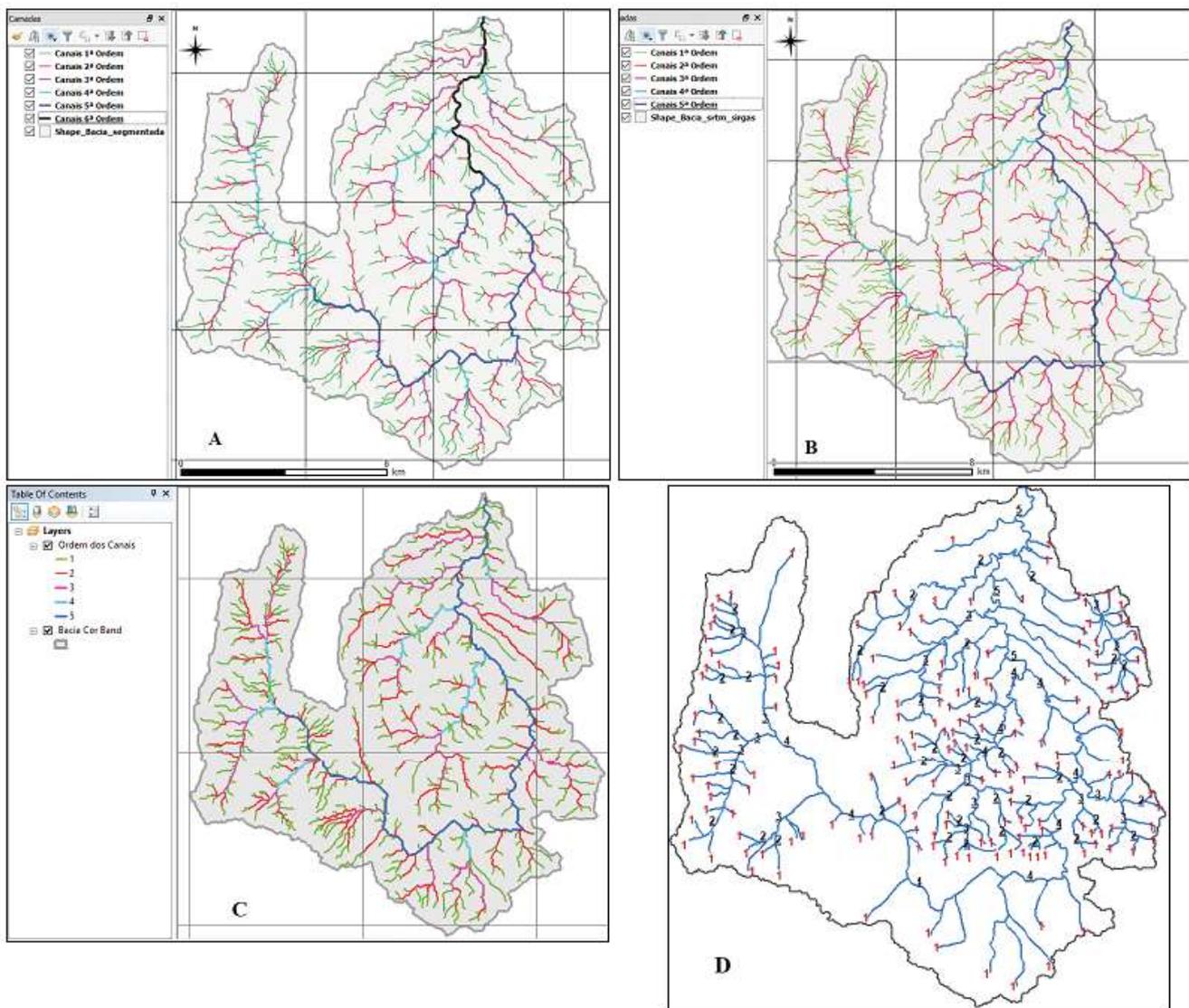


Figura 12 - (A) Ordem dos canais da bacia segmentada com ODR_Hidro. (B) Ordem dos canais da bacia do SRTM original com ODR_Hidro. (C) Ordem dos canais da bacia do SRTM original utilizando ArcGIS. (D) Ordenação de forma manual dos canais da BHCb com o uso da carta topográfica vetorial obtida do DSG - 2°CGeo



Figura 13 – Coleta de pontos nas bifurcações para validação do modelo ODR_Hidro.

Com a coleta dos dados topográficos efetuado em campo, além da constatação da existência das drenagens de 1ª ordem, mapeadas com o ODR_Hidro, utilizando a imagem do SRTM segmentado, efetuou-se também o processamento dos pontos coletados para analisar as coordenadas das bifurcações. Ao sobrepor os dados das coordenadas mapeadas pelo ODR_Hidro e, comprovadas in-loco pela validação de campo, com os dados das cartas topográficas da DSG, assim como a comparação observada através da configuração posicional da rede de drenagem da BHCb, apontadas nas escalas de 1:100.000 (Figura 14 A) e 1:25.000 (Figura 14 B), indicadas por meio da sobreposição dos canais (em

azul escuro) mapeados com o ODR_Hidro, sobrepostos nas respectivas figuras 14 C e D, além do indicativo do limite da BHCb (linha vermelha), pode ser verificada a divergência na figura 14 C, entre os canais gerados pelo ODR_Hidro e os canais mapeados na carta de escala de 1:100.000. Contudo, na carta de 1:25.000 (Figura 14 D), esta divergência é inexistente, ou seja, os canais mapeados pelo ODR_Hidro, utilizando o SRTM segmentado, apresentam posicionamento semelhantes aos canais que foram mapeados na carta topográfica da DSG na escala de 1:25.000 (Figura 14 D), indicando que o modelo permite mapear em escala melhor que a escala de 1:100.000.

Ressalta-se que no momento da execução deste estudo, as cartas do IBGE nas escalas 1:50.000 e 1:25.000 não cobriam toda a área de estudo. Assim, foi possível utilizar apenas uma pequena parte da área de estudo (Figuras 14 B e D) com cartas que estão sendo confeccionadas pela DSG. Consideramos, que após a conclusão deste mapeamento, por parte da DSG, será possível realizar uma análise do mapeamento do ODR_Hidro com a carta da DSG de forma mais efetiva.

Com a validação de campo verificou-se a exis-

tências das drenagens de 1ª ordem, comprovando que a ordenação feita pelo ODR_Hidro (Figura 12 A) com a imagem segmentada, representa com maior fidedignidade a realidade da hierarquização destes canais na bacia estudada. Os atributos geomorfométricos relativos às características geométricas da rede de drenagem e do relevo, obtidos a partir da imagem segmentada do SRTM, visto que a segmentação contribuiu para a extração de produtos mais fidedignos com a realidade física do campo, assim como a aplicação dos procedimentos e ferramentas propostas, são apresentados na tabela 1.

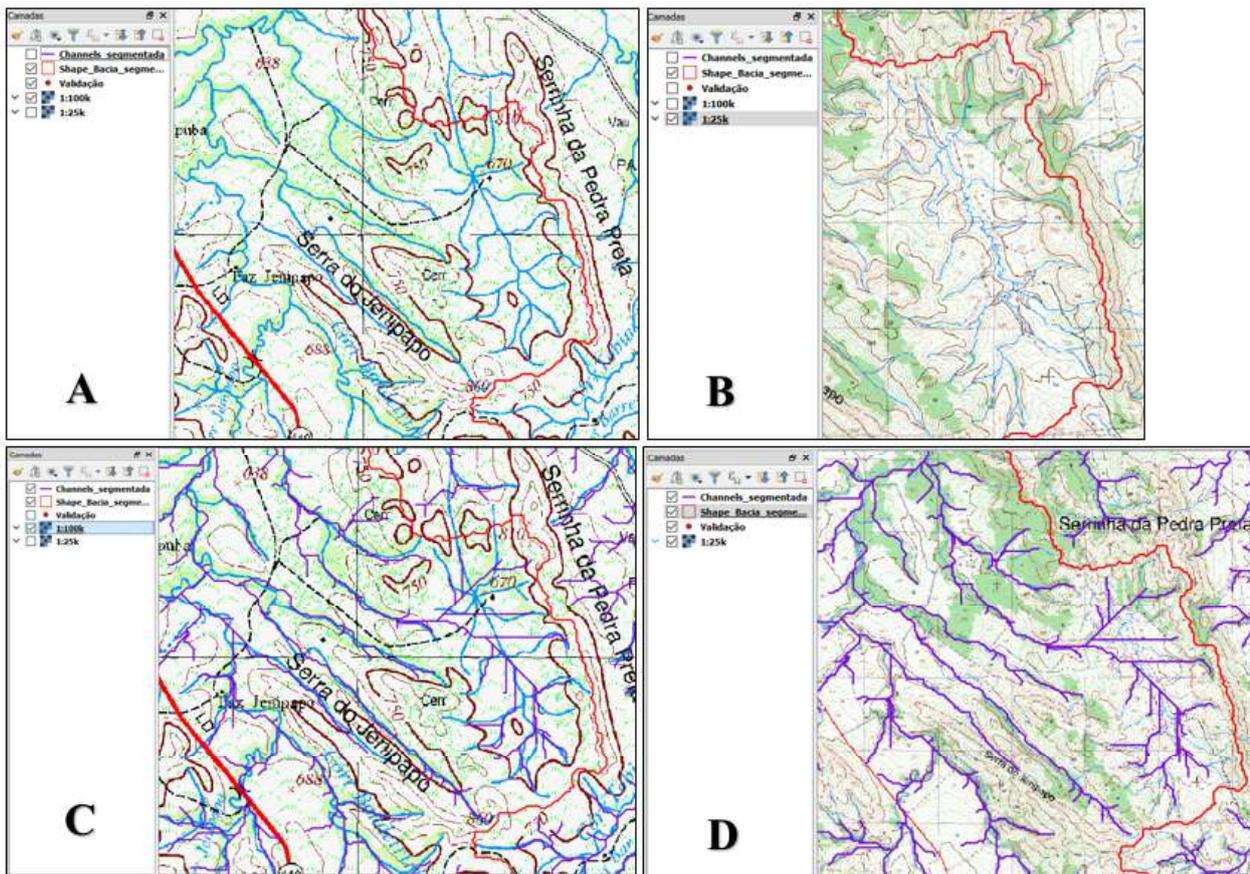


Figura 14 – (A) Carta topográfica na escala de 1:100.000 (B) Carta topográfica na escala de 1:25.000 (C) Canais sobrepondo a Carta topográfica na escala de 1:100.000 (D) Canais sobrepondo a Carta topográfica na escala de 1:25.000

3.3 Delimitação da BHC B e extração dos canais da rede de drenagem

As diferenças encontradas no ordenamento das hierarquizações dos canais, entre as 04 classificações, inferem que na extração dos canais da imagem segmentada, em função da introdução dos limiares de

compacidade e escala para a segmentação do SRTM, obteve-se objetos mais compactos e reduzidos, fator importante que contribui para obter uma rede de canais mais adensada do que as outras 03 hierarquizações. Ressalta-se que em função da segmentação, os *pixels* foram alterados em consequência dos limiares propostos para a segmentação e reunidos em um grupo de *pixels*,

permitindo a retirada da média da altimetria desse grupo, ou seja, a união desse grupo de *pixel* agora composto por um único segmento tem a mesma altitude extraída por meio da média da altimetria composta pelo grupo de *pixels* reunidos. Justificando a obtenção de canais mais compactos e reduzidos, fator esse que foi preponderante

para a obtenção da rede de canais mais adensada do que as outras 03 extrações.

Conforme demonstrado na tabela 2, em termos de área e perímetro, os resultados são equivalentes sugerindo que as 03 delimitações, apontam para uma correta representação.

Tabela 1: Representação dos índices geomorfométricos

BHCB - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS				
NOME	ÁREA (Km²)	PERÍMETRO	ÍNDICE	Km
B.H. Córrego Bandeirinha	182,869	92,106 Km		
Coefficiente de Compacidade (Kc)			1,907	
Coefficiente de Manutenção (Cm)			410,488	
Índice de circularidade (Ic)			0,271	
Fator de Forma (Kf)			0,882	
Razão de alongação (Re)			0,882	
CARACTERÍSTICAS DA REDE DE DRENAGEM				
Densidade de Drenagem (Dd)			2,436	
Número total dos canais			1,174	
Densidade Hidrográfica (Dh)			6,42	
Relação de Bifurcação (Rb)			2,451	
Comprimento do canal principal (Ccp) linha reta da nascente a foz				14,40
Comprimento total da rede de drenagem (Ctr)				445.492,45
Número de 1ª ordem			598	240.178,73
Número de 2ª ordem			243	98.506,66
Número de 3ª ordem			154	54.325,10
Número de 4ª ordem			68	17.516,99
Número de 5ª ordem			88	26.582,40
Número de 6ª ordem			23	8.382,57
CARACTERÍSTICAS DO RELEVO				
Índice de rugosidade (Ir)			1515,445	
Coefficiente de rugosidade (CR)			34,129	
Amplitude altimétrica			622	
Altitude máxima			1.233,07	
Altitude mínima			611	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2: Informações relacionadas à área e perímetro da BHCB

	SRTM_Segmentado ODR_Hidro	SRTM_Original ODR_Hidro	SRTM_Original ARCGIS
Área (Km ²)	182,869	183,723	183,159
Perímetro (Km)	92,106	91,693	84,911

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da observação da Tabela 2 é possível verificar que a BHCB obteve área equivalente nas 03 delimitações, os dados apurados foram trabalhados considerando a escala de 1:100.000. Entretanto, as pequenas divergências apresentadas no cálculo de área da bacia, sugerem que os dados cartográficos obtidos por meio da imagem segmentada, seja compatível a extração com as outras aplicações, uma executada através do ODR_Hidro, com o SRTM original e outra com ArcGIS, utilizando também o SRTM segmentado. Este fato pode ser observado ao comparar a bacia delimitada com o ODR_Hidro por meio do SRTM segmentado com as duas delimitações feitas, uma com o ODR_Hidro através do SRTM original e a outra feita com o ArcGIS utilizando o SRTM original. As diferenças apresentadas pelo cálculo de área da bacia hidrográfica, produzido com o ODR_Hidro, entre a imagem SRTM segmentada e a imagem não segmentada são de apenas 0,854 km². Ao comparar a área da BHCB, utilizando a imagem do SRTM segmentada com o processamento efetuado no ODR_Hidro, com a área da mesma bacia extraída do SRTM original, empregando o uso do ArcGIS, a diferença de área diminuiu para 0,290 km², cujo erro é de apenas 0,16%. No que tange à área da BHCB delimitada pelo ODR_Hidro utilizando a imagem do SRTM original, ou seja, sem a segmentação do MDE, e comparando-a com a área da mesma bacia, utilizando o mesmo MDE sem segmentá-lo, a diferença encontrada foi de 0,564 km².

Concernente às discrepâncias perimétricas apresentadas, observa-se que a diferença produzida com ODR_Hidro, entre as imagens SRTM segmentada e não segmentada é de apenas 413 m. A maior discrepância ocorreu entre o perímetro da BHCB extraído da imagem segmentada para o perímetro da mesma bacia produzido no ArcGIS, por meio do SRTM original, é de 7,195 km, ou seja, o perímetro encontrado para a bacia produzido com o ODR_Hidro, usando a imagem segmentada, é 7,8% maior do que o perímetro encontrado com o SRTM original usando o ArcGIS. Pode-se inferir que para este

estudo, essa variação não terá grande importância, uma vez que se deve sempre levar em consideração o fator escala (1:100.000) em que o estudo está sendo executado. Se se distribuir o erro encontrado (7,195 km) ao longo dos 84,911 km, tem-se acréscimo de 0,079 km para cada 1 km do percurso do perímetro da bacia, portanto, o erro encontrado torna-se inexpressivo, considerando a escala em que este se apresenta.

3.4 Análise estatística dos pontos de confluência da rede de drenagem entre a Carta do Exército, ODR_Hidro e SRTM original

A análise estatística iniciou-se pelo teste de normalidade do grupo amostras, através do teste de normalidade Kolmogorov – Smirnov, (Tabela 3), que é indicado para amostras igual ou superior a 30 elementos. A estatística KS calculada 0,00572 é maior que o valor-p calculado 0,0243, indicando que o conjunto amostral não segue um padrão normal, assim como o valor-p calculado 0,0243 é menor do que o nível de significância de 0,05, reafirmando que os dados não se ajustam a distribuição normal. O resultado do teste de normalidade apontou para utilização de teste não paramétrico. Para esta pesquisa, adotou-se o teste estatístico U ou teste de *Mann-Whitney*, segundo a literatura específica, é considerado como uma versão do teste t de *Student* para estimar-se a heterogeneidade de duas amostras ordinais, aleatórias e independentes, que não obedecem aos parâmetros da curva normal (Baptista *et al.*, 2016).

Utilizou-se como verdade de campo duas cartas topográficas do Exército (DSG) em formato vetorial, sendo a Carta Topográfica MI – 2216 e a Carta Topográfica MI – 2272, 2^a Ed. 2006, ambas na escala de 1:100.000, foram determinadas as confluências da rede de drenagem (Figura 15 A), obtendo-se de 143 pontos, utilizados como verdade de campo, Figura 15A. A obtenção dos pontos de confluências, representados por coordenadas E e N, permitiu realizar as análises comparativas dos pontos de confluências nas outras 02

amostras de pontos, obtidas uma com a imagem SRTM segmentada e outra com a imagem do SRTM não segmentada, ambas com o auxílio do modelo ODR_Hidro (Figuras 15 B e C).

Posterior a aplicação do teste de normalidade, estabeleceu-se as hipóteses a serem testadas, (hipótese nula) é aquela cuja população de referência amostral (cartas do Exército) apresenta as médias das discrepâncias das coordenadas encontradas para os eixos E e N dos pontos de confluências iguais ou similares àquelas

que foram produzidas pelo modelo ODR_Hidro, tanto na imagem SRTM segmentada quanto na do SRTM original. A hipótese alternativa a ser confrontada será a média das discrepâncias dos afastamentos das coordenadas E e N das confluências ou bifurcações das duas populações a serem testadas, não sendo iguais àquelas produzidas pelas médias das discrepâncias das coordenadas de referências, obtidas por meio das cartas do Exército, tendo como nível de significância 05%, aplicando o teste de *Mann-Whitney*.

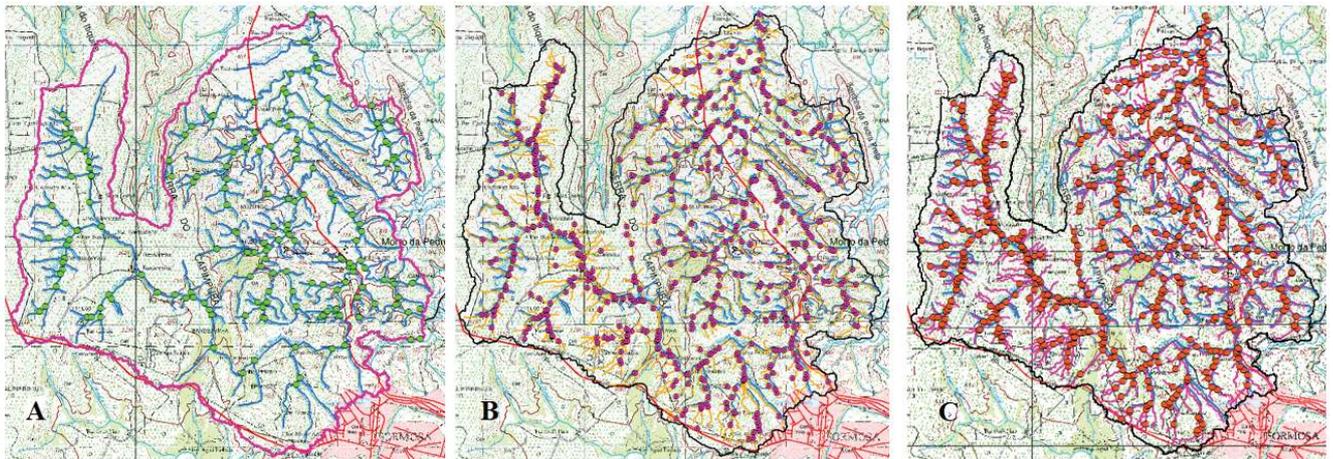


Figura 15 - (A) Arquivo vetorial sobrepondo o matricial com pontos das respectivas confluências. (B) Arquivo vetorial extraído do SRTM segmentado com o ODR_Hidro sobrepondo o arquivo vetorial e matricial com os pontos das respectivas confluências. (C) Arquivo vetorial extraído do SRTM original com o ODR_Hidro sobrepondo o arquivo vetorial e matricial com os pontos das respectivas confluências.

Tabela 3: Testes de Normalidade

Testes	Estatísticas	P-valores
Kolmogorov – Smirnov (KS)	0,057261354	0,0243

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as hipóteses formuladas extraiu-se os valores da estatística U para valor-p (Tabela 4), obtendo-se resultados distintos entre os três grupos amostrais, referente aos afastamentos das coordenadas dos eixos E e N. Concernente aos dados apurados entre a carta do Exército e o modelo ODR_Hidro, por meio da imagem segmentada, os resultados obtidos através da estatística U do teste de *Mann-Whitney*, referente a coordenada do eixo E, apontou similaridade no valor-p calculado de 0,9954% de significância (Tabela - 4), sugerindo que não há diferenças significativas entre os dados amostrais, implicando na aceitação da hipótese nula. Relacionado aos valores do teste estatístico obtidos para as coordenadas dos eixos E,

entre os valores das coordenadas obtidos pela carta topográfica do Exército, e os valores obtidos pelo ODR_Hidro, utilizando a imagem do SRTM não segmentada, estatisticamente os resultados apontaram similaridade através do valor-p calculado de 0,9909% (Tabela - 4). Tratando ainda das coordenadas do eixo E, ao comparar os resultados produzidos entre o ODR_Hidro, por intermédio do SRTM segmentado e o SRTM não segmentado, os resultados também se mostraram bem ajustados. O valor-p calculado foi de 0,9954% (Tabela - 4), implicando na aceitação da hipótese nula, cujas diferenças amostrais não apresentam afastamentos significativos.

Por outro lado, ao observar os ajustamentos relacionados às coordenadas dos eixos N, as mesmas não se mostraram tão precisas como as coordenadas dos eixos E. Os resultados apontados na tabela 4, mostraram que ocorre um afastamento significativo referente aos dados produzidos pela carta do Exército em comparação aos encontrados pela imagem *raster* do SRTM segmentado, efetuados pelo ODR_Hidro. Observa-se que a estatística U calculada, cujo valor-p encontrado foi de 0,8919% (Tabela - 4), apontando para não similaridade do grupo amostral, inferindo que a hipótese nula deve ser rejeitada, e consequentemente o aceite da hipótese alternativa. Entretanto, mesmo não havendo similaridade para um nível de significância estatístico de 5% ($\alpha=0,05$), alterando-se o nível de significância para 11%, esta passa a estar presente. Da mesma forma, ao

comparar os dados obtidos entre a carta topográfica da DSG e os dados produzidos pelo ODR_Hidro, utilizando a imagem do SRTM não segmentada, observou-se que os dados não possuem similaridades para um alfa de 5%, tendo em vista que o valor-p calculado foi de 0,8976% (Tabela - 4). Portanto, conforme a literatura, rejeita-se a hipótese nula de que as médias produzidas pelos afastamentos entre as coordenadas dos eixos N para estas duas comparações, tendo em vista que o valor apurado, indicou que as mesmas não possuem médias iguais, considerando um nível de significância tão alto. Contudo, isto não quer dizer que as mesmas não apresentem similaridade. Verificando os resultados apurados, observa-se que há similaridade entre os dois resultados, desde que seja aumentado o nível de significância para um alfa de 11% ($\alpha=0,11$).

Tabela 4: Teste de Mann-Whitney, com duas amostras admitindo variações iguais.

Carta DSG (E) vs ODR_IMG_SEG (E)			Carta DSG (N) vs ODR_IMG_SEG (N)		
Amostras (N=143) vs (N=143)			Amostras (N=143) vs N=143)		
Mean ranks:	71,77	71,73	Mean ranks:	72,08	71,42
T=Ub:	1,02E+04		T=Ub:	1,01E+04	
p(same):	0,9954		p(same):	0,8919	
Monte Carlo p:	0,9952		Monte Carlo p:	0,8955	
Carta DSG (E) vs ODR_IMG_N_SEG (E)			Carta DSG (N) vs ODR_IMG_N_SEG (N)		
Amostras (N=143) vs (N=143)			Amostras (N=143) vs N=143)		
Mean ranks:	71,78	71,72	Mean ranks:	72,07	71,43
T=Ub:	1,02E+04		T=Ub:	1,01E+04	
p(same):	0,9909		p(same):	0,8976	
Monte Carlo p:	0,9903		Monte Carlo p:	0,8954	
ODR_IMG_SEG (E) vs DR_IMG_N_SEG (E)			ODR_IMG_SEG (N) vs ODR_IMG_N_SEG (N)		
Amostras (N=143) vs (N=143)			Amostras (N=143) vs N=143)		
Mean ranks:	71,73	71,77	Mean ranks:	71,77	71,73
T=Ub:	1,02E+04		T=Ub:	1,02E+04	
p(same):	0,9954		p(same):	0,9954	
Monte Carlo p:	0,9947		Monte Carlo p:	0,9959	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, os valores encontrados relativos às coordenadas do eixo N, na comparação entre o ODR_Hidro, utilizando o SRTM segmentado e os resultados

encontrados pelo ODR_Hidro com o SRTM original, cujo valor-p calculado foi de 0,99544% (Tabela - 4), indicando estatisticamente que os dados obtidos apre-

sentam similaridade, corroborando para aceitação da hipótese nula, ou seja, é possível afirmar que não há afastamentos significativos entre estes dois grupos de amostras, sugerindo que estas amostras possam ter vindo de populações com médias iguais. O teste U de *Mann-Whitney* mostrou similaridade estatística entre as variâncias para os 03 grupos de dados das coordenadas do eixo E, tanto obtidas nas cartas da DSG como no modelo com e sem dados segmentados, e para um grupo de dados das coordenadas do eixo N, obtidas pelo ODR_Hidro, utilizando o SRTM segmentado e comparado com os dados obtidos do SRTM não segmentado. Contudo, não houve similaridade estatística nas coordenadas do eixo N em dois conjuntos de dados e isso pode ser decorrente tanto da linearidade das drenagens obtidas no SRTM como por detalhes obliterados nos dados da DSG devido à escala.

Embora o teste estatístico em duas comparações tenha apontado para a rejeição da hipótese nula, onde as médias das coordenadas das bifurcações obtidas da carta vetorial da DSG, tanto no eixo E, quanto no eixo N, e comparadas com as coordenadas das bifurcações, obtidas através do mapeamento do ODR_Hidro nos eixos E e N, utilizando a imagem segmentada, ao serem testadas deveriam ser iguais ou com variações aceitáveis, conforme apontado pela estatística do teste de *Mann-Whitney*. Contudo, há também de se observar que assim como os dados vetoriais das drenagens da BHCB, disponibilizado pela DSG, como as imagens originais do SRTM não passaram por correções relacionadas ao posicionamento geodésico (qualidade no georreferenciamento), uma vez que este não era o propósito da pesquisa. Este fato pode ter influenciado para o aumento das discrepâncias, encontradas em dois grupos de coordenadas do eixo N. Os resultados alcançados, apontam que o modelo ODR_Hidro, embora tenha produzido resultados similares aos dados obtidos com o uso do ArcGIS, no que tange à área, perímetro e número de canais, mostrou-se eficiente ao produzir dados tanto usando a imagem segmentada como a imagem não segmentada.

Há de ser ressaltado que os dados vetoriais das cartas topográficas disponibilizados pela DSG, cuja escala apresentada é de 1:100.000, contribuíram de forma significativa para a rejeição da hipótese nula (Tabela 4). Foi possível observar que as cartas topográficas de escala de 1:100.000, confrontadas com as

cartas topográficas de 1:25.000, ambas disponibilizadas pela DSG, apresentam divergência de altimetria, que pode ter ocorrido em função da generalização da escala cartográfica dos produtos, haja vista que as drenagens observadas nas cartas escoam para locais diferentes, conforme foi apresentado na Figura 14 A, B, C e D. Por outro lado, também deve ser levado em conta outros fatores que exercem influência para o desenvolvimento das drenagens, como é o caso da estrutura geológica, fatores tectônicos, falta de controle estrutural, visto que o padrão predominante das drenagens da BHCB é o dendritico. Ressalta-se que em função da não cobertura de toda a área de estudo da BHCB pela carta topografia na escala de 1:25.00 da DSG, não permitiu o seu uso para a validação deste estudo. Os resultados obtidos apontaram para a rejeição da hipótese nula em apenas dois grupos das coordenadas dos eixos N, nos dados que foram comparados com os produtos fornecidos pela DSG. Todavia, essa rejeição da hipótese nula, não aconteceu com os dados referentes às coordenadas dos eixos E. Os dados produzidos através do SRTM segmentado e não segmentado, assim como a validação de campo não confirmaram a rejeição da hipótese, indicando que o mapeamento efetuado através do ODR_Hidro, esteja correto, conforme foi corroborado através da Figura 14 D, apontando que o mesmo ao trabalhar com a imagem segmentada do SRTM, mapeou os canais de drenagens em escala melhor que 1:50.000, melhorando a qualidade dos produtos obtidos. No entanto, deve-se observar que a segmentação não efetuou nenhuma alteração no posicionamento geodésico do SRTM, assim, as suas características originais, referente ao seu georreferenciamento foram mantidas para as duas bases do SRTM, a segmentada e a não segmentada, de tal modo que os deslocamentos entre os dois são inexistentes.

O modelo ODR_Hidro carece de outras aplicações concernentes à produção de dados geomorfométricos, utilizando escalas de estudos diferentes da que foi proposta neste estudo, com o intuito de efetuar ajuste adequado no modelo, haja vista que uma vez bem ajustado, poderá contribuir para produção de dados geomorfométricos em larga escala e com tempo de produção bem reduzido, auxiliando o usuário na obtenção dos índices de análise de morfometria de bacias hidrográficas, pois o processamento desses dados acontece de forma rápida e totalmente automatizada.

CONCLUSÕES

O modelo hidrológico ODR_Hidro confeccionado para esta pesquisa, demonstrou que pode contribuir de forma significativa para extração de dados geomorfológicos de bacias hidrográficas, visto que dos 03 pares de grupos de amostras, em 04 deles, os resultados apontaram para a aceitação da hipótese nula, assim como os resultados da validação de campo, que corroboraram para a confirmação de aceite da hipótese nula. Ao efetuar a comparação dos resultados encontrados com os obtidos por meio do SRTM original e com a classificação hierárquica feita de modo manual, confirmou-se que as técnicas de segmentação de imagens podem contribuir para extração de drenagens, utilizando a imagem do SRTM segmentado, visto que esta pesquisa apresentou um maior detalhamento na extração da drenagem, quando usado o SRTM segmentado, haja visto a maior densidade extraída. Ressalta-se também que os demais índices geomorfológicos, embora tenham sido extraídos, os mesmos não foram testados, necessitando de avaliações para terem suas qualidades comprovadas.

Por outro lado, utilizando a estatística do teste de *Mann-Whitney*, aplicando o teste de hipótese de similaridade para 03 pares de grupos de amostras, ou seja, dos 06 conjuntos verificados, apenas 02 destes conjuntos de amostras tiveram suas hipóteses não confirmadas ao utilizar os resultados obtidos através da carta da DSG. Consequentemente, 04 destes conjuntos de amostras apontaram para a aceitação da hipótese nula, visto que as discrepâncias encontradas não apresentaram afastamentos significativos. Portanto, os resultados produzidos com o ODR_Hidro utilizando a imagem do SRTM segmentado, comparados como os dados obtidos do SRTM não segmentado, apontaram para a aceitação da hipótese nula.

O mapeamento efetuado através da validação de campo, comprovou a existência das drenagens, mapeadas com o ODR_Hidro, utilizando o SRTM segmentado e que não estavam presentes na carta da DSG (1:100.000).

O modelo ODR_Hidro, utilizando a imagem do SRTM segmentado, demonstrou através dos testes estatísticos bem como a validação de campo, ser uma ferramenta eficiente e que poderá contribuir para a extração mais detalhada da rede de drenagem, visto sua comprovação em campo, ficou evidenciado também que o modelo mapeou em escala melhor do que 1.100.000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. B.; BAYER, R. M. & JÚNIOR, L. G. F. Compartimentação morfométrica da bacia do Rio Coco como subsídio à análise de fragilidade ambiental (Morphometric compartmentation of the Coko River basin as subsidy to analysis of environmental fragility). **Revista Mercator**, v. 15, n. 4, 2016, p. 83-94.
- APOLINÁRIO, O. K. S.; SOUZA, B. I. & ALMEIDA, N. V. Diagnóstico físico conservacionista e degradação ambiental no município de Cabaceiras-PB. **OKARA: Geografia em debate**, v. 8, n. 2, p. 377, 2014.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: XII Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, AGIT Symposium. **Proceedings...** Karlsruhe, Alemanha: Herbert Wichmann, 2000, p. 12-23.
- BAPTISTA, G. M. D. M., VIVALDI, D. D., & MENESES, P. R. (2016). Atmospheric and crosstalk corrections in Aster data for the mapping of soil mineralogical relationship. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51(9), 1272-1282.
- CAMPANHARO, W. A.; CECÍLIO, R. A.; SPERANDIO, H. V. & HOLLANDA, M. P. Utilização de geotecnologias para análise morfométrica e diagnóstico ambiental de microbacia hidrográfica no Espírito Santo. In: SANTOS, A. R. *et al.* (Org.). **Geotecnologias aplicadas aos recursos florestais**. 1. ed. Suprema, 2012, p. 210-222.
- CARVALHO, T.; M.; & LATRUBESSE, E.; M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5, n. 1, 2004.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. 14. imp. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, p. 188.
- COELHO NETTO, A. L. (2015). Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia In: GUERRA, AJ T; CUNHA, S. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**, 7.
- CORREA, N. F.; OLIVEIRA RIBEIRO, V.; MIOTO, C. L. & PARANHOS FILHO, A. C. (2017). Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. **Anuário do Instituto de Geociências**, 40(1), 217-225.
- DÉSTRO, G. F. (2010). Diagnóstico físico-conservacionista no estudo dos conflitos de uso da terra em microbacias hidrográficas. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/ Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 5(4).

- DLUGOSZ, F. L.; ROSOT, N. C.; ROSOT, M. A. D. & OLIVEIRA, Y. M. M. (2009). Índice para a avaliação de segmentação de imagens. **FLORESTA**, 39(1).
- DOUBRAWA, B.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. & KLEIN HENTZ, Â. M. (2014). Remoção de CO2 associada à dinâmica da cobertura florestal na bacia hidrográfica do rio Iguaçu no período 2000-2010. **Interciência**, 39(8).
- FERNÁNDEZ, D. C. J.; MORISSON VALERIANO, M.; ZANI, H. & OLIVEIRA ANDRADES FILHO, C. (2012). Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Cartografia**, (64/3).
- FERREIRA, N. H.; FERREIRA, C. A. B. V. & PIROLI, E. L. (2016). Análise ambiental da microbacia do Córrego Água da Onça com a utilização de geoprocessamento no município de Avaré/SP. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, 12(4).
- FERREIRA, R. D. S.; COSTA, G. A. & FEITOSA, R. Q. (2013). Avaliação de critérios de heterogeneidade baseados em atributos morfológicos para segmentação de imagens por crescimento de regiões. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 3.
- FRANCO, A. C. V. & SANTO, M. A. D. (2015). *Contribution of morphometry to flood studies in the Luís Alves Basin/SC, Brazil*. **Mercator** (Fortaleza), 14(3), 151-167.
- GOMES, M.; SANTOS, D. J.; JANSEN, D. C. & MANSUR, M. F. (2013). Aplicação do índice para avaliação de segmentação (IAVAS) no mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Espeleologia**, 2(3), 12-34.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. **Digital image processing New Jersey**, 2008. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=IDojQwAACAAJ&pgis=1>>. Acesso em: 23 out. 2017.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. (2000). Processamento de imagens digitais. **Editora Blucher**.
- GUI, R., XU, X., DONG, H., SONG, C., & PU, F. (2016). Individual building extraction from TerraSAR-X images based on ontological semantic analysis. **Remote Sensing**, 8(9), 708.
- LEOTTI, V. B.; COSTER, R.; & RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HCPA. Porto Alegre**. Vol. 32, no. 2 (2012), p. 227-234.
- LIKENS, G. E.; *Beyond the shoreline: a watershed-ecosystem approach*. **Verh. Internat. Verein. Limnol**, v. 22, n. 1, 1984.
- MENDOZA, M. E.; GRANADOS, E. L.; GENELETTI, D.; PÉREZ-SALICRUP, D. R. & SALINAS, V. (2011). *Analysing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975–2003)*. **Applied Geography**, 31(1), 237-250.
- MOREIRA, L. L. & SERRA, J. C. V. Avaliação de metodologias utilizadas em estudos morfométricos de bacias hidrográficas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 1, 2017.
- PASSO, D. P.; BIAS, E. S.; BRITES, R. S. & COSTA, G. A. (2013). Uso do sistema InterImage para a identificação de alvos urbanos em imagens do satélite Worldview II. **Revista Brasileira de Cartografia**, 6(65/6).
- PIAZZA, G. A. & VIBRANS, A. C. Classificação orientada a objetos para mapear florestas secundárias em Santa Catarina, Sul do Brasil. **Rbc**, v. 66, n. October, 2014, p. 993-1005.
- PINTO, V. G.; SOUZA, L. R. N.; MELO, R. C. B. & OLIVEIRA, M. P. J. (2014). Diagnóstico físico-ambiental como subsídio a identificação de áreas vulneráveis à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG), *Brasil/ Physical and environmental diagnosis as a subsidy identifying vulnerable areas to erosion in the Ribeirão do Espírito Santo watershed in Juiz de Fora (MG), Brazil*. **Revista Ambiente & Água**, 9(4), 632.
- RUIZ, L. F. C.; GUASSELLI, L. A.; & TEN CATEN, A. (2017). Árvore de decisão e análise baseada em objetos na classificação de imagens com resolução espacial submétrica adquiridas por VANT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 23(2).
- SILVA, L.; LIMA, E. R. V.; ALMEIDA, H. A.; COSTA FILHO, J. F. Caracterização geomorfológica e mapeamento dos conflitos de uso na bacia de drenagem do açude Soledade. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, n. 2, 2010, p. 112-122.
- SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. & AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Revista engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 46-57, 2010
- SU, T. & ZHANG, S. (2017). *Local and global evaluation for remote sensing image segmentation*. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 130, 256-276.
- TARBOTON, DAVID G. *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. **Water resources research**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.
- TEODORO, V. L. I., TEIXEIRA, D., COSTA, D. J. L. & FULLER, B. B. (2015). O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista ReBraM**, 11(1), 137-156.
- TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. D.; RIBEIRO,

C. A. A. S. & LEITE, F. P. (2006). Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães-MG. **Revista Árvore**, 30(5), 849-857.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; PARESCHI, D. C.; LUZIA, A. P.; VON HAELING, P. H. & FROLLINI, E. H. (2008). A bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré: estudo de caso em pesquisa e gerenciamento. **Estudos avançados**, 22(63), 159-172.

VALERIANO, M. D. M. (2011). Dados topográficos. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 72-104.

VANACKER, V.; MOLINA, A.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DERCON, G. & DECKERS, S. *River channel response to*

shortterm human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. **Geomorphology**, v. 72, n. 1-4, p. 340-353, 2005.

VOLLENWEIDER, R. A.; (1971). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. Paris: **Organisation for economic co-operation and development**.

WANG, L. & LIU, H. (2006) *An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*. **International Journal of Geographical Information Science**, 20(2), 193-213.