



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

MARCELO DAN SCÁRDUA

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA ANÁLISE
ESPACIAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

JERÔNIMO MONTEIRO, ES
AGOSTO - 2013

MARCELO DAN SCÁRDUA

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA ANÁLISE
ESPACIAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti
Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio
Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos

JERÔNIMO MONTEIRO, ES

AGOSTO - 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S285a Scárdua, Marcelo Dan, 1979-
Avaliação de modelos digitais de elevação para análise espacial de bacias hidrográficas / Marcelo Dan Scárdua. - 2013.
71 f. : il.

Orientador: Sidney Sara Zanetti.

Coorientadores: Alexandre Rosa dos Santos, Roberto Avelino Cecílio.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Hidrografia. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Bacias hidrográficas - Delimitação. I. Zanetti, Sidney Sara. II. Santos, Alexandre Rosa dos. III. Cecílio, Roberto Avelino. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. V. Título.

CDU: 630

Celebrar a vida:

perplexidade da descoberta dos sentimentos,
datas divididas, doces lembranças, especiais,
capacidade de atrair coisas e pessoas boas,
momentos e recordações, sem explicações,
momentos e marcas, tempo e distâncias,
sentimentos e imagens, gestos e frases,
pequenas coisas e grandes tesouros,
respeito e medo? etapas e palavras,
a vida tem seus cursos e caprichos,
desejo, apego, músicas e súplicas,
dias intensos! momentos vazios?
totalidade e frações, infrações?
presença e fluência, carência?
circunstâncias e importâncias,
intensamente e verbalmente,
dúvidas, certezas e belezas,
diferenças e especialidades,
oportunidades e felicidades,
importância e significância,
cada palavra uma proeza,
capacidades e afinidades,
proximidade e verdades,
tendências e influências,
companhia e respostas,
presentes e pertences,
convicções! segredos?
admiração e carinho?
vitórias e conquistas,
tudo ou quase nada,
nada ou quase tudo,
um simples chegar,
vontades e sonhos,
saúde e plenitude,
ternura, venturas,
paz, amor e fé,
além e aquém,
sentimentos,
felicidades,
reflexão,
mágica,
vindas,
vidas,
idas,
mar,
ar,

a
m
é
m

Dedico a DEUS, FAMÍLIA, AMIGOS, VIDA, AMOR E TEMPO ...

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|--|
| AH | ArchHydro |
| ASTER | <i>Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> |
| BH | Bacia Hidrográfica |
| GDEM | <i>Global Digital Elevation Model</i> |
| HN | Hidrografia Numérica |
| HR | Hidrografia de Referência |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDEHC | Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes |
| NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| NGA | <i>National Geospatial Intelligence Agency</i> |
| PC | Pontos Cotados |
| SBHVS | Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Vala do Souza |
| SIG | Sistemas de Informação Geográfica |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> |
| USGS | <i>United States Geological Survey</i> |
| PNRH | Política Nacional de Recursos Hídricos |
| SINGREH | Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos |

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | viii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVO GERAL | 3 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA | 4 |
| 3.1. CICLO HIDROLÓGICO..... | 4 |
| 3.2. BACIA HIDROGRÁFICA..... | 5 |
| 3.3. GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS..... | 6 |
| 3.3.1. Manejo de bacias hidrográficas | 7 |
| 3.4. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA..... | 8 |
| 3.4.1. ArcHydro | 9 |
| 3.5. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO..... | 11 |
| 3.5.1. Interpoladores de dados espaciais | 12 |
| 3.5.2. MDEs provenientes de sensores remotos | 13 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| 4.1. ÁREA DE ESTUDO..... | 15 |
| 4.2. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS..... | 15 |
| 4.3. DELIMITAÇÃO DE BACIAS..... | 18 |
| 4.3.1. Delimitação de referência | 19 |
| 4.3.2. Delimitação automatizada | 21 |
| 4.4. CRITÉRIOS PARA COMPARAÇÃO DAS DELIMITAÇÕES..... | 23 |
| 4.4.1. Avaliação visual | 23 |
| 4.4.2. Avaliação das áreas divergentes | 23 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 5.1. DELIMITAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS..... | 25 |
| 5.1.1. Comparação altimétrica entre MDEs | 26 |
| 5.1.2. Avaliação visual | 27 |
| 5.1.3. Avaliação das áreas divergentes | 30 |
| 5.2. COMPARAÇÃO ENTRE HIDROGRAFIAS NUMÉRICAS..... | 34 |
| 5.3. COMPARAÇÃO ENTRE DIVISÕES DA SBHVS..... | 42 |
| 6. CONCLUSÕES | 45 |
| 7. REFERÊNCIAS | 46 |
| APÊNDICE | 51 |

RESUMO

SCÁRDUA, Marcelo Dan. **Avaliação de modelos digitais de elevação para análise espacial de bacias hidrográficas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES. Orientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti. Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

O presente trabalho teve por objetivo a avaliação de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para análise espacial de Bacias Hidrográficas (BHs), visando identificar os que apresentam melhor desempenho para a delimitação de bacias hidrográficas. Foram utilizados três tipos de fontes de dados de MDEs, sendo: a) MDE_I: proveniente de dados do IBGE, obtido por meio do interpolador *Topo To Raster* do ArcGIS; b) MDE_A: proveniente do sensor GDEM ASTER da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA); e c) MDE_T: proveniente do projeto Topodata, resultante de um refinamento do SRTM realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); todos com resolução espacial de 30 metros. Os MDE_A e MDE_T foram adquiridos diretamente da internet. O MDE_I foi elaborado a partir de dados cartográficos do IBGE, na escala de 1:50.000, contendo Curvas de Nível (CN) com equidistância vertical de 20 metros e hidrografia. Os MDEs foram utilizados em suas formas originais e refinados, visando a obtenção de MDEs com maior consistência hidrológica. Os MDEs originais (MDE_I, MDE_A e MDE_T) foram utilizados diretamente para a delimitação das BHs, usando a extensão ArcHydro (AH) no ArcGIS® 10.1, enquanto os MDEs refinados (MDE_{Ir}, MDE_{Ar} e MDE_{Tr}) foram pré-processados usando o algoritmo *Agree*, para posterior delimitação das bacias utilizando o AH. Realizou-se uma delimitação de referência para fins de comparação com as delimitações automáticas obtidas com as seis opções de MDEs estudadas. A delimitação de referência foi realizada manualmente, em ambiente SIG (ArcGIS), utilizando as referidas cartas do IBGE, contendo CN, hidrografia e pontos cotados. A avaliação das delimitações foi realizada de forma qualitativa, por meio de análise visual, e de forma quantitativa, pelo método das áreas divergentes, ou seja, pelos acréscimos e decréscimos de áreas em relação à delimitação de referência. Foram comparadas também as Hidrografias Numéricas (HN) geradas com e sem refinamento, tendo-se comprovado a eficácia do algoritmo *Agree*, notando-se uma alta semelhança entre as hidrografias refinadas e a de referência. Na comparação das HN sem refinamento, verificou-se que a obtida do MDE_T apresentou melhor desempenho que a do MDE_A, fato que contribuiu para uma melhor eficiência na delimitação das bacias. Das delimitações sem refinamento, a derivada do MDE_I foi a que mais se aproximou da delimitação de referência, seguida pelo MDE_T e MDE_A. Quando comparadas as delimitações dos MDEs refinados, o melhor foi o MDE_{Ir}; porém, a segunda e a terceira colocação se inverteram, sendo o MDE_{Ar} melhor que o MDE_{Tr}. A consistência hidrológica relativa às alterações na delimitação de bacias pode ser melhor evidenciada quando analisada em microbacias localizadas no interior da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Hidrografia, Sistemas de Informação Geográfica, Bacias hidrográficas - Delimitação.

ABSTRACT

SCÁRDUA, Marcelo Dan. **Evaluation of digital elevation models for spatial analysis of watershed**. 2013. Dissertation (Master in Forest Science) - Federal of Espírito Santo University, Jerônimo Monteiro-ES. Advisor: Dr. Sidney Sara Zanetti. Co-Advisor: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Co-Advisor: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

This study aimed to assess digital elevation models (DEMs) from different database in order to identify the ones that best perform watersheds delineation. We used three types of data sources of DEMs: a) DEM_I: from the IBGE, obtained by the interpolator Top To Raster in ArcGIS b) DEM_A: from ASTER GDEM, a Sensor from the National Aeronautics and Space Administration (NASA), and c) DEM_T: from the Topodata project, a result of the refinement of SRTM, conducted by the National Institute for Space Research (INPE), all with a spatial resolution of 30 meters. The DEM_A and DEM_T were acquired directly from the internet. The DEM_I was elaborate from cartographic data of IBGE, at 1:50,000 scale, using the contours lines (CN) with vertical intervals of 20 meters and the hydrography map. The DEMs were used in their original forms and refined to obtain DEMs with greater hidrological consistency. The original DEMs (DEM_I, DEM_A and DEM_T) were used directly for the delimitation of BHs, using the extension ArcHydro (AH) in ArcGIS® 10.1, while the refined DEMs (DEM_{Ir}, DEM_{Ar} and DEM_{Tr}) were pre-processed using the algorithm Agree, for further watershed delineation using. A reference watershed delimitation reference was made to compare with the automatic delimitation obtained with the six options of DEMs studied. The reference delimitation was performed manually in GIS (ArcGIS), using IBGE maps, containing CN, hydrography and elevation points. The assessment of the delimitations was performed qualitatively through visual analysis, and quantitatively, by the method of divergent areas. In other words, the increase and decreases of areas in relation to the reference delimitation. Also it was compared the numerical hydrography (HN) generated with and without refinement. It showed the effectiveness of the algorithm Agree, observing a high similarity between the refined hydrography and the reference hydrography. In the comparison of HN without refinement, it was verified that the one obtained from the DEM_T showed better performance than that obtained from the DEM_A. At of the delimitations without refinement, the one derived from the DEM_I was the closest to the reference delimitation, followed by the derived from DEM_T and DEM_A. When comparing the delimitations of the refined DEMs, the best one was the DEM_{Ir}; however, the second and third position were inverted, being the DEM_{Ar} better than DEM_{Tr}. Consistency hidrological changes concerning the delimitation of basins can be better evidenced when analyzed in watersheds located within the watershed.

Keywords: Hydrography, Geographic Information Systems, Watersheds - Delimitation.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável para a sobrevivência do homem e demais seres vivos no Planeta e que, no caso do ser humano, é responsável pela maior parte de sua constituição. É um recurso natural renovável, porém considerado finito, visto que não atenderá perpetuamente à ilimitada e crescente necessidade humana. Ou seja, sua renovação cíclica não acompanha a crescente utilização pelo ser humano.

Nas últimas décadas, este recurso natural teve sua demanda ampliada pelo rápido crescimento populacional e aceleração do desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo em que sua qualidade diminuiu em função de diversas fontes de poluição que atingem os corpos hídricos sem o devido planejamento e tratamento.

Os problemas mundiais relativos aos recursos hídricos estão vinculados tanto à sua escassez quali-quantitativa, como à sua má distribuição geográfica e temporal. Atualmente, grandes centros urbanos, industriais e áreas de desenvolvimento agrícola enfrentam a falta de qualidade adequada da água, tornando escassa a sua oferta per capita.

O Brasil é privilegiado em termos de disponibilidade hídrica entretanto, a sua distribuição no tempo e no espaço apresenta-se de forma desigual. O país enfrenta o dilema de alcançar o desenvolvimento sustentável e os recursos hídricos servem como um bom exemplo desse impasse, pois o aumento dos problemas relacionados à quantidade e qualidade fazem com que a sua adequada gestão seja fundamental.

O conhecimento hidrológico é fundamental para o planejamento e operação dos sistemas hídricos, pois é a partir da disponibilidade de dados confiáveis que se conhece, estuda, avalia, planeja, executa e gerencia as relações da água com os demais recursos e a sustentabilidade dos meios e processos envolvidos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, relata que a água é um bem de domínio público, um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e ainda, estabelece a Bacia Hidrográfica (BH) como unidade territorial para a implementação da política em questão. Na legislação estadual, estabeleceu-se

que, além de outras funções, estas bacias são também unidades de planejamento, execução e gerenciamento da política voltada aos recursos hídricos. Neste contexto, o mapeamento se caracteriza como peça chave para uma eficaz gestão ambiental de territórios, pelo desenvolvimento de ações que objetivam o ajuste das demandas econômicas, sociais e ambientais, por água em níveis sustentáveis, arquitetando os usos atuais e futuros deste bem.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem automatizar tarefas e facilitar a realização de análises complexas, capazes de manipular as funções que representam os processos ambientais e modelos hidrológicos em diversas regiões, permitindo economia de recursos e tempo. Estes sistemas possuem grande importância do ponto de vista hídrico e, em particular, para a análise do modelo digital do terreno, onde pode-se extrair características fisiográficas e representativas do escoamento, além de auxiliar na delimitação de bacias hidrográficas.

A delimitação automatizada de bacias usando Modelo Digital de Elevação (MDE) é mais rápida, menos subjetiva e provê mais informações que as técnicas manuais e tradicionais aplicadas a mapas topográficos. Contudo, uma fonte significativa de discordância é o fato do traçado da hidrografia mapeada não coincidir com o trajeto de escoamento derivado numericamente do modelo.

Os dados disponíveis dos modelos superficiais de terreno apresentam significativas diferenças quando confrontados, o que pode levar a diferentes resultados para o mesmo local. Este fato deve ser avaliado antes da escolha da fonte de dados a ser utilizada, pois algumas são defasadas, outras oferecem diferentes precisões para o mesmo território de planejamento, algumas são conhecidas como melhores em regiões declivosas, outras em regiões planas, enfim, não há um consenso acerca do melhor MDE.

Diante do exposto, ressalta-se a importância dos estudos relacionados à delimitação automatizada e identificação hidrográfica de tais unidades territoriais, visando subsidiar as tomadas de decisão na gestão dos recursos hídricos e ambientais, notoriamente relativas à base de dados e tecnologias utilizadas.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar a delimitação de bacias hidrográficas utilizando modelos digitais de elevação procedentes de diferentes origens (IBGE, *ASTER* e *Topodata*).

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obter MDEs de diferentes bases de dados (originais) e promover o refinamento destes, via ArchHydro (*Agree*), visando estudar o efeito da aplicação deste procedimento na melhoria da consistência hidrológica dos MDEs.

Utilizar os MDEs obtidos (originais e refinados) para geração da hidrografia numérica e delimitação de bacias, e comparar os resultados para identificar aquele que apresenta melhor desempenho.

3. REVISÃO DE LITERATURA

O conhecimento dos processos e fenômenos que fazem parte do ciclo hidrológico e sua modelagem, mais precisamente nas bacias hidrográficas, permite uma melhor compreensão sobre a movimentação da água na parte terrestre do ciclo e melhor desempenho na gestão de recursos hídricos. Para tal, deve-se utilizar mecanismos que apresentem resultados cada vez mais confiáveis (maior precisão e menor tempo) na manipulação dos dados de bacias hidrográficas voltados para objetivos específicos.

3.1. CICLO HIDROLÓGICO

A hidrologia é o estudo da água em todas as suas formas, sobre e sob a superfície da terra, incluindo sua distribuição, circulação, comportamento, propriedades físicas e químicas, e suas reações com o meio (LIMA, 2008).

Para melhor compreensão do percurso da água, faz-se necessário recorrer ao conceito do ciclo hidrológico. De acordo com Goldenfum e Tucci (1996), o ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar, associada à gravidade e à rotação terrestre. Este ciclo, é o elemento fundamental da hidrologia, representando a água em fases distintas e independentes, desde a ocorrência de precipitações até o seu retorno à atmosfera sob a forma de vapor.

Segundo Lima (2008), pelo fato de ser um ciclo, não tem começo nem fim. A água é evaporada dos oceanos e da superfície continental e se torna parte da atmosfera. A umidade atmosférica precipita-se tanto nos oceanos como nos continentes. Nestes, a água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, pode escoar nas superfícies do terreno, ou pode infiltrar-se no solo, de onde pode ser absorvida pelas plantas. Assim, o ciclo da água envolve vários e complexos processos hidrológicos, sendo os principais: evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação e escoamento superficial.

De acordo com Tucci (2009), o ciclo hidrológico é normalmente estudado com maior interesse na fase terrestre, onde o elemento fundamental

de análise é a BH. Os fatores fisiográficos (principalmente área, comprimento, declividade e forma da bacia), tipo de solo, topografia, rede de drenagem e obras hidráulicas presentes na BH são de fundamental importância para a compreensão de sua dinâmica, para implementação de um plano de manejo e o monitoramento desta.

3.2. BACIA HIDROGRÁFICA

Com o passar do tempo, várias definições de BH foram formuladas por diversos autores, no entanto, percebe-se grande semelhança e consideração deste limite espacial, baseado na área de concentração de determinada rede de drenagem.

A bacia hidrográfica (Figura 1) é uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água, tal que toda vazão efluente seja descarregada através de uma única saída (VILLELA E MATTOS, 1975). Não obstante, Tucci (2009) classificou a BH como sendo uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A BH compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório.

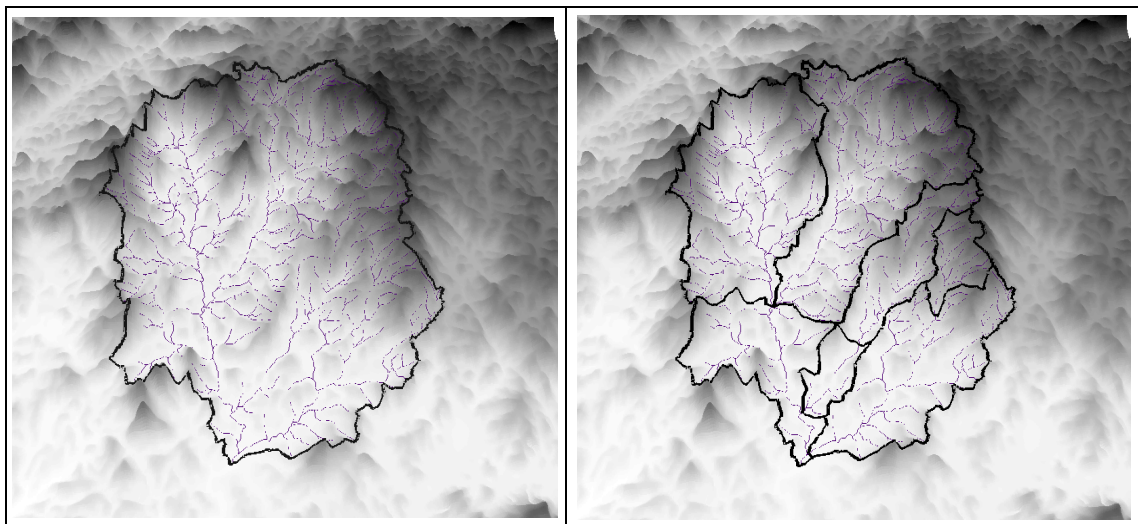


Figura 1. Exemplos de delimitações de sub-bacias hidrográficas, tendo como suporte o modelo digital de elevação e hidrografia. (Fonte: Autor)

Para Von Sperling (2007), uma bacia hidrográfica é uma unidade fisiográfica, limitada por divisores topográficos, que recolhe a precipitação, age como um reservatório de água e sedimentos, defluindo-os em uma seção fluvial única, denominada exutório. A bacia associada a uma dada sessão fluvial ou exutório, é individualizada pelos divisores de água e pela rede fluvial de drenagem.

Os principais componentes das BHs, como solo, água, vegetação e fauna, coexistem em permanente e dinâmica interação, respondendo às interferências naturais (intemperismo e modelagem da paisagem) e aquelas de natureza antrópica (uso e ocupação da paisagem), afetando ecossistemas como um todo (FERNANDES e SOUZA, 2013). A identificação dos componentes supracitados e dos processos relativos às suas interações, são de fundamental importância para o planejamento de como serão utilizados os recursos da bacia e de seu processo de manejo e conservação.

A delimitação de bacias é de fundamental importância para seu conhecimento, e para o planejamento de como serão utilizados os recursos desta e seu processo de gestão.

3.3. GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, além de instituir a PNRH, criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH). Esta lei trata a questão de gestão dos recursos hídricos de forma descentralizada, atribuindo responsabilidades distintas aos segmentos de governo federal, estadual e municipal. Representa, ainda, uma profunda mudança de valor no que se refere aos usos múltiplos da água, às prioridades desses usos, ao seu valor econômico, à sua qualidade de ser finita e à participação popular na sua gestão (BRASIL, 1997).

A PNRH foi criada com objetivo de assegurar à presente e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, além da prevenção e da defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Entre os principais fundamentos do artigo 1º da PNRH, destacam-se os que discorrem sobre a água ser um bem de domínio público, ser um recurso natural limitado e dotado de valor econômico, e que a BH ficou estabelecida como unidade territorial para a implementação da política em questão. Ainda no artigo supracitado, ficou definido que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas, ser descentralizada e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades.

A Lei Estadual nº 5.818, de 30 de dezembro de 1998 (ESPÍRITO SANTO, 1998) dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e cria o Sistema Integrado de Gerenciamento e Monitoramento do estado do Espírito Santo (SIGERH/ES). Esta lei cita no artigo 2º inciso V, que a BH é a unidade físico-territorial de planejamento, gerenciamento e enquadramento das águas, consideradas as influências por estas recebidas das regiões limítrofes (meio físico, antrópico e biótico) e das camadas subjacentes do solo.

O desenvolvimento sustentável é fundamentado no uso racional dos recursos naturais, para que possam continuar disponíveis a gerações futuras, ou seja, aquele que não esgota, mas conserva e realimenta sua fonte de recurso naturais, e que não inviabiliza a sociedade (AGENDA 21, 1995).

Neste contexto, o manejo de bacias hidrográficas representa uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento de forma sustentável. Este, deve sempre buscar o auxílio de ferramentas que possibilite melhorias na qualidade dos dados, do processamento, da modelagem e conseqüentemente da resultados, tanto parciais como finais, obtidos para fins específicos.

3.3.1. Manejo de bacias hidrográficas

De acordo com Soares et al. (2010), gerir recursos hídricos é uma necessidade premente e que tem o objetivo de ajustar as demandas econômicas, sociais e ambientais por água em níveis sustentáveis, de modo a permitir, sem conflitos, a convivência de seus usos atuais e futuros.

O enfoque do planejamento e manejo de bacias hidrográficas se mostra potencialmente eficaz na gestão ambiental de territórios (ou seja, em ordenamento do território), visto que estas podem ser pesquisadas como sistemas naturalmente delimitados.

Segundo Lima (2008), o manejo de bacias hidrográficas não se limita à proteção e conservação de corpos de água e cobertura vegetal de determinadas áreas, com o fim exclusivo de produzir água de boa qualidade para o consumo, pois estas práticas se aplicam à proteção ou preservação.

Coutinho (2010) afirma que o manejo de bacias hidrográficas pode ser entendido como o conjunto de ações que organizam e orientam o uso e ocupação do solo e demais recursos existentes na bacia, visando o uso sustentado do solo e da água, assim como a produção de bens e serviços.

A essência de uma boa gestão de recursos hídricos é a disponibilidade de dados confiáveis para avaliar o planejamento e operação dos sistemas hídricos, entre outros processos envolvidos na gestão dos recursos hídricos. O conhecimento hidrológico deve ser visto como fundamental para o planejamento e manejo sustentável devido às estreitas relações da água com os demais recursos (VILAÇA et al., 2009).

Utilizando os SIG como instrumentos para gestão e preservação ambiental, é possível analisar, planejar e monitorar ações de forma mais coerente e eficaz com um considerável ganho de tempo (SILVEIRA, 2010). O uso dos SIG pode propiciar maior precisão, confiabilidade e ganho de tempo na realização de estudos de bacias hidrográficas, sendo marcante a diversidade de ramos do conhecimento e número de adeptos que se utilizam destes sistemas (SILVA et al., 2007).

3.4. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Os SIG são sistemas que automatizam tarefas e facilitam a realização de análises complexas, pois são sistemas auxiliados por computador para adquirir, armazenar, analisar, produzir e exibir mapas temáticos. São ferramentas capazes de manipular funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de forma simples e eficiente, permitindo economia de recursos e tempo (SANTOS et al., 2006).

Segundo Ferreira (1997), os SIG podem ser considerados um instrumento para mapear e indicar respostas às várias questões sobre planejamento urbano e regional, meio rural e levantamento dos recursos renováveis, descrevendo os mecanismos das mudanças que operam no meio

ambiente e auxiliando no planejamento e manejo dos recursos naturais de regiões específicas.

Os SIG têm sido utilizados, para a geração de banco de dados que funcionam como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos, permitindo, através dessa integração, a manipulação de dados espaciais e servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (SANTOS et al., 2006; MENDES FILHO et al., 2007).

Os SIG são importantes para a análise intensa de informações a partir de um ponto de vista hídrico e, em particular, para a análise do MDE do terreno, como documento cartográfico substancial (SAITO, 2011). A incorporação de funções direcionadas à hidrologia e aos recursos hídricos, tais como a manipulação de MDE com a função de extrair características fisiográficas e representativas do escoamento, caracterizam a sua funcionalidade e auxiliam na delimitação de BH (MIRANDA et al., 2011).

Vários programas no mercado e livres na internet realizam operações no intuito de criar e desenvolver trabalhos específicos sobre MDEs, dentre eles se destaca o conjunto de ferramentas ArcHydro (AH), direcionado para recursos hídricos, presente no programa ArcGIS® 10.1.

3.4.1. ArcHydro

O *software* AH foi desenvolvido no Centro de Pesquisas em Recursos Hídricos (*Center for Research in Water Resources - CRWR*) na *The University of Texas at Austin - EUA*, sendo gratuitamente distribuído pela Environmental Systems Research Institute (ESRI), podendo ser encontrado tanto o programa como seus tutoriais, no endereço: <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2012/07/16/arc-hydro-tools-for-10-1-beta-now-available/>.

Conforme ESRI (2012) o AH é um conjunto de funcionalidades que opera como uma barra de ferramentas (*toolbox*) dentro do *ArcGIS®*, para complementar a análise temporal e geoespacial de dados, sendo voltado para suportar aplicações e gestão de recursos hídricos e modelagem hidrológica. É constituído por dois componentes principais, que são o "Modelo de Dados" e as "Ferramentas". Estes dois componentes, juntamente com o quadro de

programação genérica, proporcionam uma concepção de base de dados e um conjunto de instrumentos que facilitam as análises realizadas frequentemente na área de recursos hídricos. Destina-se a fornecer a funcionalidade inicial, que pode ser expandido, adicionando-lhe as estruturas de banco de dados e funções requeridas por uma tarefa ou aplicação específica.

As ferramentas do AH atendem a dois objetivos primários: o primeiro, é manipular (atribuir) os principais atributos do modelo de dados, que formam a base para futuras análises, incluindo os identificadores de chave e os atributos de medição; o segundo, é fornecer funcionalidades usadas em aplicações de recursos hídricos (ESRI,2012). Isso inclui a delimitação de BH baseada no MDE, divisor de águas, geração de rede de drenagem e atributos de traçado.

No processamento com o AH, MDEs “marcados/queimados” são produzidos. Isso é uma implementação do método *AGREE*, desenvolvido na Universidade do Texas em Austin, em 1997. Uma referência do procedimento encontra-se em <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>. O processo consiste em marcar a rede de drenagem conhecida sobre o MDE, forçando, o gradiente de fluxo a seguir o caminho imposto ao MDE pelas linhas que representam a rede de drenagem em questão (FAN et al., 2011).

O objetivo do método *Agree* é forçar os MDEs a corresponderem a vetores de fluxo (hidrografia), fazendo-os concordar com uma linha em um mapa planimétrico. Este sistema ajusta a elevação da superfície do MDE para ser consistente com a hidrografia vetorizada. O modelo de terreno resultante pode não ficar de acordo com a realidade, mas tem propriedades que podem torná-lo mais útil do que o original, dependendo de sua função, como por exemplo, para a delimitação de bacias hidrográficas.

Após executada a metodologia *Agree*, a análise dos *rasters* é realizada para gerar dados da direção do escoamento, área acumulada, definição da drenagem, segmentação da drenagem e delimitação de bacias. Esses dados são então utilizados para desenvolver uma representação vetorial de uma bacia e sua drenagem a partir de um ponto selecionado.

O MDE é o principal elemento a se utilizar para a delimitação de bacias hidrográficas pelo método automático, realizado em ambiente SIG. Entretanto, o MDE, originalmente, pode apresentar imperfeições e deve passar pelo

processo de filtragem, realizada por um *software* para correções e, após tal processo segue uma sequência lógica para delimitação.

3.5. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

O MDE é uma representação digital de uma seção da superfície, dada por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (x,y) e um valor de intensidade do pixel, correspondente à elevação (z) (LUIZ et al., 2007).

Para Valeriano (2004), os MDEs são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com valor de elevação em cada pixel. Os registros altimétricos devem ser valores de altitude ou cota do relevo, para que seja uma representação da topografia.

Conforme Barros (2006), os MDEs, são obtidos através de levantamentos topográficos ou aerofotogramétricos (sendo normalmente representados através de Curvas de Nível (CN) e Pontos Cotados (PC). A fonte de dados mais comum para a geração de MDEs no Brasil, segundo Chagas (2010), são as curvas de nível e, de forma complementar, a rede hidrográfica, obtidas em cartas topográficas, principalmente as elaboradas pelo IBGE.

Além desses métodos, há ainda os oriundos do sensoriamento remoto orbital, sendo exemplos de MDEs com acesso livre na internet, o MDE do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*, e o MDE Topodata que é um refinamento do MDE oriundo do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Existe também, sensores acoplados a satélites, que proporcionam MDEs a partir de radar e laser, os quais tem a vantagem de obter leituras também sem a presença de luz, porém ainda não são disponíveis gratuitamente.

A derivação automática de dados topográficos da bacia pelo MDE é mais rápida, menos subjetiva e provê mais informações que as técnicas manuais e tradicionais aplicadas a mapas topográficos (RIBEIRO, 2002). Um dos principais empecilhos ao uso dos MDEs brutos é a discordância entre o traçado da hidrografia mapeada e o trajeto de escoamento superficial derivado numericamente (SAITO, 2011).

O MDE gerado deve ser fiel na representação do relevo e deve assegurar a convergência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem mapeada, garantindo, assim, a sua consistência hidrológica (CHAVES, 2002). Este autor, considera que o Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC) pode ser definido como a melhor representação digital do relevo capaz de reproduzir, com a máxima exatidão, o caminho preferencial de escoamento da água superficial observado em situações reais. A utilização de MDEHCs possibilitam a obtenção automática das características físicas das bacias de drenagem (MARQUES e SILVA, 2007).

3.5.1. Interpoladores de dados espaciais

A partir de dados transformados para o formato digital, são utilizados programas computacionais por meio de interpoladores, conferindo-lhes uma continuidade desejada para a geração do MDEHC. Para Santos (2012), a interpolação espacial é o processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar valores em outros pontos, ou ainda, um conjunto de técnicas que visam a criação de superfícies contínuas a partir de amostras pontuais.

Os resultados obtidos por Chaves (2002), Pires et al., (2005), Moreira (2006) e Coutinho (2010) indicam o interpolador *Topo to Raster* (TR), como o de melhor desempenho para consistência hidrológica. Corroborando com essa idéia, Saito (2011) realizou a comparação entre os interpoladores Inverso do Quadrado da Distância (IQD), *Krigagem*, *Spline* (Curvatura Mínima), Triangulação de *Delaunay* e *Topo to Raster*, sendo o último indicado para a geração de MDEHC.

O algoritmo de interpolação TR está disponível no programa *ArcGIS*[®] 10.1, em seu módulo *ArcToolbox*. É uma implementação de um interpolador desenvolvido por Hutchinson (1989) em seu programa *Australian National University* (ANUDEM), criado para obter uma melhor representação da característica anisotrópica (ou direcional) do relevo (SAITO, 2011).

O método TR usa uma técnica de interpolação por diferenças finitas aperfeiçoada para ter a eficácia de um método de interpolação global, como o

inverso do quadrado da distância, sem perder a continuidade da superfície dos métodos de interpolação globais, como *Spline* e *Krigagem* (ESRI, 2012). Foi especificamente projetado para criar um MDEHC, pois diferencia-se de outros interpoladores por não formar descontinuidades nas superfícies e, ainda, pode ter sua modelagem de drenagem acoplada a outras formas de representação, a exemplo da rede hidrográfica original de cartas topográficas (REDIVO et al., 2002).

Segundo ESRI (2013) na versão do *ArcGIS*[®] 10.1, o TR permite diagnosticar prováveis erros oriundos da base de dados. Os principais erros que outrora eram encontrados apenas pela visualização das cartas e respectivos dados, são indicados automaticamente pelo programa. Entre outros, se destacam os erros na orientação da hidrografia, os conflitos entre CN e hidrografia e, ainda, erros e inconsistências topológicos das CN. Isto torna o processo de obtenção do MDE mais rápido e criterioso que aqueles obtidos nas versões anteriores do *ArcGIS*[®], pois após identificados e corrigidos os erros, repete-se o processo de interpolação até que estes sejam sanados, obtendo-se então o MDEHC.

3.5.2. MDEs provenientes de sensores remotos

O surgimento de sensores orbitais, permitiram a determinação de características topológicas através da interferometria dos modelos de elevação. O sensor *ASTER* é um dos instrumentos a bordo do Satélite TERRA, lançado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em 1999, que gera imagens estereoscópicas da terra. A partir de 2009, o *Global Digital Elevation Model* (GDEM), gerado por imagens *ASTER* foi disponibilizado com resolução espacial de 30 m para todo planeta, ou seja, um arco de segundo (*ASTER*, 2012). Está disponível gratuitamente na internet pelo site do *United States Geological Survey* (USGS) em: asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp.

O SRTM foi uma missão espacial liderada pela *Nasa* e *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA), realizada em 2000, com objetivo mapear a superfície da Terra em três dimensões, num nível de detalhamento inédito, a partir do levantamento de dados altimétricos por radar

interferométrico. Os modelos do SRTM estão disponíveis para o território brasileiro na resolução espacial de 3 arcos de segundo (90m).

No projeto *Topodata*, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2012), realizou-se um refinamento do MDE SRTM, utilizando *Krigagem*, resultando em um MDE com escala espacial de 30 metros, abrangendo todo o território brasileiro. Este MDE refinado está disponível gratuitamente na internet no endereço www.webmapit.com.br/inpe/topodata/. Neste projeto, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada visando a evidenciação de talwegues e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes para favorecer a interpretação das feições de drenagem e caracterização de sua estrutura.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Vala do Souza (SBHVS), com área de 181,28 km², contida na Bacia Hidrográfica do rio Itapemirim, localizada nos municípios de Jerônimo Monteiro, Muqui, Alegre e Cachoeiro de Itapemirim, na macrorregião Sul do estado do Espírito Santo (Lei 9.768/2011-ES), compreendida entre os paralelos 20°45' e 20°55' de latitude Sul e os meridianos 41°20' e 41°28' de longitude Oeste, do datum Sirgas 2000, conforme Figura 2.

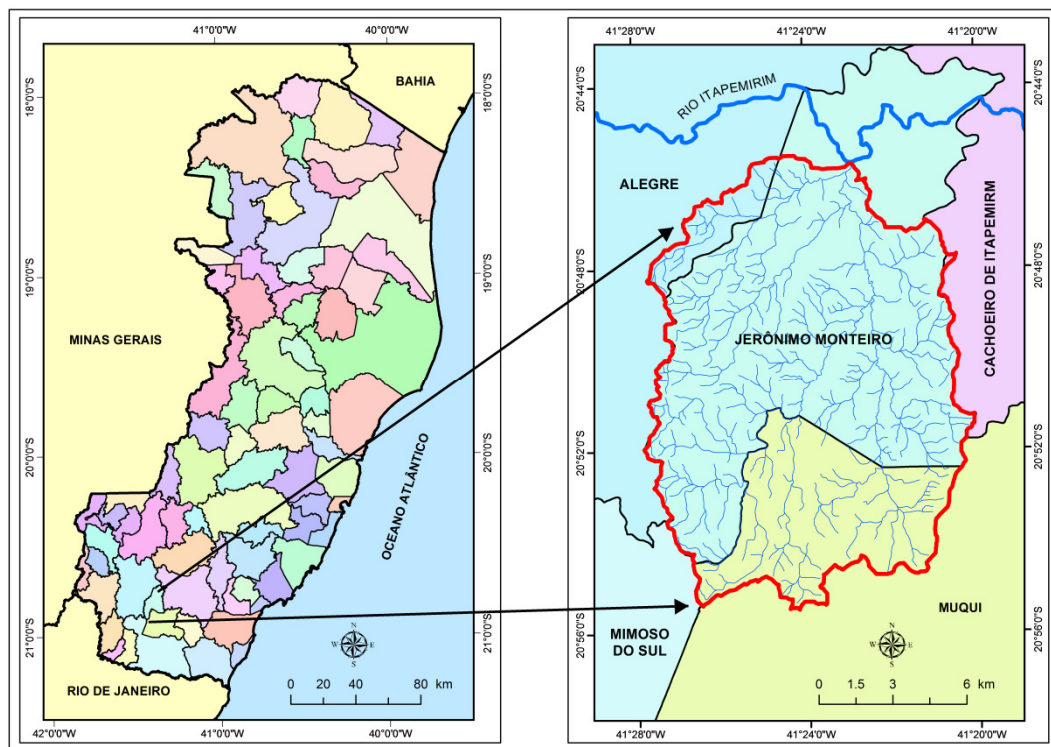


Figura 2. Localização da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Vala do Souza em relação ao estado do Espírito Santo e aos municípios de Alegre, Cachoeiro de Itapemirim, Jerônimo Monteiro, Mimoso do Sul e Muqui. (Fonte: Autor)

4.2. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS

Foram utilizados três tipos de fontes de dados de MDEs para comparação das delimitações da SBHVS, sendo:

- a) MDE_I : proveniente de dados do IBGE, obtido por meio do interpolador *Topo To Raster* do *ArcGIS*[®];
- b) MDE_A : proveniente do sensor *Gdem ASTER* da *Nasa*; e
- c) MDE_T : proveniente do projeto *Topodata*, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

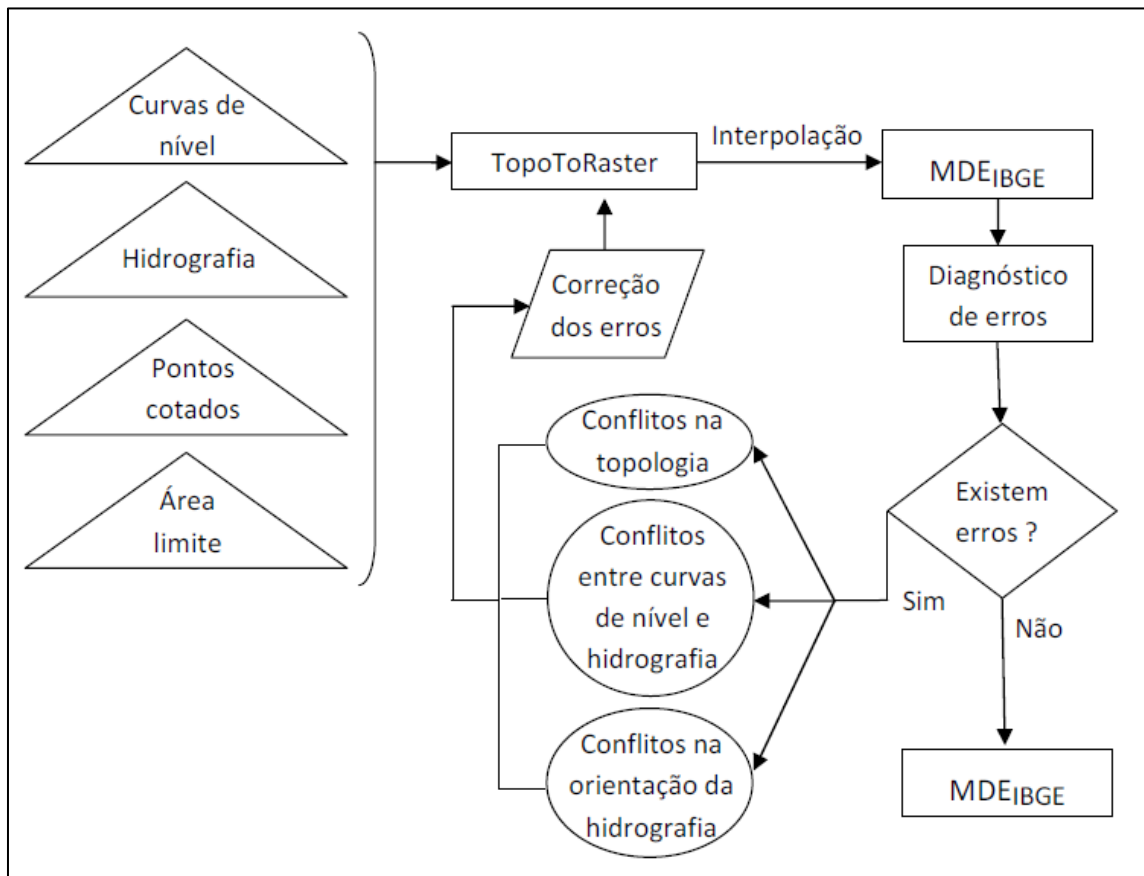


Figura 3. Fluxograma de elaboração do MDE_I sem refinamento (Fonte: Autor)

Os MDE_A e MDE_T foram adquiridos diretamente nos sites <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> e www.webmapit.com.br/inpe/topodata/, respectivamente. O MDE_I , com resolução espacial de 30 m, foi elaborado a partir de dados cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala de 1:50.000, obtidos junto ao Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do estado do Espírito Santo (GEOBASES), em forma já digitalizada (arquivos *Shapelite*), contendo CN com equidistância vertical de 20 m, hidrografia e PC, utilizando-se o algoritmo de interpolação *Topo To Raster*, disponível no programa *ArcGIS*[®] 10.1, em seu módulo *ArcToolbox*. Os

procedimentos realizados para obtenção desses MDEs estão apresentados na Figura 3.

A escolha deste interpolador se deve ao fato dos resultados otimistas encontrados por Chaves (2002), Nogueira e Amaral (2009) e Saito (2011).

Os três MDEs mencionados foram utilizados nas formas originais (aplicando apenas ferramenta para preenchimento de depressões espúrias) e refinados (aplicando metodologia *Agree*), visando a obtenção de MDEs com maior consistência hidrológica. Os MDEs originais (MDE_I , MDE_A e MDE_T) foram utilizados diretamente para a delimitação das BHs, usando o AH, enquanto os MDEs refinados (MDE_{Ir} , MDE_{Ar} e MDE_{Tr}) foram pré-processados usando o *Agree*, para gerar os MDEs refinados, conforme apresentado na Figura 4.

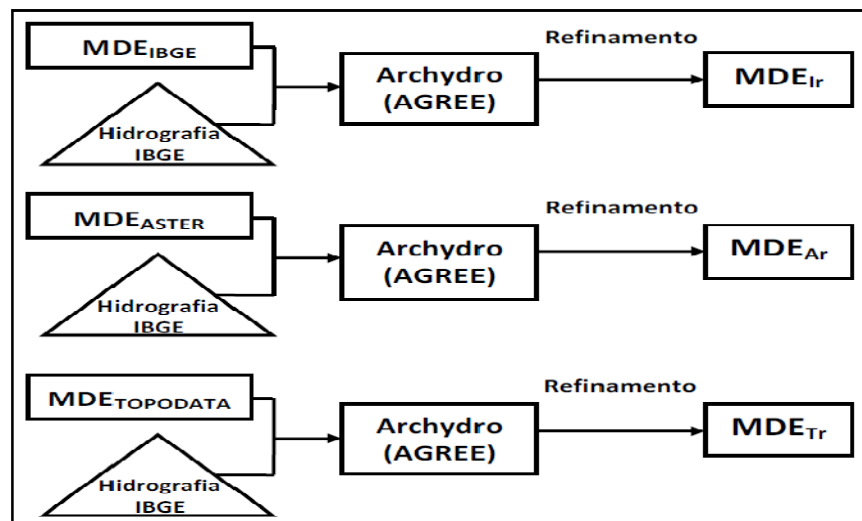


Figura 4. Fluxograma do processo de obtenção dos MDEs refinados. (Fonte: Autor)

Na Figura 5 é apresentada uma visão geral do método *Agree*, onde é representada uma secção transversal de fluxo em que o rebaixamento da superfície e a localização do escoamento podem ser alterados. A linha preta representa a superfície original, a linha azul representa a localização do curso d'água e a linha verde a nova superfície, modelada após utilização do *Agree*. Percebe-se que as menores altitudes da superfície original não se encontram onde se localiza a hidrografia, porém a metodologia *Agree* modela o terreno, de maneira que os locais de escoamento coincidam com a hidrografia, ou vice versa, de acordo com a preferência do operador. Os valores que podem ser

alterados além da posição da hidrografia, são a largura bidirecional do talude (*buffer*), altura e profundidade do talude. Utilizou-se, neste trabalho, os valores 4 células, 10 m e 1000 m, respectivamente. O valor de maior relevância é o tamanho do *buffer*, que para este estudo adotou-se 4 células, devido a realização da análise da maior distância entre a Hidrografia Numérica (HN) e a Hidrografia de Referência (HR) que, neste caso, foi de aproximadamente 105 m, que equivalem a 3,5 células. Para os outros valores utilizou-se o padrão do programa.

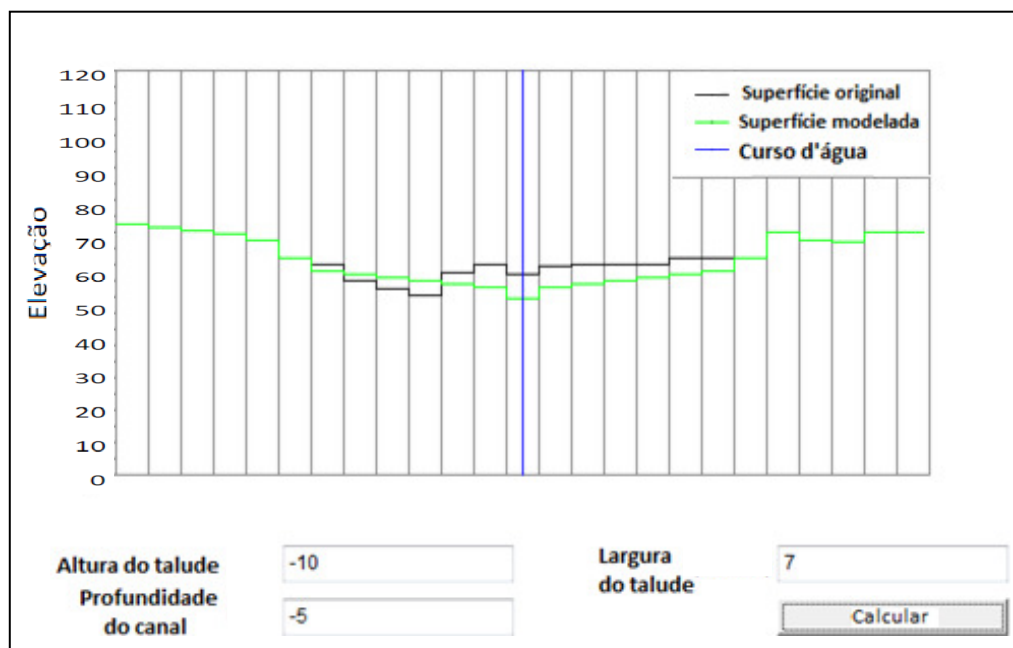


Figura 5. Aplicação do método *Agree*, com alteração do MDE, para tornar a hidrografia consistente. (Fonte: Autor)

Toda base de dados utilizada foi transformada para o sistema de referência geodésico oficial do Brasil, o datum é o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em atendimento ao Decreto Lei 5.334/2005 e à Resolução N° 1/2005 do IBGE.

4.3. DELIMITAÇÃO DAS BACIAS

As delimitações automáticas obtidas com as seis opções de MDEs foram comparadas com uma delimitação de referência. Os procedimentos realizados em tais delimitações encontram-se descritos neste item.

4.3.1. Delimitação de referência

A delimitação de referência foi realizada manualmente, seguindo-se uma adaptação dos procedimentos descritos em Von Sperling (2009), Cecílio et al. (2011), utilizando cartas topográficas plani-altimétricas digitais do IBGE, que foram impressas no formato A2 (dimensões 420 x 594 mm), mantendo-a originalidade da carta com escala cartográfica de 1:50.000, contendo curvas de nível, com equidistância vertical de 20 m, e HR. Os procedimentos, ilustrados na Figura 6, consistiram das seguintes etapas:

Etapa A) Localização e identificação do ponto em que foi realizada a delimitação da bacia (seção de referência ou exutório);

Etapa B) Identificação e reforço da marcação do curso d'água principal e seus tributários (rede de drenagem da bacia), no sentido da foz para as nascentes (de jusante para montante);

Etapa C) Identificação e reforço da marcação, do início do conjunto de canais que constituem a rede de drenagem das bacias vizinhas, com a finalidade de propiciar um contraste visual com a hidrografia vizinha, facilitando o traçado das linhas dos divisores de água;

Etapa D) Identificação e marcação por meio do símbolo "X" das maiores altitudes da linha de cumeada, que separa a BH de interesse das vizinhas. Estes pontos encontram-se entre as duas hidrografias identificadas; e

Etapa E) Traçado dos divisores de águas por meio da ligação dos pontos mais elevados marcados com "X", passando pelas linhas de cumeada, tendo por base as curvas de nível, e levando em consideração a provável perpendicularidade das curvas de nível em relação a hidrografia. Adotaram-se como referência as curvas de nível no sentido das maiores para as menores altitudes, sabendo-se que, em geral, as linhas de cumes passam pelas feições côncavas formadas.

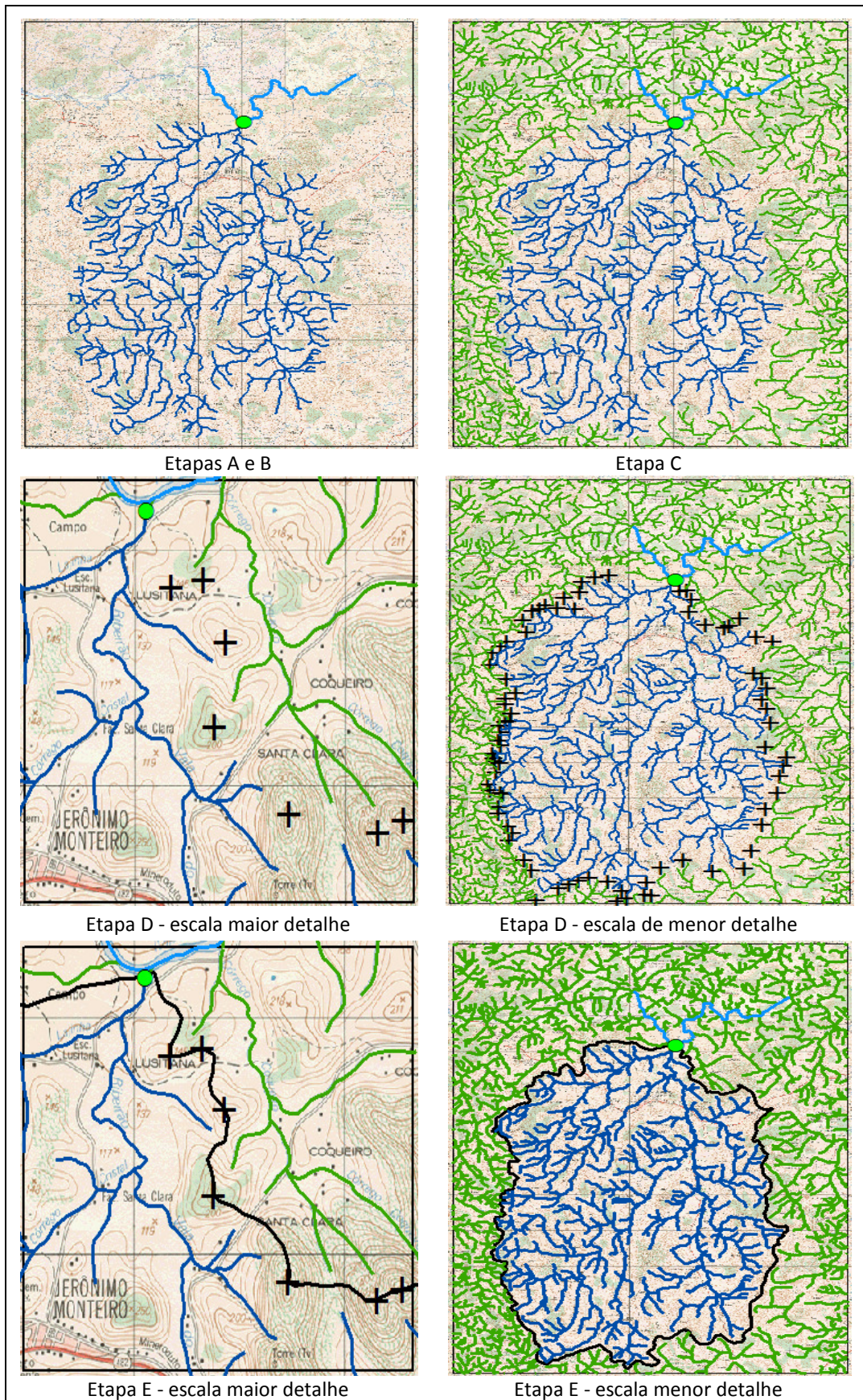


Figura 6. Ilustrações das etapas utilizadas na delimitação de referência da SBHVS. (Fonte: Autor)

A SBHVS foi delimitada manualmente, em formato analógico, esta foi adotada como referência para a fotointerpretação digital em tela no ambiente SIG, sobre a mesma base de dados, com o objetivo de obter a delimitação em formato digital, seguindo-se as mesmas etapas metodológicas citadas anteriormente.

4.3.2. Delimitação automatizada

O ferramental do AH no *ArcGIS*[®] 10.1, foi utilizado segundo ESRI (2013), para realizar a análise dos seis MDEs avaliados e obter as delimitações de BHs, conforme ilustrado na Figura 7.

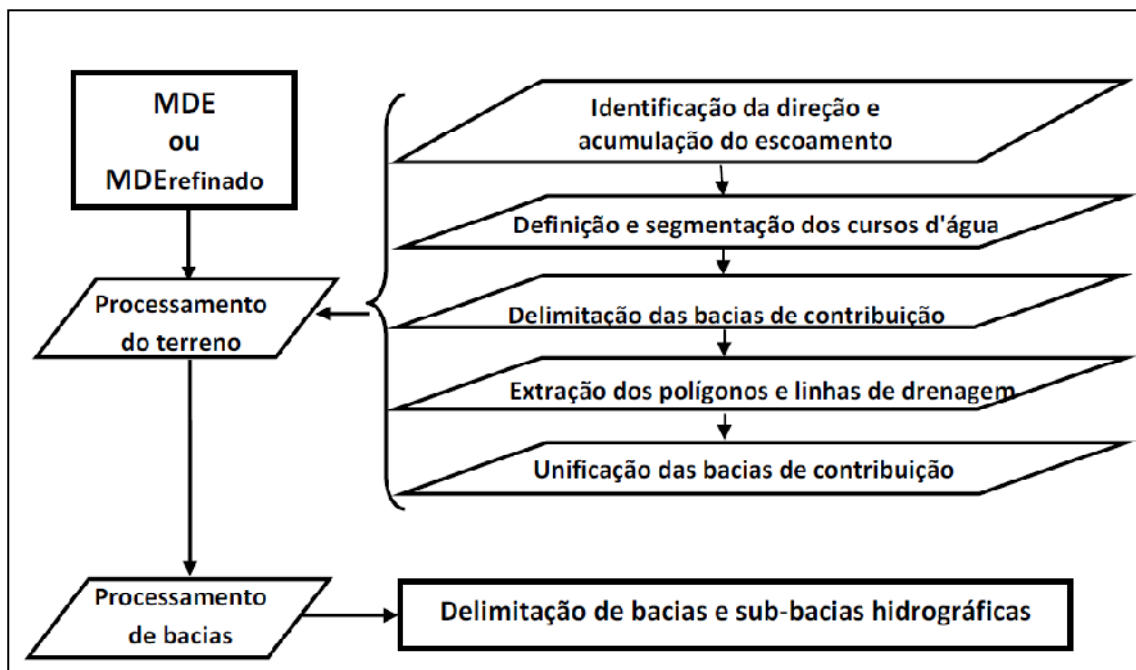


Figura 7. Fluxograma metodológico operacional utilizando o aplicativo *ArcHydro* para delimitação de bacias hidrográficas. (Fonte: Autor)

As ferramentas do AH foram usadas para derivar vários conjuntos de dados que, coletivamente, descrevem os padrões de drenagem da SBHVS. A análise do MDE gera dados sobre direção do escoamento, acumulação de escoamento, definição do escoamento, segmentação do escoamento e delimitação de BHs. Estes dados foram utilizados para desenvolver uma representação vetorial de linhas de drenagem. Usando esta informação, uma rede geométrica é construída. Posteriormente, pode-se traçar bacias de

tamanhos variados, e retirar dados que foram ser transformados em informações de acordo com interesse específico.

De posse do MDE e da hidrografia, a sequência de processamento dos dados sobre o terreno foi a seguinte:

1. Preenchimento de depressões espúrias (sumidouros de escoamento) do MDE;
2. Identificação da direção de escoamento para cada célula, que demonstra o caminho mais íngreme de célula para célula;
3. Identificação da acumulação do escoamento, pela determinação do número de células a montante que contribuem para uma dada célula do MDE;
4. Definição dos cursos d'água, pela definição de quais células receberão atributo de curso d'água, a partir de um limite de acumulação. Nesse estudo, devido à semelhança entre os traçados, foi utilizado o valor de 143 células, correspondente a 0,1287 km²;
5. Segmentação dos cursos d'água, pela codificação com identificação única de cada trecho de curso d'água, em seções que conectam duas confluências sucessivas;
6. Delimitação das bacias de contribuição (bacias hidrográficas) de todos os trechos de cursos d'água obtidos anteriormente à segmentação;
7. Extração dos polígonos das bacias de contribuição, convertendo-se o mapa das bacias de contribuição do formato *raster*, da etapa anterior, para polígonos no formato vetorial;
8. Extração das linhas de drenagem pela vetorização das linhas dos trechos de cursos d'água obtidos na etapa de segmentação, o que corresponde à definição da rede hidrográfica que é formada pelos cursos d'água principais e todos os seus contribuintes;
9. Unificação de bacias, agregando todas as bacias hidrográficas a montante de um curso d'água até a sua confluência de interesse;
10. Delimitação da BH estudada a partir da identificação do ponto onde se deseja analisar; e

11. Delimitação das sub-bacias hidrográficas que promoveram a subdivisão da bacia de drenagem em áreas selecionadas para um propósito particular hidrológico.

4.4. CRITÉRIOS PARA COMPARAÇÃO DAS DELIMITAÇÕES

A avaliação das delimitações foi realizada de forma qualitativa, por meio de análise visual, e de forma quantitativa, pelo método das áreas divergentes, descritos na sequência.

4.4.1. Avaliação visual

A partir da confecção de mapas temáticos com as delimitações das bacias em questão, estes foram sobrepostos, em ambiente SIG, ao mapa da delimitação de referência. As operações foram realizadas tanto para a delimitação da SBHVS, como para algumas sub-divisões encontradas em seu interior. Com o mesmo critério foram realizadas, também, sobreposição do mapa com a HR com as HNs calculadas à partir dos seis MDEs originais e refinados.

Foram quantificadas as alterações mais relevantes no traçado da HN em relação à HR, e não necessariamente na sobreposição exata das hidrografias analisadas. Foram consideradas relevantes as alterações onde ocorre o deslocamento do curso d'água para outro que seria seu vizinho, desviando a direção do escoamento em relação à hidrografia usada como comparação. Estes indicadores podem não ser conclusivos, porém se analisados de forma conjunta, podem fornecer resultados comparativos sobre a qualidade dos MDEs.

4.4.2. Avaliação das áreas divergentes

Após as sobreposição dos mapas, foram analisados, com auxílio do aplicativo computacional *ArcGIS*[®], as alterações para cada delimitação por meio do cálculo das áreas divergentes, ou seja, o quanto de acréscimo e

decrécimo, em relação à área de delimitação de referência, sendo consideradas como áreas externas e internas, respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DELIMITAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

São apresentados, na Figura 8, a título de exemplo, o MDE *ASTER* original (sem refinamento) e, na Figura 9, um exemplo de MDE com aplicação da metodologia *Agree* (refinamento), onde visualiza-se ao lado a diferença entre os perfis topográficos.

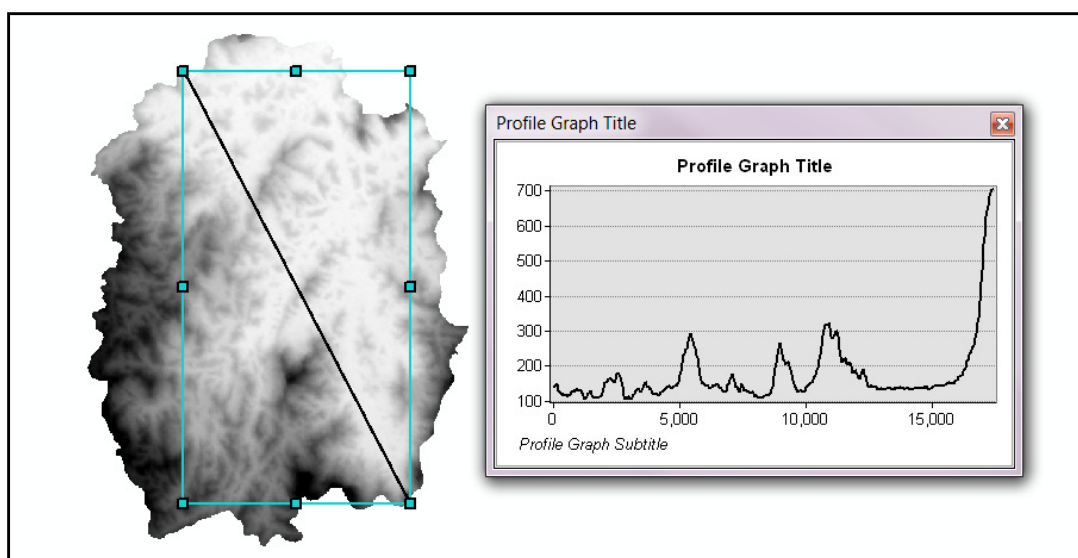


Figura 8. MDE original com respectivo perfil topográfico. (Fonte: Autor)

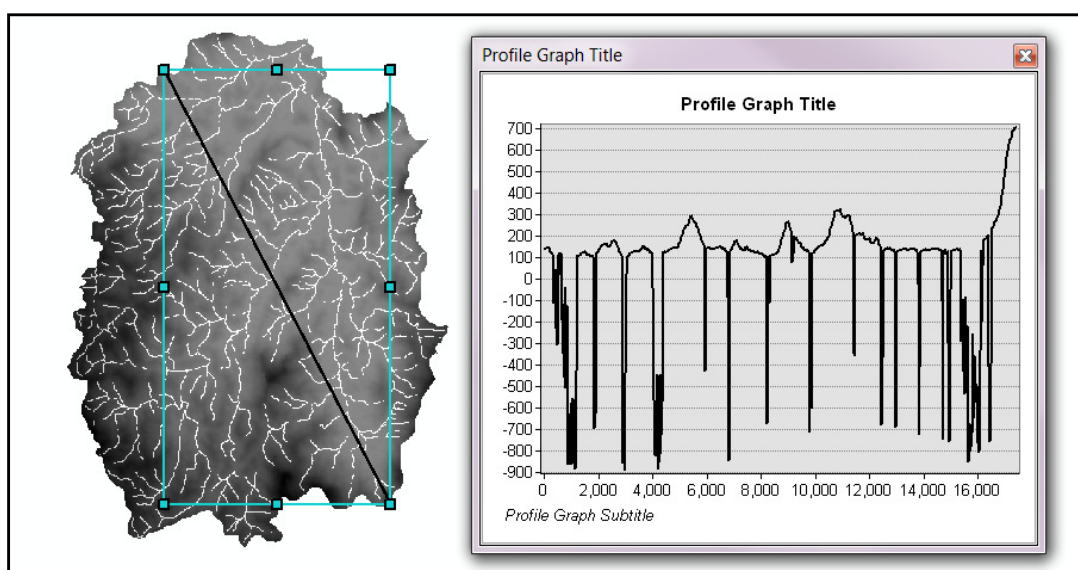


Figura 9. MDE refinado com respectivo perfil topográfico. (Fonte: Autor)

Evidencia-se, na Figura 9, a imposição do traçado da HR no MDE original, onde as cotas de fundo do leito dos cursos d'água encontram-se rebaixadas aproximadamente em 1.000 m, em relação ao MDE original (Figura 8). Este modelo de terreno resultante pode não estar de acordo com a realidade topológica do terreno, mas tem propriedades que podem torná-lo mais útil que o original, dependendo do objetivo de seu uso. Por exemplo, no caso de utilização para a delimitação de bacias hidrográficas, o MDE refinado tende a apresentar melhor desempenho devido à sua maior consistência hidrológica, desde que o mapa hidrográfico seja melhor que o MDE criado.

5.1.1. Comparação altimétrica entre MDEs

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados resultados de altitudes mínimas, médias e máximas para os MDEs com e sem refinamento, podendo-se notar a diferença entre as altitudes analisadas. Nota-se, também, as diferenças entre as altitudes máximas, médias e mínimas do MDE_A e MDE_T, em relação ao MDE_I. A grande amplitude demonstrada na Tabela 2 é devida à aplicação do *Agree*, onde aprofundou-se em 1.000 m a altitude inferior na qual se deseja localizar a hidrografia.

Tabela 1. Variação das altitudes para MDEs originais

| MDEs originais | Altitudes (m) | | Amplitude (m) |
|------------------|---------------|--------|---------------|
| | Máxima | Mínima | |
| MDE _A | 974,00 | 78,00 | 896,00 |
| MDE _I | 966,00 | 95,26 | 870,74 |
| MDE _T | 1.012,95 | 96,81 | 916,14 |

Tabela 2. Variação das altitudes para MDEs refinados

| MDEs <i>Agree</i> | Altitudes (m) | | Amplitude (m) |
|-------------------|---------------|---------|---------------|
| | Máxima | Mínima | |
| MDE _{Ar} | 972,00 | -926,00 | 1.898,00 |
| MDE _{Ir} | 946,18 | -915,00 | 1.861,18 |
| MDE _{Tr} | 1.012,95 | -909,00 | 1.921,95 |

5.1.2. Avaliação visual

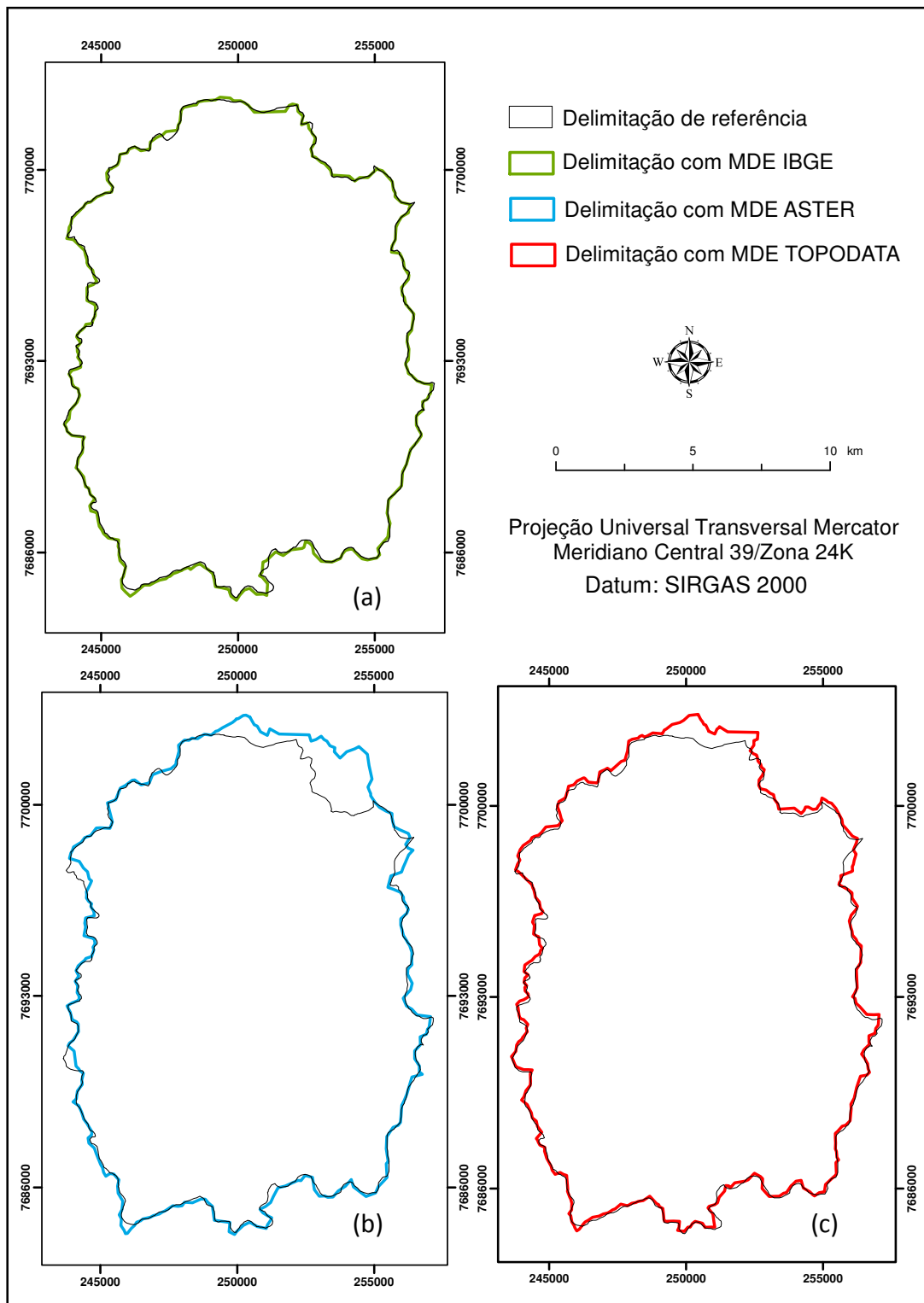


Figura 10. Sobreposições das delimitações obtidas para os MDEs IBGE (a), *ASTER* (b) e *Topodata* (c), sem refinamento, com a referência. (Fonte: Autor)

Nas Figuras 10 e 11 são apresentadas as sobreposições das delimitações obtidas para cada MDE, tanto originais como refinados, respectivamente, e a delimitação de referência.

Nota-se, que nas delimitações realizadas utilizando-se MDEs sem refinamento (Figura 10), a derivada do MDE_I foi a que mais se aproximou da delimitação de referência. Tal resultado provavelmente se deve ao fato desse MDE ter sido elaborado a partir da mesma base de dados, sendo CN, HR e PC utilizada na delimitação de referência e, também, à eficiência do interpolador utilizado (TR), pois este, em seu processamento, já havia forçado a HR. Resultados encontrados por Chaves (2002), Nogueira e Amaral (2009) e Saito (2011), identificaram este interpolador como mais eficiente.

A base de dados IBGE não está disponível para todo o território nacional nessa qualidade de CN de 20 m de equidistância vertical, e ainda, onde há disponibilidade, é necessário que as cartas sejam digitalizadas, tornando o trabalho oneroso. Portanto, é relevante a comparação da delimitação entre os outros dois MDEs ($ASTER$ e $Topodata$). A delimitação realizada pelo MDE_T proporcionou melhor resultado que pelo MDE_A , pois acrescentou uma área menor em relação à delimitação de referência, provavelmente, devido ao fato deste MDE_T ser um subproduto do refinamento do MDE SRTM (Figura 10).

Os MDEs gerados a partir de imagens estereoscópicas de sensores óticos orbitais, conforme Subramanian et al., (2005), apresentam vantagens como a disponibilidade de dados em nível mundial, resolução moderadamente elevada, o processamento mais rápido através de softwares, pouco esforço manual e baixo custo de processamento. Porém, apresentam também algumas desvantagens, pois contém as elevações com erros significativos, o qual se destaca a limitação inerente dos instrumentos de observação a características da superfície do terreno (rugosidade e declividade).

Relativo à delimitação de bacias, os resultados encontrados por Mantelli et al. (2011) mostraram que o uso do MDE_T ao MDE_A fornece dados importantes para a análise ecológica e informação adicional significativa para a tomada de decisão, o que vai de encontro com Santos e Linhares (2012), que descreveu que o MDE_A , em relação ao MDE_T , oferece um refinamento espacial que pode ser interessante aos estudos de modelagem.

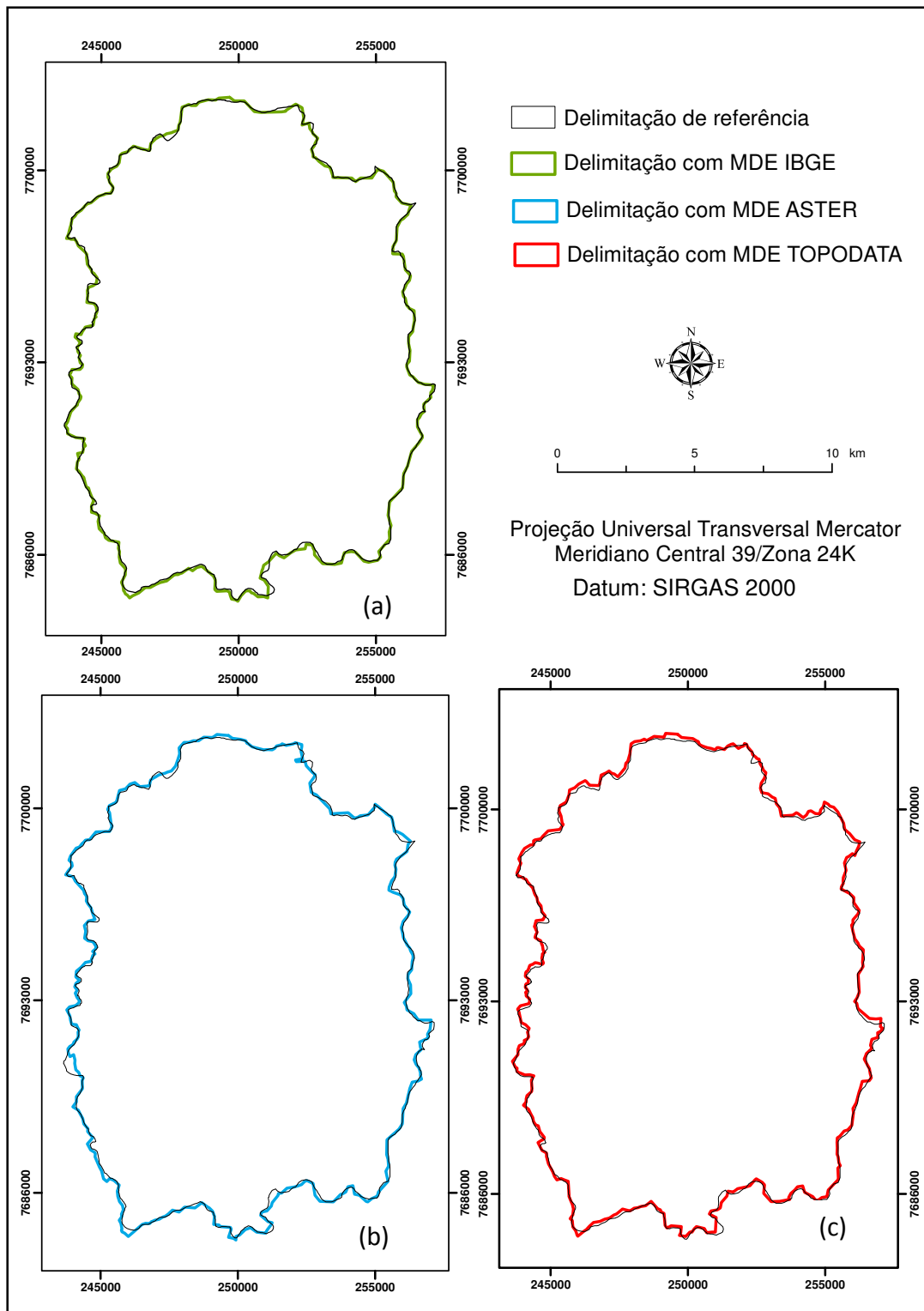


Figura 11. Sobreposições das delimitações obtidas para os MDEs IBGE (a), ASTER (b) e Topodata (c), ambos refinados, com a referência. (Fonte: Autor)

Entre as delimitações refinadas (Figura 11), verifica-se que a delimitação que mais se aproximou da referência foi a derivada do MDE_{lr}. Esse resultado provavelmente se deve aos mesmos fatores citados para o respectivo

MDE bruto. Nesse caso, a delimitação pelo MDE_{Ar} obteve melhor resultado que pelo MDE_{Tr}, pois acrescentou menor área na delimitação de referência, o que indica a grande influência do refinamento pela hidrografia nestes modelos.

Na Tabela 3 observa-se que todas as seis delimitações apresentaram áreas superiores à de referência, já para os perímetros, somente as duas delimitações realizadas pelos MDEs *Topodata* foram superiores. A diferença na área indica o quanto maior ou menor ficou a área delimitada em relação à de referência, quantificando grandezas. Entretanto, a diferença do perímetro não desempenha papel importante na comparação, pois podem existir mesmos valores de área com vários valores de perímetro diferentes. Os valores de perímetro podem ser úteis quando analisados para cálculos das características fisiográficas de bacias.

É importante considerar que os erros são inevitáveis, visto que os MDEs são visões simplificadas da realidade, submetidas a um processo de generalização (CHAGAS, 2010).

Tabela 3. Valores de área e perímetro para as diferentes delimitações de bacias obtidas com diferentes MDEs.

| Delimitações | Área (km ²) | Perímetro (km) | Diferença na área (%) | Diferença no perímetro (%) |
|------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| Referência | 181,28 | 67,08 | - | - |
| MDE IBGE original | 181,99 | 64,91 | 0,39 | -3,23 |
| MDE IBGE refinado | 181,81 | 66,01 | 0,29 | -1,59 |
| MDE <i>ASTER</i> original | 188,62 | 66,74 | 4,05 | -0,51 |
| MDE <i>ASTER</i> refinado | 182,18 | 66,85 | 0,49 | -0,34 |
| MDE <i>Topodata</i> original | 184,68 | 67,42 | 1,88 | 0,51 |
| MDE <i>Topodata</i> refinado | 182,22 | 67,27 | 0,52 | 0,29 |

5.1.3. Avaliação das áreas divergentes

Nas Figuras 12 a 17 são apresentadas as sobreposições das delimitações para comparação entre áreas divergentes, sendo uma oriunda do MDE a ser analisado e a outra da delimitação de referência.

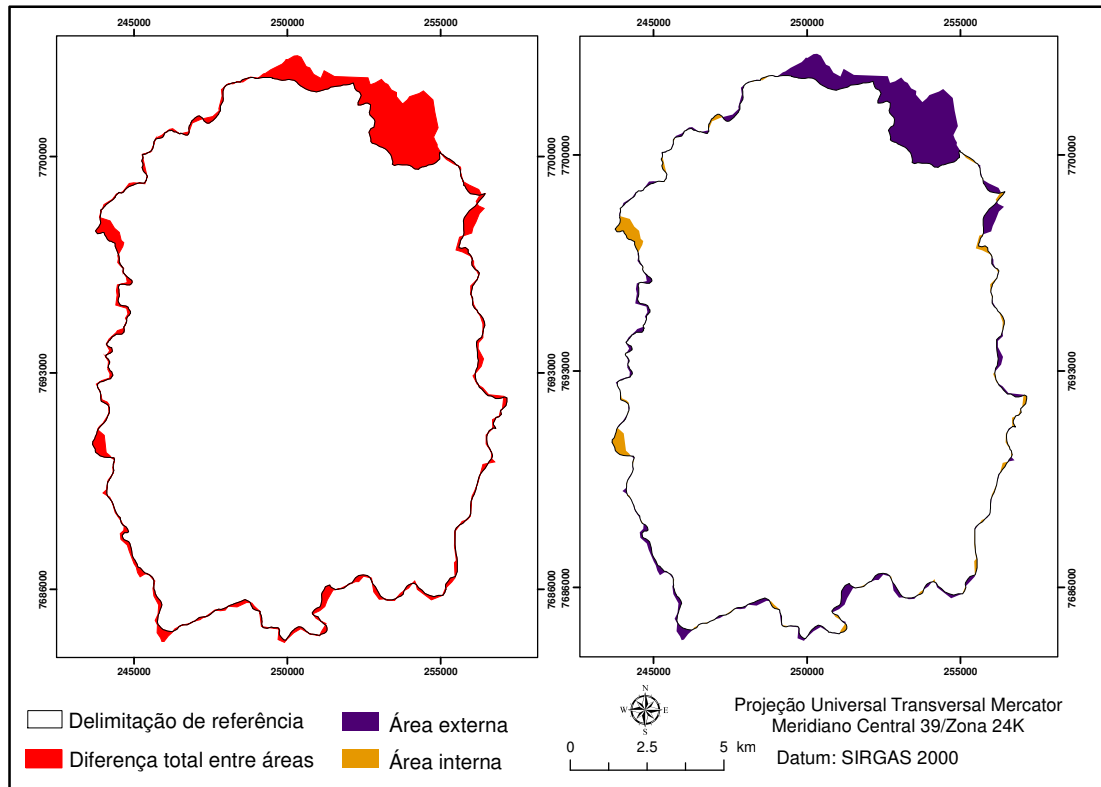


Figura 12. Identificação das áreas divergentes entre o MDE *ASTER* sem refinamento com a delimitação de referência, sendo discriminadas entre áreas internas e externas. (Fonte: Autor)

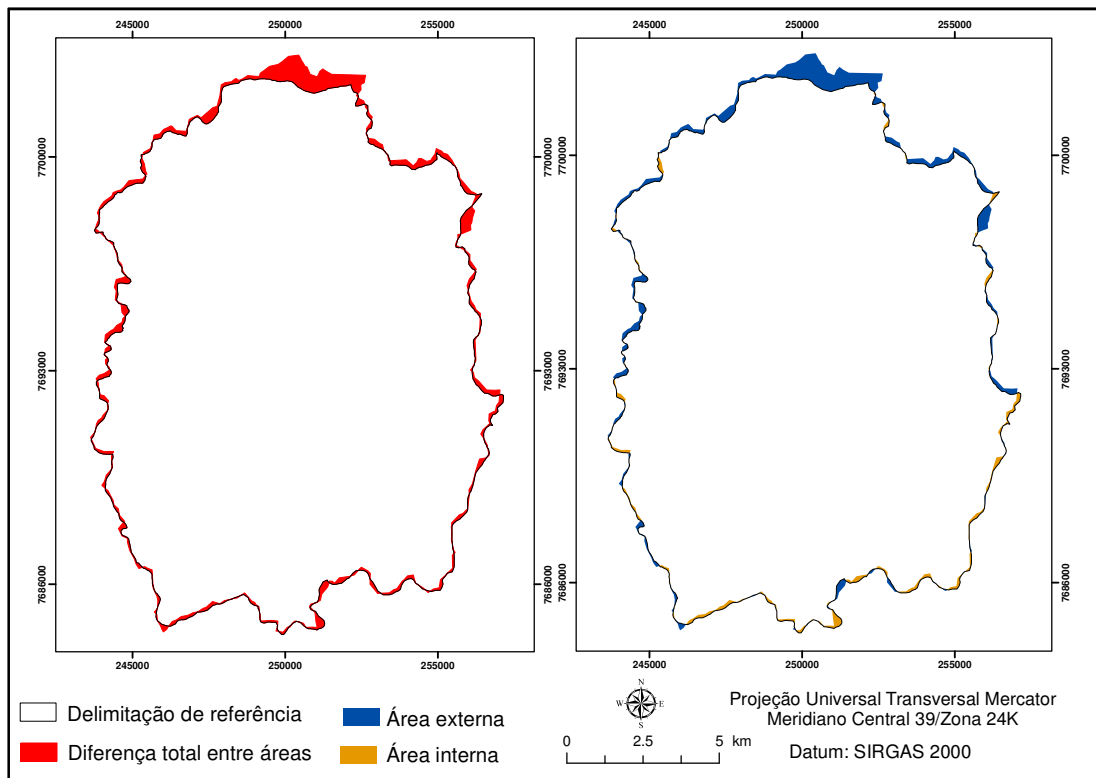


Figura 13. Identificação das áreas divergentes entre o MDE *Topodata* sem refinamento com a delimitação de referência, sendo discriminadas entre áreas internas e externas. (Fonte: Autor)

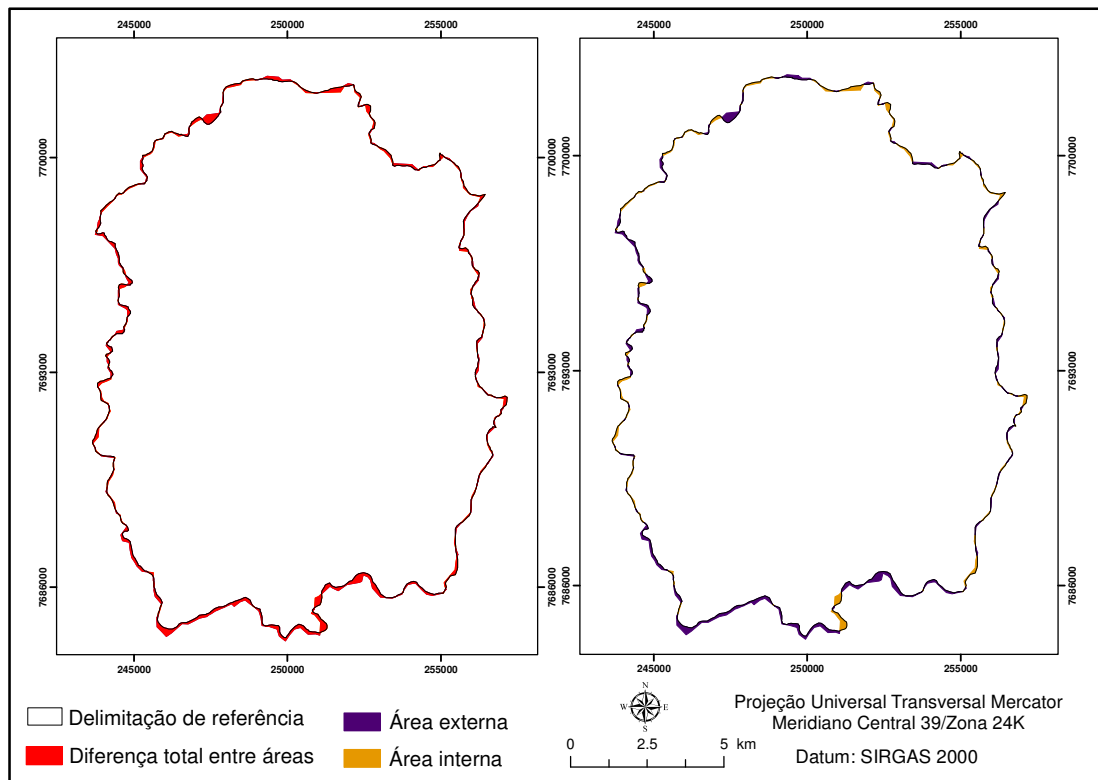


Figura 14. Identificação das áreas divergentes entre o MDE IBGE sem refinamento com a delimitação de referência, sendo discriminadas entre áreas internas e externas. (Fonte: Autor)

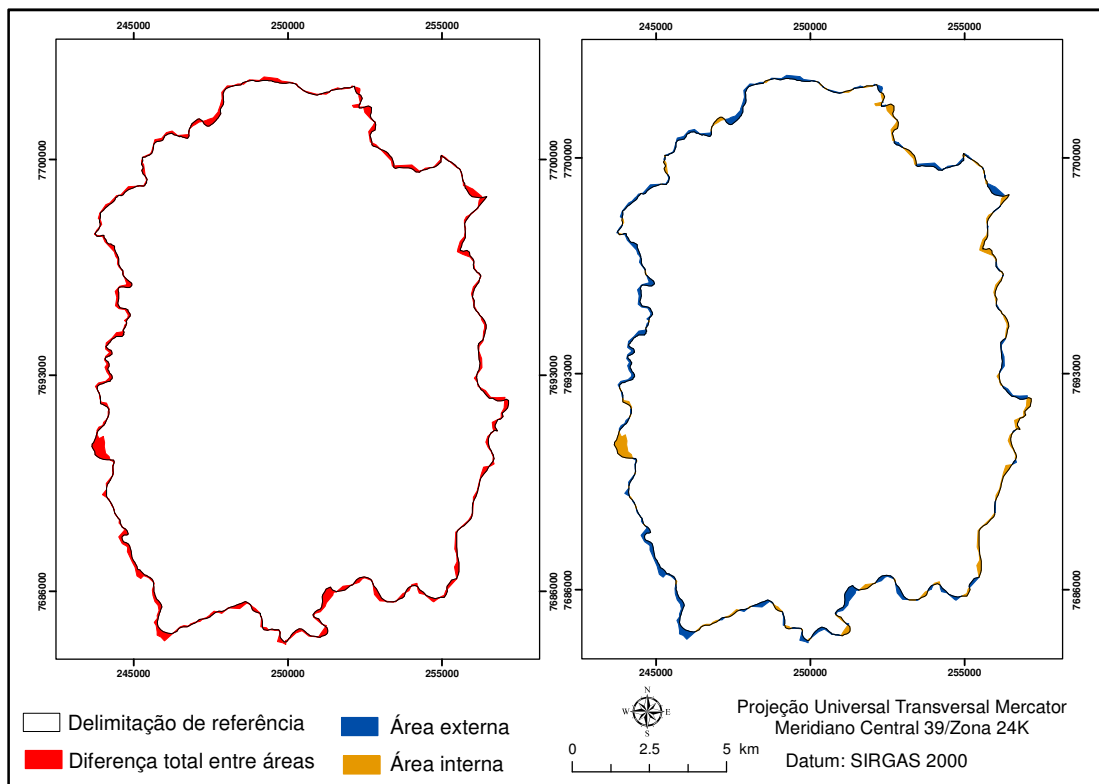


Figura 15. Identificação das áreas divergentes entre o MDE ASTER refinado com a delimitação de referência, sendo discriminadas entre áreas internas e externas. (Fonte: Autor)

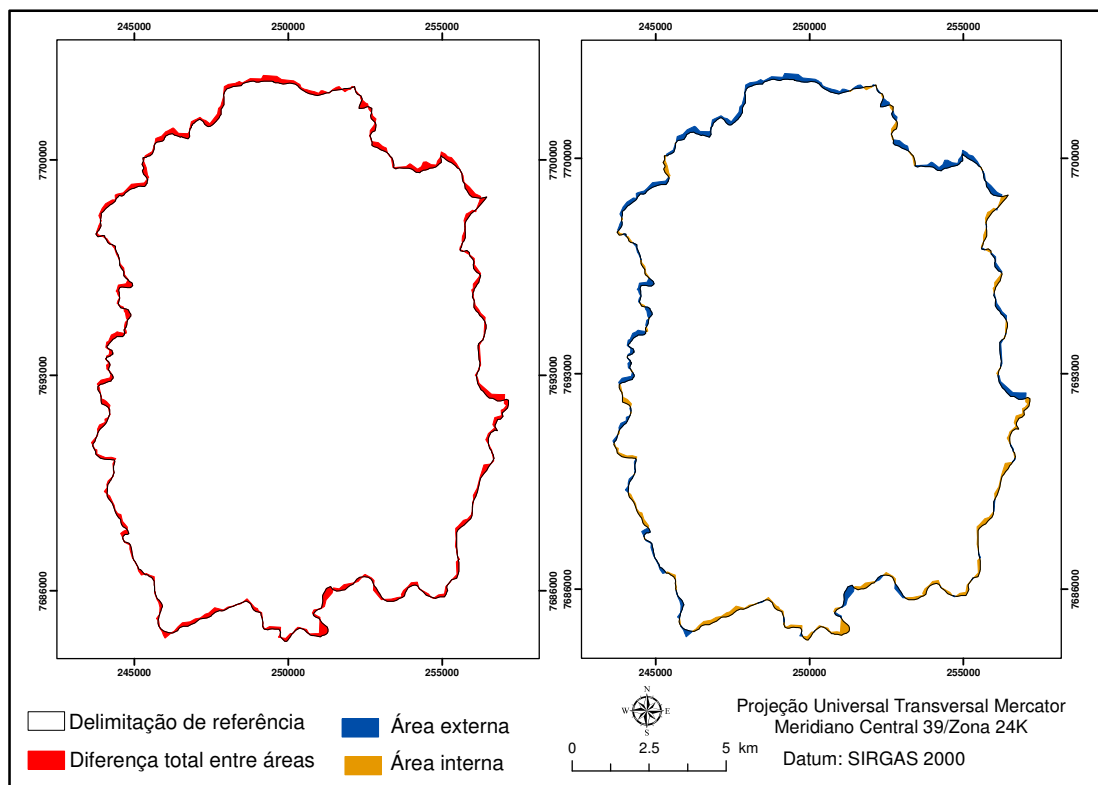


Figura 16. Identificação das áreas divergentes entre o MDE *Topodata* refinado com a delimitação de referência, sendo discriminadas entre áreas internas e externas. (Fonte: Autor)

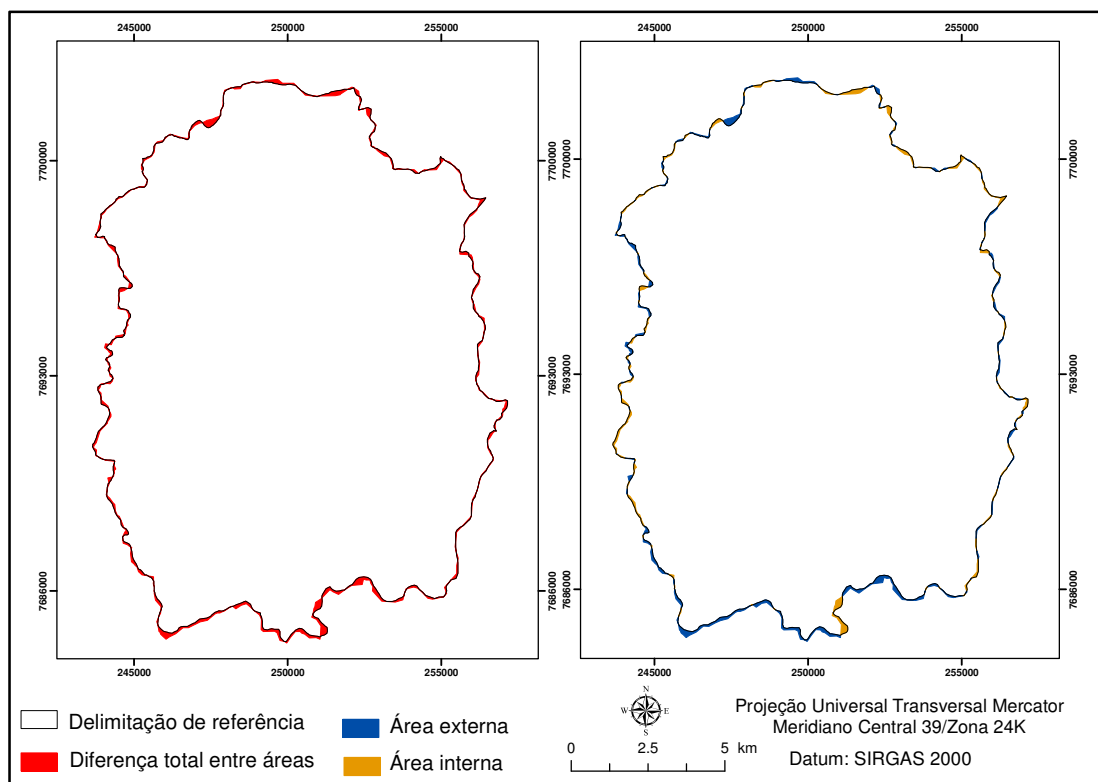


Figura 17. Identificação das áreas divergentes entre o MDE IBGE refinado com a delimitação de referência, sendo discriminadas entre áreas internas e externas. (Fonte: Autor)

Observa-se que as áreas divergentes foram separadas em áreas internas e externas em relação à de referência, as quais são apresentadas para todas delimitações na Tabela 4. A partir dos resultados apresentados nesta tabela, pode-se confirmar o que foi analisado visualmente nas figuras anteriores, sendo as delimitações mais semelhantes à de referência, em ordem decrescente: MDE_{Ir} , MDE_I , MDE_{Ar} , MDE_{Tr} , MDE_T e o MDE_A . Também fica claro a melhoria da delimitação quando se usa o refinamento.

Tabela 4. Áreas internas e externas das delimitações de bacias em relação à delimitação de referência, usando diferentes MDEs.

| Delimitações | Área total (km ²) | Área da referência (%) | | Total (%) |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------|---------|-----------|
| | | Interna | Externa | |
| Referência | 181,28 | - | - | - |
| MDE IBGE original | 181,99 | 0,91 | 0,52 | 1,43 |
| MDE IBGE refinado | 181,81 | 0,54 | 0,83 | 1,37 |
| MDE <i>ASTER</i> original | 188,62 | 4,80 | 0,75 | 5,55 |
| MDE <i>ASTER</i> refinado | 182,18 | 0,73 | 1,22 | 1,95 |
| MDE <i>Topodata</i> original | 184,68 | 0,79 | 2,66 | 3,45 |
| MDE <i>Topodata</i> refinado | 182,22 | 0,88 | 1,39 | 2,27 |

Observa-se que, entre as delimitações advindas do MDE_A e MDE_T , quando se analisa a utilização do refinamento com a HR do IBGE na escala de 1:50.000, o MDE_{Ar} apresenta resultados mais próximos da referência que o MDE_{Tr} ; porém, quando analisado sem o refinamento citado, o MDE_T apresenta maior semelhança na comparação das delimitações.

5.2. COMPARAÇÃO ENTRE HIDROGRAFIAS NUMÉRICAS

Nas HNs obtidas com os MDEs sem refinamento, elaboradas com o MDE_A e MDE_T , notam-se vários locais onde os cursos d'água alteram sua direção, passando a fazer parte de outro curso, como observado na Figura 18. Este fato pode alterar os locais dos divisores de água, podendo também alterar os limites da delimitação de bacias interiores à de estudo.

Na Figura 19 nota-se uma alta semelhança entre as hidrografias analisadas, se comparadas com as HNs criadas através dos MDEs originais,

devido principalmente ao refinamento utilizado ter como método principal o *Agree*, que força a HN a passar pela HR do IBGE.

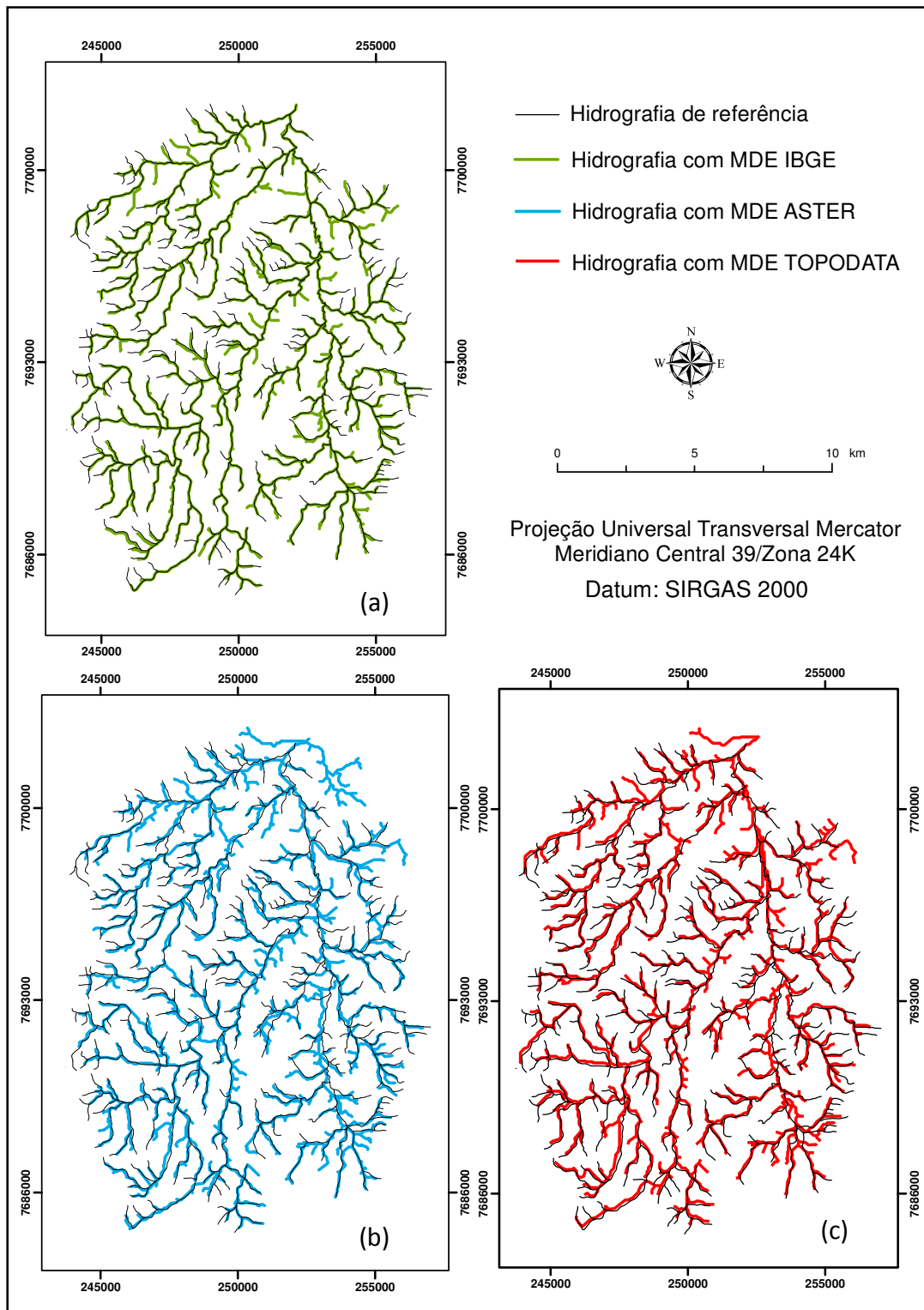


Figura 18. Sobreposições das HNs obtidas para os MDEs IBGE (a), *ASTER* (b) e *Topodata* (c), ambos sem refinamento, com a HR. (Fonte: Autor)

Após a análise visual das sobreposições das hidrografias originais e com refinamento, como já era esperado, percebe-se que é maior a semelhança dos traçados da HR com a HN dos MDEs refinados.

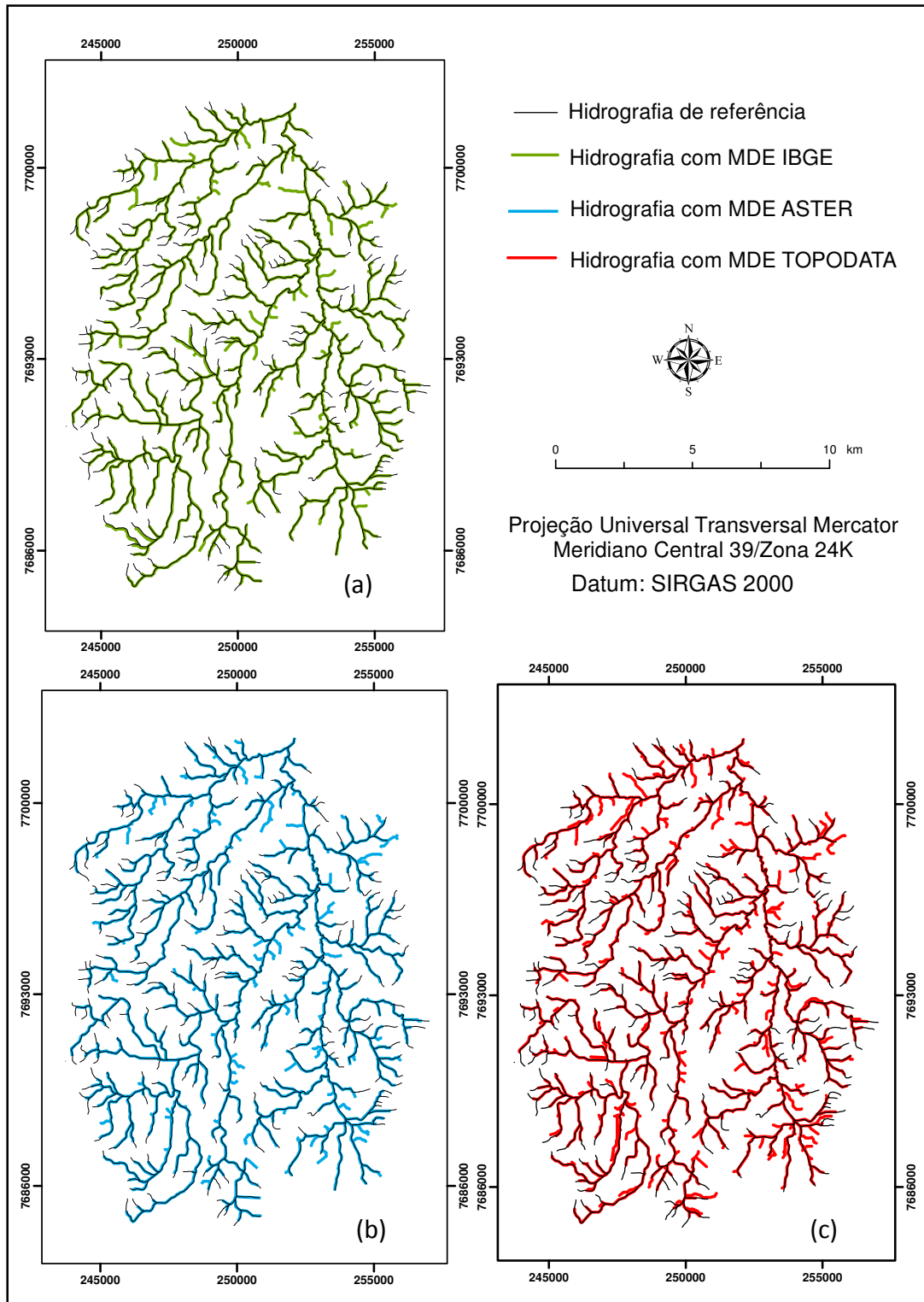


Figura 19. Sobreposições das HNs obtidas para os MDEs IBGE (a), ASTER (b) e *Topodata* (c), ambos refinados, com a HR. (Fonte: Autor)

Não foram identificadas alternâncias nos caminhos preferenciais de escoamento entre as hidrografias analisadas, demonstrando a eficiência da metodologia automática utilizada. De acordo com Pires et al. (2005), as comparações da HN, derivada dos MDEs, com a hidrografia mapeada indicam que os modelos necessitam de procedimentos de pré e pós-processamento para alcançar um nível de exatidão e consistência hidrológica aceitável.

Para posteriores comparações das HNs com a de referência, utilizou-se apenas os MDEs sem refinamento, devido ao fato de que o refinamento influencia diretamente nas HNs, deixando-as praticamente idênticas às de referência.

Nas Figuras 20 e 21, são apresentados exemplos dos erros relevantes nas HNs encontrados nos MDEs *ASTER* e *Topodata*, respectivamente, onde observa-se a alteração no sentido dos cursos d'água, ocasionando a interrupção do escoamento para certas áreas e, conseqüentemente, seu deslocamento para áreas vizinhas.

A extração de drenagem baseada no processamento do MDE_A, comparado ao MDE_T, parece ser mais suscetível a suavizar as variações topográficas e áreas de baixada e, desta forma, produzir erros, os quais podem gerar muitos vetores de drenagem inexistentes (MANTELLI et al., 2011).

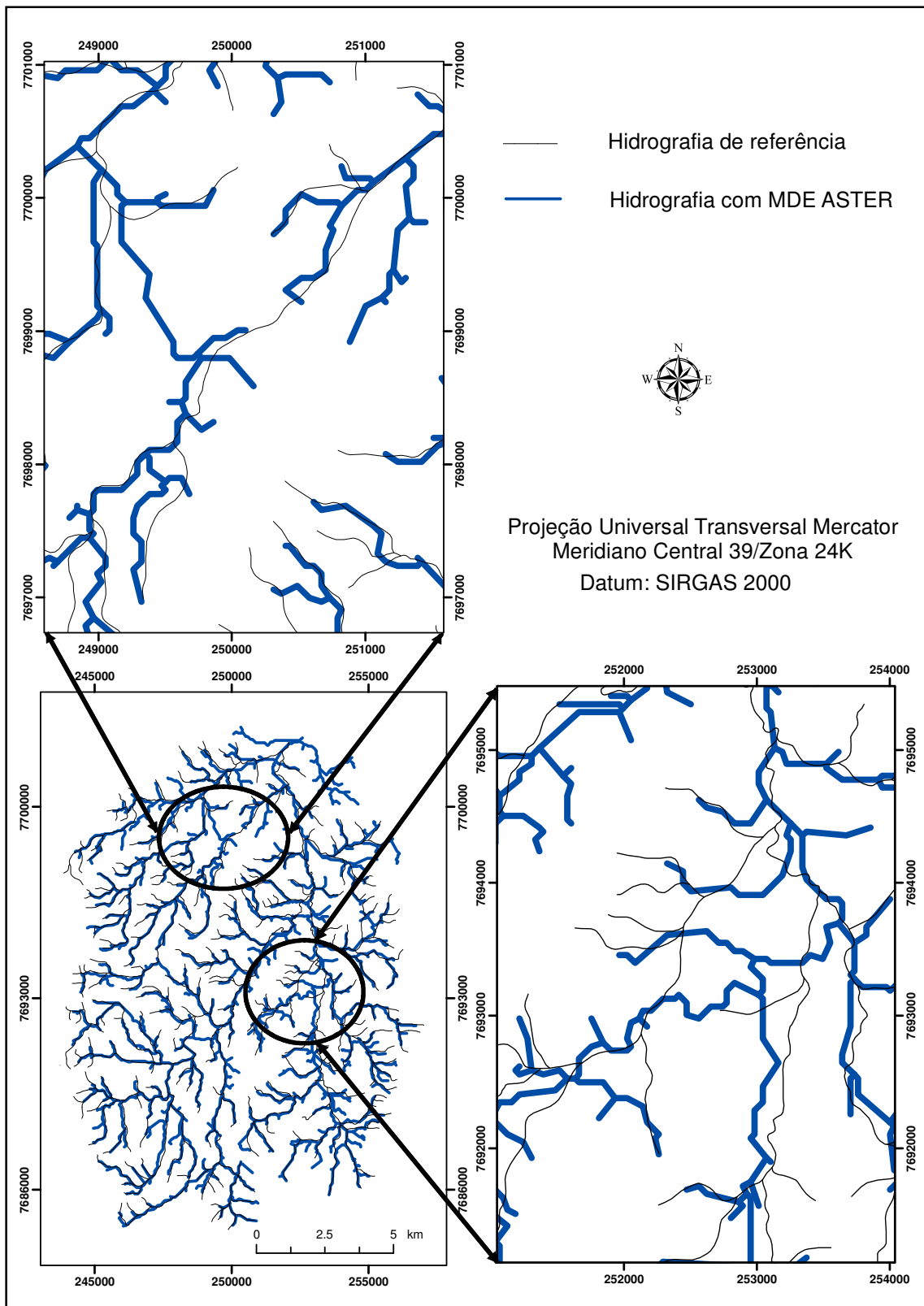


Figura 20. Exemplos de erros relevantes na HN obtida para o MDE_A (sem refinamento) em relação a referência. (Fonte: Autor)

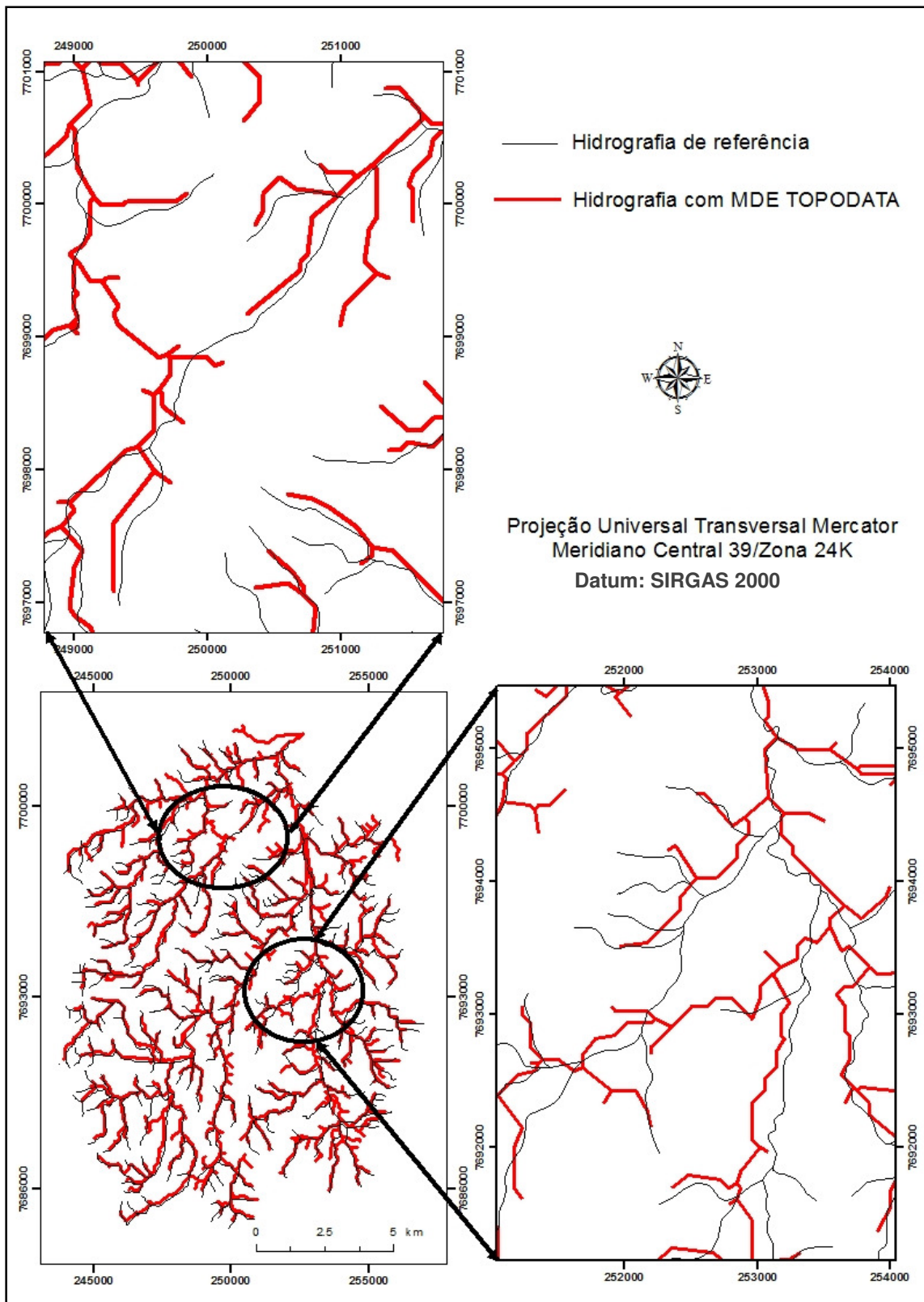


Figura 21. Exemplos de erros relevantes na HN obtida para o MDE_T (sem refinamento) em relação a referência. (Fonte: Autor)

Na Figura 22, são apresentadas as indicações dos erros da HN dos MDEs estudados, sem refinamento. No MDE_I não identificou-se erros

relevantes (Figura 22 a), o que pode ser explicado pela melhor consistência hidrológica, devido a eficiência do algoritmo de interpolação (TR) utilizado (PIRES et al., 2005). No caso deste estudo, esta eficiência também pode ser explicada pela utilização das CN, HR e o incremento dos PC. Estes PC localizam-se geralmente em topos dos morros e baixadas, que são locais de maior incidência de erros dos resultados dos interpoladores.

Em relação aos MDE_A , foram identificados e quantificados 12 erros relevantes e, no MDE_T , 6 erros. Tais resultados conferem maior consistência hidrológica para o MDE_T , onde não se usou a hidrografia mapeada para realizar o refinamento.

Mantelli et al. (2011), utilizando para comparação a rede de drenagem oficial do IBGE em escala 1:50.000, verificaram que os vetores gerados usando MDE_T são mais parecidos com os vetores da rede oficial de drenagem do que a rede de drenagem extraída usando MDE_A .

Marques et al. (2011) avaliou que, tendo como referência a drenagem de uma carta topográfica na escala de 1:100.000, o MDE_T (resolução espacial de 30 m), em relação ao MDE_A (resolução espacial de 20 m), apresenta maior similaridade com a drenagem da carta topográfica e maior detalhamento dos cursos d'água. Já, Pereira et al. (2012), apontou que o MDE_A (resolução espacial de 30 m), com referência a uma carta topográfica na escala de 1:80.000, obteve maior similaridade na rede hidrográfica que o MDE_T com a mesma resolução espacial.

A escala de 1:50.000 é a menor liberada pelo IBGE para a região em estudo e, também, é indicada no Manual técnico de uso da terra (IBGE,2006), para fins de mapeamentos de reconhecimento, que abrange o planejamento regional e de bacias hidrográficas. Porém, indicam escalas acima deste valor para problemas específicos e decisões localizadas, restringindo-se a pequenas áreas.

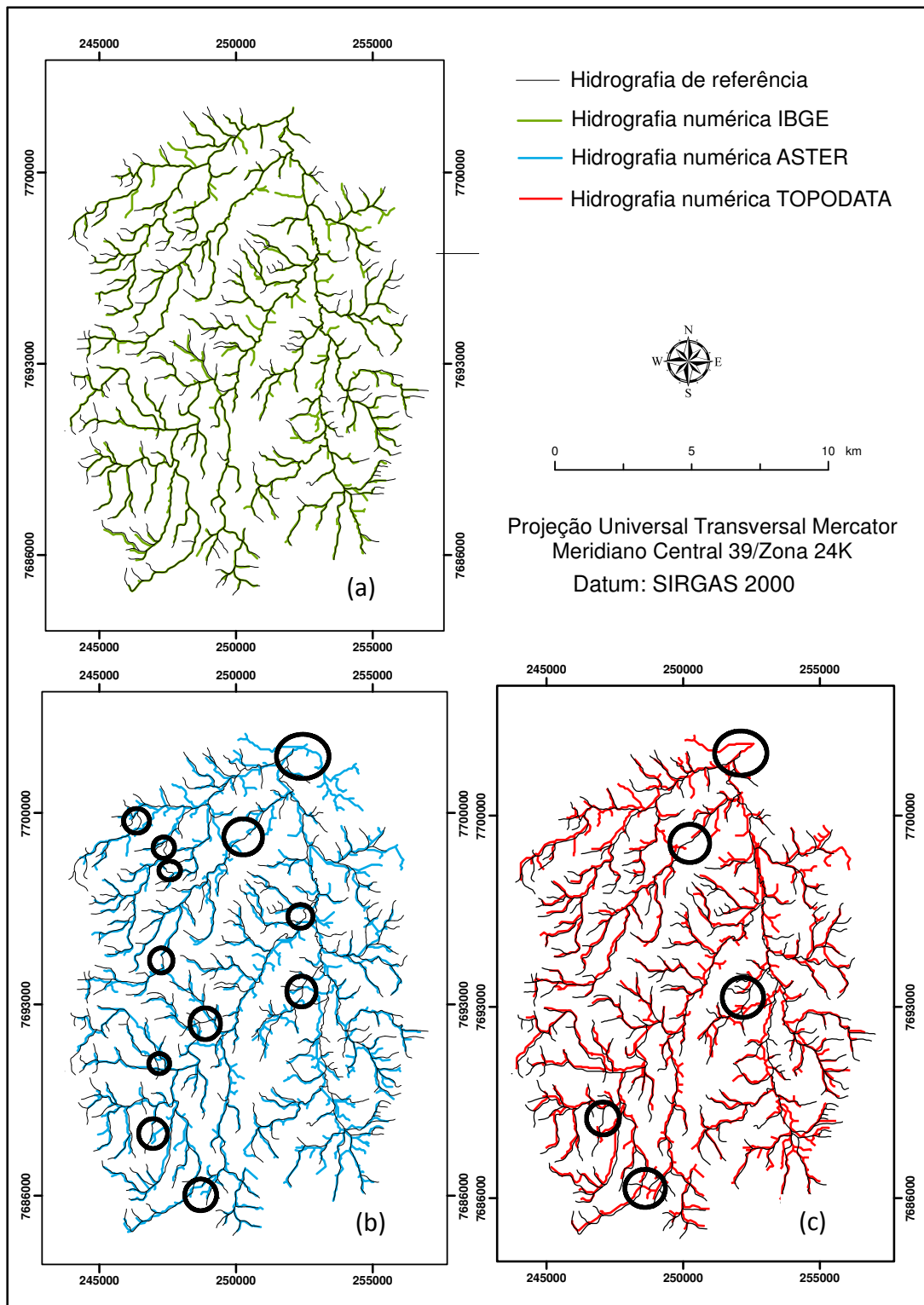


Figura 22. Identificação dos erros das HNs obtida para os MDEs IBGE (a), ASTER (b) e *Topodata* (c) ambas sem refinamento, em relação a HR. (Fonte: Autor)

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE DIVISÕES DA SBHVS

Os erros constatados dos MDEs estudados, sem refinamento, nas HNs (Figura 22), ficaram mais evidentes na divisão destas delimitações pois, devido as alterações no percurso dos rios, houve mudanças nos limites das bacias, alterando a área e os locais de exutório para bacias em seu interior, como pode ser observado na Figura 23.

Os erros nas delimitações dos MDEs onde houve alteração do sentido do escoamento ocorreram em áreas de baixa declividade, tanto para o MDE_A como para o MDE_T. Estas alterações podem ser explicadas pelo fato de ocorrerem em terrenos onde a conformação topográfica é "plana", com pouca variação de altitude, gerando dificuldade na representação do relevo.

Marques et al. (2011), avaliando o MDE_A (resolução espacial de 20 m), em relação ao MDE_T (resolução espacial de 30 m), tendo como referência a drenagem obtida de uma carta topográfica na escala de 1:100.000, obteve significativa perda de pequenas drenagens, não proporcionando a distinção adequada de certas bacias.

Miceli et al. (2011) identificou que, em relação à declividade, o MDE_T apresenta melhores resultados para regiões de relevo acidentado (forte ondulado e montanhoso), e o MDE_A em relevos suave ondulado e ondulado. Em termos de tolerância vertical na escala 1.50.000, o referido autor conclui que o MDE_T foi superior ao MDE_A. Resultados semelhantes foram apresentados por Landau e Guimarães (2011), onde relataram que considerando locais com relevo acidentado, o MDE_T (30 m) obteve melhores resultados que o MDE_A (30 m); porém, apresenta limitações relacionadas com a delimitação de áreas costeiras e identificação de variações do relevo em áreas pouco onduladas.

Demonstra-se na Figura 24 a delimitação de BHs no interior da SBHVS utilizando os MDEs refinados, onde notam-se pequenas diferenças em seus limites; porém, não provocaram alterações nos locais de escoamento dos cursos d'água e, conseqüentemente, na formação ou exclusão de BHs escolhidas para análise. Tal comportamento se deve também, nas divisões da SBHVS, ao fato da utilização da mesma HR nos MDEs analisados e na delimitação de referência.

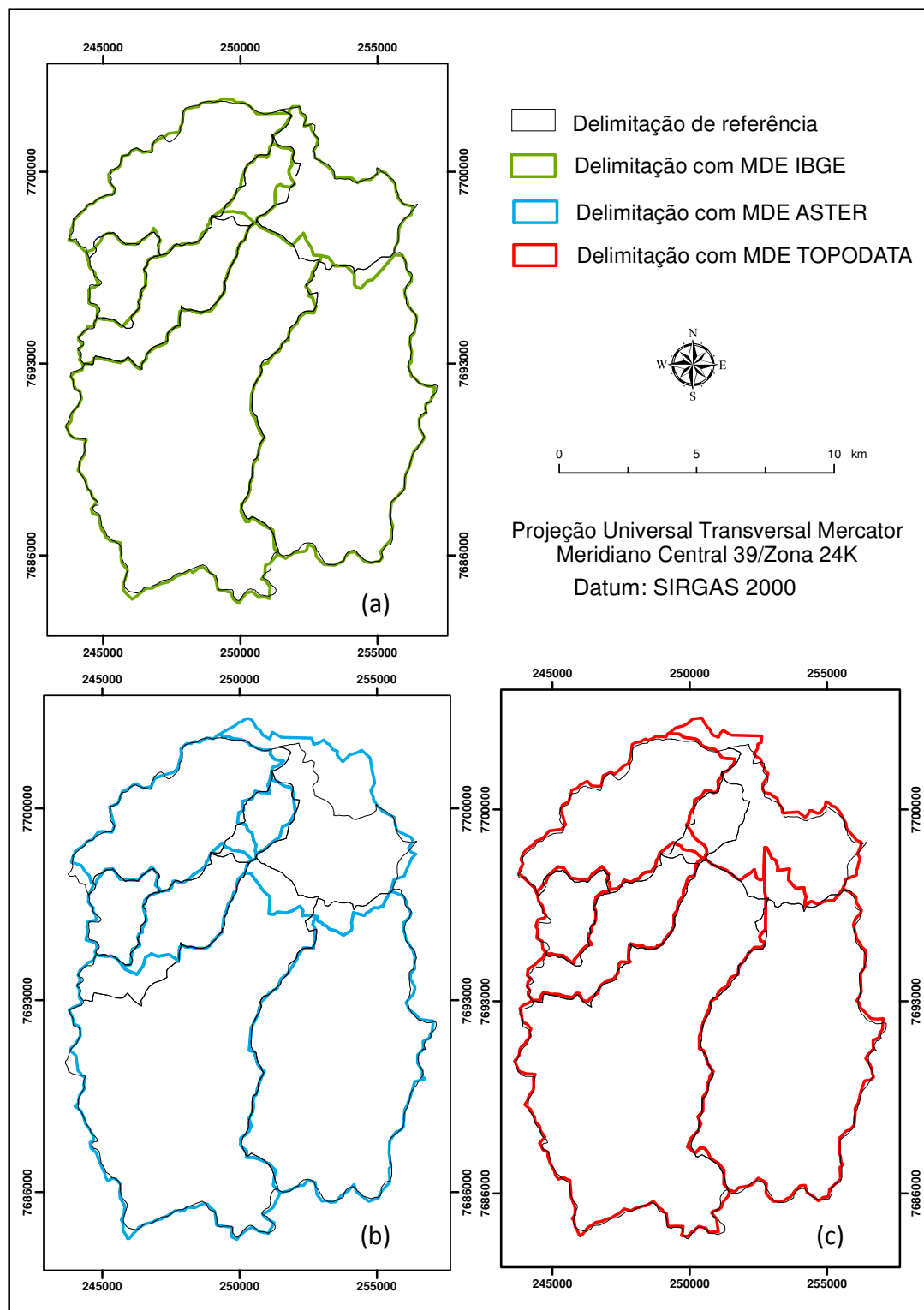


Figura 23. Sobreposições das divisões da sub-bacia obtida para os MDEs IBGE (a), ASTER (b) e Topodata (c), todos sem refinamento, com a delimitação de referência. (Fonte: Autor)

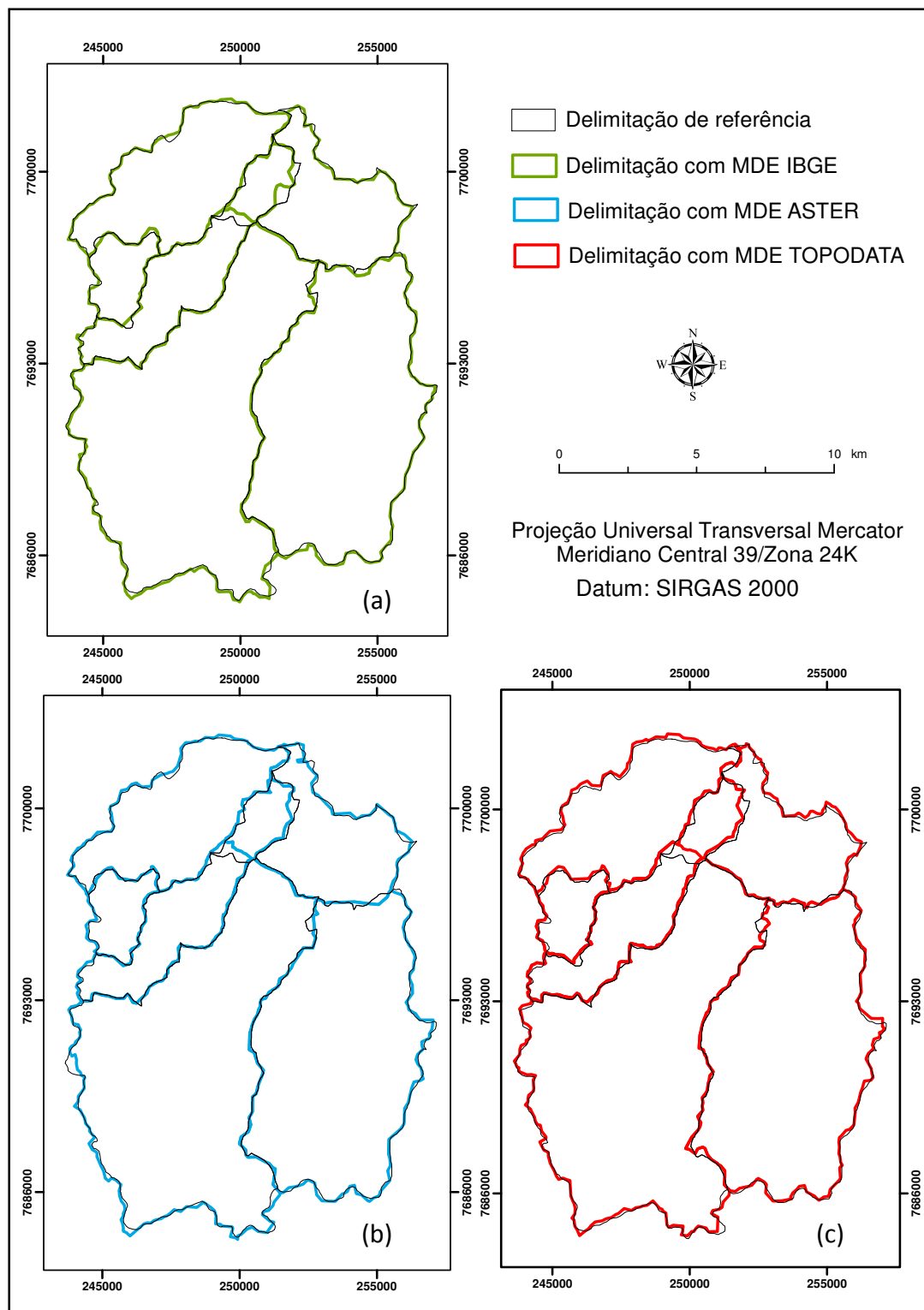


Figura 24. Sobreposições das sub-delimitações obtidas para os MDEs IBGE(a), *ASTER* (b) e *Topodata* (c), sendo todos com refinamento, com a delimitação de referência. (Fonte: Autor)

6. CONCLUSÕES

Levando-se em consideração as condições utilizadas nesta pesquisa, pode-se concluir que:

Constatou-se a eficiência do refinamento realizado nos MDEs, utilizando a metodologia *Agree*, para fins de melhoria da consistência hidrológica.

Considerando como referência a delimitação manual usando a carta topográfica do IBGE, a melhor delimitação de bacia foi obtida utilizando-se o "MDE IBGE com refinamento", empregando o método *Agree*, seguidas em ordem decrescente pelas delimitações oriundas do MDE_I, MDE_{Ar}, MDE_{Tr}, MDE_T, e MDE_A, o que indica a eficácia do procedimento de refinamento realizado.

Analisando os MDEs *Topodata* e *ASTER* originais, a delimitação pelo MDE_T apresentou melhor desempenho que pelo MDE_A; porém, nota-se que com os MDEs refinados, a delimitação pelo MDE_{Ar} proporcionou melhor representação que pelo MDE_{Tr}.

A consistência hidrológica relativa às alterações na delimitação de bacias pode ser melhor evidenciada quando analisada em bacias menores, localizadas no interior da SBHVS.

Diversas comparações foram realizadas no presente estudo, adotando como referência a base de dados do IBGE. Entretanto, tais dados podem não corresponder com a realidade topográfica e hidrográfica atual da região (verdade de campo). Assim, pode-se considerar que a situação ideal para as comparações realizadas entre as delimitações de bacias hidrográficas, seria utilizar como referência o mapeamento (levantamento em campo) real da área em estudo.

7. REFERÊNCIAS

AGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 2005. Disponível em <http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/agenda21.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2013.

ASTER. ASTER GDEM. Disponível em: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/> Acesso: em 13 dez. 2012.

BARROS, R. F. **Avaliação da altimetria de modelos digitais de elevação obtidos a partir de sensores orbitais**. 2006. 195 f. Dissertação (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional dos Recursos Hídricos**, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art.1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 11 set. 2011.

BRASIL. Decreto n.º 5.334, de 6 de janeiro de 2005. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2005. Disponível: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Decreto/D5334.htm. Acesso em: 11 set. 2012.

CECÍLIO, R. A.; COUTINHO, L. M.; ZANETTI, S. S. Delimitação de bacias hidrográficas. In: ANDRADE, F. V.; PASSOS, R. R.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, J. S. S.; FERREIRA, A. (Org.). **Tópicos especiais em produção vegetal II**. Alegre: Centro de Ciências Agrárias, 2011, v.1, p. 329-348.

CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. C.; NETO, N. C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.2, p.218–226, 2010.

CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. 2002. 113 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

COUTINHO, L. M. **Impacto das Áreas de Preservação Permanente sobre a erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio da Prata, Castelo-ES**. 2010, 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). - Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010.

ESPÍRITO SANTO. Lei nº 5,818, de 29 de dezembro de 1998. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gerenciamento e Monitoramento dos Recursos Hídricos, do Estado do Espírito

Santo - SIGERH/ES. **Departamento de imprensa oficial do Estado do Espírito Santo**. Vitória, ES, 30 dez. 1998.

ESPÍRITO SANTO. Lei nº 9.768, de 26 de dezembro de 2011. Dispõe sobre a definição das Microrregiões e Macrorregiões de Planejamento no Estado do Espírito Santo. **Departamento de imprensa oficial do Estado do Espírito Santo**. Vitória, ES, 28 dez. 2011.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS® – Tutorials**. Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>. Acesso em 30 Jul. 2012.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS® 10.1: Getting started with ArcGIS**. Redlands: ESRI, 2013.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; KAYSER, R. **Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico: Manual de introdução às ferramentas do Archydro**. Versão 2,1, 74p. 2011.

FERNANDES, M. R.; SOUZA, L. L. M. **Parâmetros básicos de bacias hidrográficas - Inferências**. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/d_d_d_1850.pdf. Acesso: em 13. jul.2013.

FERREIRA, C. C. M. **Zoneamento agroclimático para implantação de sistemas agroflorestais com eucaliptos, em Minas Gerais**. Viçosa: UVF. 158p. 1997.

GEOBASES. **Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo**. 2002. INCAPER. Disponível em: <http://www.geobases.es.gov.br/portal/>. Acesso em: 07 dez. 2012.

GOLDENFUM, J. A., TUCCI, C. E. M. **Hidrologia de águas superficiais**. Brasília, DF: ABEAS. Viçosa, MG: UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 1996. 128p.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, 106, 211-232, 1989.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Resolução da Presidência do IBGE nº 01**, de 28 de fevereiro de 2005. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2005. 7p. Disponível: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/legislacao/RPR_01_25f_ev2005.pdf. Acesso em: 07 dez. 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Manual técnico de uso da Terra**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/manual_usodaterra.shtm. Acesso em: 07 fev. 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/sistematizacao/manual_pedologia.shtm. Acesso em: 07 fev. 2013.

INPE. TOPODATA. Banco de dados geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso: em 13 dez. 2012.

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. Análise comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM, e TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, **Anais...**[Curitiba]: INPE, 2011, p. 4003-4010.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: Esalq, 2008. 245p.

LUIZ, S.; SANTOS, A. R. S.; BRENNER, T. L. Geração de Modelo Digital de Elevação a partir de imagens Reference Stereo do satélite Ikonos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** [Florianópolis]: INPE, 2007. p. 581-587.

MANTELLI, L. R.; BARBOSA, J. M.; BITENCOURT, M. D. *Assessing ecological risk through automated drainage extraction and watershed, delineation*. **Journal Elsevier: Ecological Informatics**, 6, 325 - 331, 2011. Disponível em: <http://www.elsevier.com>. Acesso: em 19 jul. 2013

MARQUES, F. A.; SILVA, D. D. Obtenção pixel a pixel de variáveis morfométricas em SIG após tratamento de dados SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, **Anais...** [Florianópolis]: INPE, 2007, p. 3445-3452.

MARQUES, H. G.; PENATTI, N. C.; FILHO, A. C. P.; FROEHLICH, O.; ALMEIDA, T. I. R.; SHIMABUKURO, Y. Comparação entre modelos de elevação SRTM, TOPODATA E ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, **Anais...** [Curitiba]: INPE, 2011, p. 1271-1278.

MENDES FILHO, W. M.; VENDRAME I. F.; CARVALHO, R. G. *Utilização de sistema de informações geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis, **Anais...** [Florianópolis]: 2007. p. 3453-3460.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**. n.63/01,191-201, 2011.

MIRANDA, W. A.; MELO, A. A. M.; FIGUEIREDO, F. P.; OLIVEIRA, F. G. A importância do uso do SIG e da análise morfométrica para o plano de manejo

em unidades de conservação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, **Anais...** [Curitiba]: INPE, 2011, p. 1525-1531.

MOREIRA, M. C. **Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água.** 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

NOGUEIRA, J. D. de L.; AMARAL, R. F. do. Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** [São José dos Campos]: INPE, 2009: Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/biblioteca/>>. Acesso em: 18 out. 2012.

PEREIRA, L. E.; OLIVEIRA, J. R. S.; ENCINA, C. C. C.; MIRANDA, V. R.; FILHO, A. C. P. Uso de software livre e proprietário na extração automática de rede de drenagem a partir de diferentes MDE. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 4., 2012, Bonito, **Anais...** [Bonito]: INPE, 2012, p. 1173 -1180.

PIRES, J. M.; NASCIMENTO, M. C.; SANTANA, R. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.2, p.39-47, 2005.

REDIVO, A. L.; GUIMARÃES, R. F.; RAMOS, V. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de; MARTINS, E. de S. **Comparação entre diferentes interpoladores na delimitação de bacias hidrográficas.** Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados, 2002.

RIBEIRO, C. A. A. S. **Modelos digitais hidrologicamente consistentes.** Apostila do Curso “Tópicos avançados em Sistema de Informação Geográfica”. Viçosa: DEF/UFV, 2002.

SAITO, N. S. **Modelos digitais de elevação na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre - Espírito Santo.** 2011, 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

SANTOS, L. B. L.; LINHARES, C. A. ArcGis, IDL-HAND e TerraHidro: avaliando eficácia e eficiência na delimitação de bacias hidrográficas usando diferentes fontes de dados altimétricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE DESASTRES NATURAIS, 2012, Rio Claro, **Anais...** [Rio Claro]: INPE, 2012, p. 1-10.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. In: XII CONGRESSO NACIONAL DE TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Granada, 2006. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas. p. 465-479.

SILVA, A. M. da; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. de. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. 2ª edição. São Carlos: Rima, 2007. 153 p.

SILVEIRA, M. J. **Sistema de informações geográficas de baixo custo para apoio a gestão de bacias hidrográficas**. 2010. 54f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOARES, P. A. et al. Estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas com escassez de dados fluviométricos. **Revista de estudos ambientais** (online). v.12, n.1, jan./jun. 2010. p. 29-38.

SUBRAMANIAN, K. S. S.; SINGH, A.; SUDHAKAR, M. **Evaluation of digital elevation models created from different satellite images**. 2005. Disponível em: <http://www.gisdevelopment.net/technology/rs/pdf/79.pdf>. Acesso: em 19 jul. 2013.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 2009. 943 p.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para América do Sul**. São José dos Campos: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. 2004.

VILAÇA, M. F.; GOMES, I.; MACHADO, M. L.; VIEIRA, E. M.; SIMÃO, M. L. R. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão: o estudo de caso do Ribeirão Conquista no Município de Itaguara-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, Viçosa, **Anais...** [Viçosa]: UFV, 2009, v.1, p. 42-43.

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

VON SPERLING, M. V. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 2007. p. 588.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e o tratamento de esgotos**. Vol. 1, 3ª edição. Belo Horizonte: Ed UFMG, 2009. 452 p.