Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do rio Doce: elaboração e análise

Fernando Angelo Couto Cardoso¹, Deborah Luiza Poletto de Paula², Roberto Cezar de Almeida Monte Mor³,
James Lacerda Maia⁴, Eliane Maria Vieira⁵
^{1,2,3,4,5}Universidade Federal de Itajubá. Autor correspondente: e-mail: fernando.eam@gmail.com

Artigo submetido em 19/10/2016 e aceite em 06/12/2016

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a delimitação da bacia hidrográfica do rio Doce, que se encontra nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e a elaboração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), para a delimitação das Áreas de Preservação Permanente de topo de morro. Para a delimitação da bacia e a elaboração do modelo foi empregado o *software* ArcGIS® e como base de dados o *Global Digital Elevation Map* (GDEM) do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer* (ASTER) e hidrografia disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA), foi empregada uma composição colorida do satélite LandSat RGB-345, para a verificação dos resultados e correção das falhas detectadas durante a execução do trabalho. Os resultados obtidos demonstraram a necessidade de modelos com qualidade satisfatória, para o correto desenvolvimento da metodologia de geração do modelo hidrológico, visto que houve variação na direção de fluxo com a mudança do MDE para o MDEHC. Também houve variação nos valores de altitude, dos dois modelos, enquanto que o valor o valor máximo obtido no MDEHC foi de 2637 m contra 2868 m no MDE. Esta variação na altitude é devida ao emprego da ferramenta para a eliminação das depressões espúrias, demonstrando que esta deve ser empregada com cautela. A variação no limite gerado com o MDEHC, em relação ao limite da ANA, demonstrou a necessidade da implementação de uma rotina computacional no Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a delimitação de bacias onde o exutório é constituído por uma região. Palavras-chave: Modelo Hidrológico, ASTER, Geoprocessamento.

Conditioning hydrographic digital elevation model to rio Doce watershed: preparation and analysis

ABSTRACT

This study aims at delineation of rio Doce watershed, located in states of Minas Gerais and Espírito Santo, and the preparation of the Conditioning Hydrographic Digital Elevation Model (CHDEM), for the delineation of areas of permanent preservation on top of hills. For the delineation of the watershed and the development of the model was used the software ArcGIS® and as database the Global Digital Elevation Map (GDEM) of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) including the Hydrography provided by Agência Nacional de Águas (ANA). It was made a color composite Landsat RGB-345 satellite, for the verification of the results and correction of faults detected during the execution of the work. The results showed the need for models with satisfactory quality to correct development of the hydrological model generation methodology, as there was variation in the flow direction with the change of the DEM for CHDEM. There was also variation in altitude values of the two models, while the maximum value obtained in CHDEM was 2637 m against 2868 m in DEM. This variation in altitude is due to the use of the tool to eliminate spurious depressions, demonstrating that this should be used with caution. The variation in the boundary generated using CHDEM in relation to the ANA limit, showed the necessity of implementing a Geographic Information System (GIS) computational routine for delineation the watersheds where mouth comprises a region. Keywords: Hidrologyc model, ASTER, Geoprocessing.

Introdução

Os recursos hídricos, sejam eles na forma de cursos d'água, nascentes, lagos, lagoas, dentre outras formas, são de extrema importância para a continuidade da vida de todos que dependem,

direta ou indiretamente deste bem natural tão essencial, porém, atualmente, cada vez mais escasso, necessitando de maior proteção e tratamento, por parte de toda a população.

As Áreas de Preservação Permanente (APP's), definidas de acordo com BRASIL, (2012), como área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, desempenham uma função fundamental no que se refere à preservação dos recursos hídricos, especialmente ao redor de nascentes e ao longo dos cursos d'água.

Para Nery (2013), às APP's estão ligadas diretamente a função de preservação dos recursos hídricos, por meio do fornecimento de bens e serviços fundamentais para toda população, sendo esses, relacionados à regularização da vazão, retenção de sedimentos, conservação do solo, recarga do lençol freático, ecoturismo, biodiversidade, resumidamente, a inúmeros benefícios.

A legislação, Lei Federal nº 12.651 de 25 de maio de 2012, além de fornecer a definição de APP's, também delimita a faixa marginal que esta deve estar ao longo dos recursos hídricos.

Neste contexto, o estudo das Áreas de Preservação Permanente e análises relacionadas aos recursos hídricos, tendo como região de estudo as bacias hidrográficas, se tornam cada vez mais significativos, principalmente em se tratando de áreas urbanas, ocupadas indevidamente e áreas rurais degradadas, ou em processo de degradação.

Entende-se como bacia hidrográfica uma área, na qual, seu entorno é composto por topos de morro ou montanhas, ou seja, divisores de água com a presença ou não de nascentes e a drenagem da água superficial, do seu rio principal e seus tributários, convergem para o exutório da bacia, o qual, de acordo com Finkler (2012), é a parte mais baixa do trecho do curso d'água principal de uma bacia hidrográfica.

No Brasil a adoção da bacia hidrográfica como unidade de estudo e gestão relacionados aos recursos hídricos já se tornou consenso na medida em que a bacia hidrográfica já é definida como a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), bem como a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Estudar e analisar o comportamento e as informações que uma bacia apresenta é uma tarefa que requer cautela, fato da sua complexidade. De acordo com Pereira Neto (2016), a bacia hidrográfica emerge de um contexto sistêmico, em múltiplas áreas do conhecimento, fazendo com que sejam necessários estudos integrados.

Ferreira et al. (2012) afirmam que o conhecimento das características morfométricas de uma bacia ou sub-bacia hidrográfica é indispensável para a conservação de seus recursos

hídricos, tornando possível a compreensão do comportamento hidrológico que apresentam, o que pode denotar a possibilidade de acompanhamento das interferências nos processos do ciclo hidrológico.

Em relação à hidrografia de uma bacia, o volume de águas das bacias hidrográficas depende da atuação de vários sistemas meteorológicos, e, de acordo com Santos et al. (2015), implantar uma gestão adequada nas bacias torna-se necessário, visto que se trata de recursos hídricos dos quais dependem o desenvolvimento das atividades humanas, sendo o aporte hídrico das bacias, imprescindível para a preservação do meio ambiente.

Um problema que afeta os recursos hídricos é a intensa atividade humana, que compromete a qualidade da água, especialmente, para fins de abastecimento doméstico, sendo causada, segundo Merten e Minella (2002), por efluentes domésticos e industriais, bem como, escoamento superficial urbano e agrícola.

Os mesmos autores, ainda em seus estudos, afirmaram que há um consenso no qual a atividade agropecuária rege uma importante função na contaminação dos mananciais, sendo considerada uma atividade de alto potencial degradador, desta forma, o uso e manejo das bacias hidrográficas, devem ter seu estudo mais aprofundado.

Nos estudos sobre contaminação dos recursos hídricos advindas das atividades agropecuárias, parte destas é transportada por meio do escoamento superficial, que por sua vez está diretamente relacionado com a morfometria da bacia (Pruski et al., 2003).

Ainda, em se tratando de problemas advindos do homem, desta vez em se tratando das Áreas de Preservação Permanente é recorrente a ocupação urbana destas, devido ao processo de urbanização das últimas décadas, o qual aumentou a população residente em APP's, especialmente em locais, que antigamente eram considerados áreas rural e se tornaram áreas urbanas, em regiões de encostas e topos de morro, principalmente nas grandes cidades, no qual a ocupação ocorre de forma desordenada, geralmente por população carente, tornando-se assim, necessários estudos e políticas públicas para a manutenção destas áreas.

Borges et al. (2011), em suas pesquisas, afirmam que é de fundamental importância a preservação das APP's na gestão de bacias hidrográficas, visto que, contribuem para a estabilidade dos ciclos hidrológicos e bioquímicos. Os autores afirmam também, que intervenções nas APP's comprometem, no futuro, a reposição de água nos aquíferos, a qualidade das águas tanto

superficiais quanto subterrâneas, além de comprometer a produção de alimentos.

Levando-se em consideração a infinidade de estudos e trabalhos que podem ser realizados em bacias hidrográficas, o primeiro passo nestes é a identificação dos limites destas bacias em escala e grau de detalhes compatíveis com estes estudos.

Neste contexto o emprego de Modelos Digitais de Elevação (MDE) são considerados uma ferramenta de extrema importância, visto que, é a partir deste que as bacias hidrográficas podem ser delimitadas, além da extração do limite da bacia, grande parte de sua caracterização é derivada de informações extraídas destes modelos.

Estes modelos podem ser obtidos por meio da interpolação de curvas de nível e pontos cotados, obtidos de um levantamento topográfico ou de um levantamento aerofotogramétrico, ou por meio de sensores como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer* (ASTER).

A missão SRTM foi realizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em conjunto com outras agências espaciais dos Estados Unidos, Alemanha e Itália, com o propósito de mapear o relevo da área continental da Terra, entre as latitudes 60° N e 54° S, o que corresponde à aproximadamente 80% das áreas emersas do planeta (Grohmann et al. 2008).

A missão espacial (SRTM) tem sido utilizada em larga escala no contexto do sensoriamento remoto, a saber: análise de tamanho e distribuição espacial em bacias hidrográficas, delimitação de áreas de preservação permanente em topos de morro, empregos diversos em geomorfologia, derivação de rede de drenagem, identificação da direção de fluxo do escoamento, obtenção do mapa de declividade da bacia, dentre outras aplicações.

Outra base que também vem sendo empregada nestes estudos são os dados do *Global Digital Elevation Map* (GDEM) do ASTER. Este cobre a superfície terrestre entre as latitudes 83° N e 83° S, estando disponível para todos os usuários independentemente da dimensão ou localização de suas áreas. Trata-se de um mapa de perceptível sofisticação sendo usado como plataforma em instituições especializadas em monitoramento de desastres, hidrologia, energia, monitoramento ambiental sendo possível uma melhor performance em análises avançadas (Tachikawa et al., 2011).

Devido à quantidade de informações que podem ser extraídas destes modelos e analisadas, são normalmente empregadas ferramentas de geoprocessamento, com o emprego dos Sistemas

de Informações Geográficas (SIG), comumente usados, de acordo com Nery et al. (2013), nas tomadas de decisão, pois, além de ser uma ferramenta de baixo custo apresenta resultados satisfatórios em um curto espaço de tempo.

De acordo Chaves (2002), um modelo digital deve representar o relevo de forma fidedigna e assegurar a convergência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem mapeada, para que seja possível sua consistência hidrológica, sendo conhecidos na literatura como modelos digitais de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC) e servindo de base para quaisquer estudos de natureza hidrológica, como os que são necessários para a execução dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Os MDEHC utilizam a malha hidrográfica durante o processo de interpolação dos dados apropriados de altimetria, para melhorar a definição do relevo ao longo das calhas dos rios, assegurando-se a conectividade de todos os seus arcos, bem como a correta orientação no sentido do escoamento, ou seja, o fluxo deve estar sendo direcionado para a foz (Soares et al., 2011).

O presente trabalho é fruto de uma necessidade de se delimitar as Áreas de Preservação Permanente de topo de morro da bacia hidrográfica do rio Doce. Durante os estudos das possíveis metodologias que poderiam ser empregadas para tal fim, constatou-se a grande importância de se dispor de um MDE que representasse o relevo desta área com fidedignidade e que o sentido de escoamento em cada célula deste modelo fosse correto, visto ser este o parâmetro de maior importância nas metodologias pesquisadas para a delimitação da APP de topo de morro.

Sendo assim, este artigo tem como objetivo a elaboração do MDEHC e a comparação deste com o MDE da mesma área, para futura delimitação das Áreas de Preservação Permanente de topo de morro da bacia hidrográfica do rio Doce.

Metodologia

A área de estudo do presente artigo é a bacia hidrográfica do rio Doce, localizada na Região Sudeste do Brasil entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo nos paralelos 17°45' e 21°15' de latitude Sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de longitude Oeste.

Esta apresenta uma extensão total de 853 km e uma área de drenagem de 83.465 km², a qual, 86% pertence ao Estado de Minas Gerais e o restante (14%) ao Estado do Espírito Santo sendo,

portanto, considerada uma bacia de domínio federal (Coelho, 2007).

A população da bacia do rio Doce é de 3,5 milhões de pessoas distribuídas em 228 municípios, possuindo uma atividade econômica diversificada, com destaque para a geração de energia elétrica com grande potencial de

exploração, bem como alta biodiversidade, sendo 98% de sua área inserida na Mata Atlântica, um dos mais importantes e ameaçados ecossistemas do mundo, tornando assim, necessários estudos sobre a conservação e manutenção desta bacia (CBH-DOCE, 2014). Na Figura 1, é apresentada a localização da área de estudo.

Localização da área de estudo

Figura 1. Localização da área de estudo.

Em relação à formação geológica da bacia do rio Doce destaca-se, em um reduzido conjunto de unidades estratigráficas de distribuição espacial restrita, origem sedimentar, com um grande conjunto de unidades cristalinas, se estendendo do período Cambriano até o Mesozoico, sendo as Províncias Mantiqueira e São Francisco, de litologia extremamente variada e cujas características refletem os efeitos de uma tectônica complexa (IBIO AGB DOCE, 2015).

Em se tratando da hidrografia da região, o rio Doce é o principal rio da bacia hidrográfica em estudo, sendo formado pelos rios Piranga e Carmo, com nascentes situadas nos municípios de Ressaquinha e Ouro Preto, respectivamente nas serras do Espinhaço e da Mantiqueira com altitudes de até 1.200 m (CEMIG, 2016).

Encontra-se disponível no site da ANA (Agência Nacional de Águas) um limite desta bacia, contudo a escala deste não é detalhada (1: 1.000.000)

Para a obtenção de um limite mais detalhado e a obtenção do MDEHC, foram obtidas

as imagens do ASTER com resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pelo serviço geológico dos Estados Unidos (USGS), a hidrografia da região em estudo e o limite da bacia, ambos disponíveis para *download* na página da ANA, na escala de 1: 1.000.000.

Vale destacar, que a maior parte dos trabalhos, empregando modelos derivados de sensores orbitais, empregam as imagens do *Shuttle Radar Topography Mission*.

Porém, devido à extensão da área da bacia hidrográfica e a região geográfica que esta se encontra, as imagens obtidas deste sensor continham falhas, o que impediu o seu emprego. A correção destes *voids* tornou-se inviável devido ao demasiado tempo necessário para corrigi-los, assim, optou-se pelo emprego das imagens do ASTER, de mesma resolução espacial e sem os *voids*.

Para os procedimentos foi empregado o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS® versão 10.2.2, disponível no laboratório de

Geoprocessamento da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Campus Avançado de Itabira.

De posse de cada imagem do ASTER, foi realizado o mosaico dessas empregando a ferramenta mosaico dentro de ferramenta de gerenciamento de dados no *ArcToolBox* do SIG ArcGIS®, tornando-as um único *raster*.

Para o recorte da área de estudo, foi empregado o limite disponibilizado pela ANA, empregando a ferramenta extração por máscara do ArcGis®, tendo como parâmetros de entrada o mosaico realizado anteriormente e como máscara o limite da bacia disponibilizado pela ANA.

De posse do mosaico foi necessário a realização da conversão do sistema de projeção para Local Transverso de Mercator (LTM), empregando o elipsóide WGS 1984 havendo a necessidade de deslocar o fuso em 2° à oeste, pois, a imagem estava em uma zona de mudança de fuso do sistema Universal Transverso de Mercator (UTM). Empregando-se, assim, como meridiano central o meridiano 43° da zona 23S.

Para a construção do MDEHC, foi realizada a conversão da feição de rios para *raster* utilizando-se o tamanho de célula igual ao do modelo ASTER (MDE), ou seja, 30 metros, empregando a ferramenta de conversão feição para *raster* disponível no *ArcToolBox*.

Após este procedimento, foram incorporados os valores altimétricos do modelo ao longo da hidrografia rasterizada com o auxílio da ferramenta matemática de *raster*, empregando a Equação 1.

$$\text{Perfil_alt} = \text{"MDE"} * \text{Float("rios")} \quad (1)$$

Prosseguindo com as etapas, aprofundou-se o relevo ao longo da hidrografia em 10.000 metros, ou seja, nos locais em que se identificou a presença de rios, o modelo foi aprofundado em 10 km, etapa esta, realizada com o auxílio da matemática de *raster*, empregando a Equação 2.

$$\text{Aprofundado} = \text{con(IsNull("Perfil_alt"), "MDE", "Perfil_alt" - 10000)} \quad (2)$$

Foi realizada a eliminação das depressões espúrias ao longo de toda a bacia, utilizando-se da ferramenta preencher, presente na ferramenta hidrológica do *Spatial Analyst* do ArcGIS®, gerando o arquivo "M1".

Com o modelo corrigido foi realizado o cálculo da direção de fluxo, ou direção de escoamento empregando a ferramenta direção de

fluxo, presente na ferramenta hidrológica do *Spatial Analyst* do ArcGIS®.

Empregou-se por fim a ferramenta bacia para a delimitação da área de drenagem de cada depressão, e consequentemente, a delimitação da bacia hidrográfica. Porém, o limite gerado diferia, em muito, do limite disponibilizado pela ANA.

Assim, a partir desta etapa, houve a necessidade da realização de um *buffer* com distância de 8 km ao longo de todo o perímetro da bacia, assim, com este "novo limite" foi recortado novamente o mosaico e todos os passos descritos anteriormente replicados, chegando-se a um segundo limite da bacia gerado empregando a ferramenta bacia para a delimitação da área de drenagem.

Este segundo limite ainda não condizia com o limite da ANA, assim optou-se pela delimitação do fluxo acumulado, visto que os locais de maiores acumulações deveriam coincidir com os rios presentes nesta bacia e a maior concentração deveria coincidir com o exutório desta.

Com este resultado sobreposto ao mapa de rios, constatou-se que havia inconsistências na camada de rios que deveriam ser corrigidas antes do emprego destes para a geração do MDEHC.

Para a solução do problema, houve a necessidade de adquirir imagens de satélite Landsat 8, referentes à área de estudo, disponível no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Foram empregadas as bandas 3, 4 e 5, para a elaboração da composição colorida RGB- 345, para facilitar a identificação dos rios na região da foz do rio Doce (região com a maior discrepância no mapa de fluxo acumulado).

Com a composição colorida destas bandas e a sobreposição dos rios na imagem, percebe-se que havia erros na delimitação da hidrografia. Para que estes erros fossem corrigidos, utilizou-se a ferramenta Editor, com o intuito de completar as falhas no arquivo de rios.

Após as devidas correções retornou-se à etapa de rasterização da hidrografia mapeada, realizando, novamente todas as etapas anteriormente citadas da metodologia, obtendo-se no final, o limite da bacia hidrográfica do rio Doce.

Com a realização das etapas anteriores e de posse do limite, deu-se continuidade ao processo de criação do MDEHC com a obtenção dos valores de altitude que deveriam ser acrescentados à cada célula na posição da hidrografia para retorná-la à cota do terreno empregando a Equação 3 e extraindo apenas para a região dos rios com a

Equação 4, execução de cálculos na matemática *raster*.

$$\text{zhr1} = \text{"M1"} * \text{"rios"} \quad (3)$$

$$\text{dif} = \text{"MDE"} - \text{"zhr1"} \quad (4)$$

Para retornar o modelo à “quase” superfície foi empregada a Equação 5.

$$\text{MDEHC} = \text{con}(\text{IsNull}(\text{"rios"}), \text{"M1"}, \text{"M1"} + \text{"dif"} - 2) \quad (5)$$

Por meio da Equação 5 o modelo foi trabalhado com o retorno da altitude das células localizadas na região da hidrografia, mantendo-as 2 m abaixo do valor original do modelo.

O fluxograma a seguir, figura 2, exemplifica a metodologia utilizada, bem como as dificuldades encontradas durante a sua elaboração.

A seta preta, indica a primeira tentativa de desenvolver a metodologia, a em azul indica a segunda tentativa e a vermelho indica a terceira tentativa chegando ao MDEHC.

Figura 2. Fluxograma exemplificando a metodologia.

Resultados e discussão

Com o emprego das imagens do ASTER com resolução espacial de 30 metros, foi realizado o mosaico dessas empregando a ferramenta mosaico dentro de ferramenta de gerenciamento de dados no *ArcToolBox* do SIG ArcGIS®, tornando-as um único *raster*.

O emprego deste *raster* para os procedimentos metodológicos para a geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente, se tornou inviável em virtude do tamanho do arquivo frente à capacidade computacional do equipamento empregado para a execução do trabalho, assim optou-se pelo recorte deste.

Para o recorte da área de estudo, foi empregado o limite disponibilizado pela ANA, empregando a ferramenta extração por máscara do ArcGIS®, tendo como parâmetros de entrada o mosaico realizado anteriormente e como máscara o limite da bacia disponibilizado pela ANA, embora este limite não esteja em uma escala detalhada, acreditava-se que estaria muito próximo do limite real da bacia.

Para a construção do MDEHC, foi realizada a conversão da feição de rios (no formato vetorial), para *raster* utilizando-se o tamanho de célula de 30 metros, ou seja, igual ao do modelo ASTER (MDE), empregando a ferramenta de conversão feição para *raster* disponível no *ArcToolBox*.

Após este procedimento, foram incorporados os valores altimétricos do modelo ao longo da hidrografia rasterizada com o auxílio da ferramenta matemática de *raster*.

Prosseguindo com as etapas, aprofundou-se o relevo ao longo da hidrografia em 10.000

metros, ou seja, o modelo foi aprofundado em 10 km nos leitos dos rios, etapa esta, realizada com o auxílio da matemática de *raster*.

Foi realizada a eliminação das depressões espúrias ao longo de toda a bacia, utilizando-se da ferramenta preencher, presente na ferramenta hidrológica do *Spatial Analyst* do ArcGIS®. Este passo se torna importante, pois, de acordo com Poletto et al., (2008), o sentido preferencial do escoamento superficial, que na natureza ocorre da maior para a menor elevação, seja sempre obedecido, representando fielmente o fenômeno observado na realidade.

Com o modelo corrigido foi realizado o cálculo da direção de fluxo, ou direção de escoamento empregando a ferramenta direção de fluxo, presente na ferramenta hidrológica do *Spatial Analyst* do ArcGIS®.

Este modelo se perfaz da maior importância nos estudos relacionados à contaminação carregada por escoamento superficial, pois neste modelo é possível se verificar o caminho que determinado contaminante teria caso fosse carregado pelo escoamento superficial em um determinado ponto (ou área) da bacia.

Empregou-se, por fim, a ferramenta bacia para a delimitação da área de drenagem de cada depressão, e consequentemente, a delimitação da bacia hidrográfica, gerando um total de 6.678 bacias. Porém, o limite gerado diferia, em muito, do limite disponibilizado pela ANA, pois, regiões que deveriam estar contidas na bacia do rio Doce, foram excluídas. A Figura 3, apresenta a divergência no limite gerado e o disponibilizado pela ANA.

Figura 3. Bacias geradas.

Por meio da figura 3, pode-se observar que as regiões que apresentaram maiores divergências foi a região localizada no extremo oeste da bacia e na região da foz. Em ambos os casos áreas que deveriam integrar à bacia do rio Doce foram delimitadas como se pertencessem à outra bacia.

Assim, a partir desta etapa, houve a necessidade da realização de um *buffer* com distância de 8 km ao longo de todo o perímetro da bacia. Com este “novo limite” foi recortado novamente o mosaico e todos os passos descritos anteriormente replicados, chegando-se a um segundo limite da bacia gerado empregando a ferramenta bacia para a delimitação da área de drenagem.

Este segundo limite ainda não condizia com o limite da ANA, assim para se compreender os fatores que estariam levando o SIG à uma delimitação discrepante da esperada, optou-se pela

delimitação da acumulação de fluxo, visto que os locais de maiores acumulações deveriam coincidir com os rios presentes nesta bacia e também com o exutório desta.

Com este resultado sobreposto ao mapa de rios, apresentado na Figura 4, constatou-se que o modelo gerado apresentava um exutório (ponto em azul na figura 4) em uma localização geográfica diferente do real (ponto em vermelho na figura 4). Apresentando também uma discrepância em relação aos locais que deveriam apresentar os maiores fluxos acumulados.

Diante destas constatações, foi realizada uma análise visual nos vetores de rios empregados e verificado que alguns segmentos estavam desconectados e deveriam ser corrigidas antes do emprego destes para a geração do MDEHC. A Figura 4, a seguir, apresenta o fluxo acumulado sobreposto pela hidrografia.

Figura 4. Fluxo acumulado com sobreposição da hidrografia.

Para a correção dos vetores de rios, houve a necessidade de se adquirir imagens do satélite Landsat 8, bandas 3, 4 e 5, disponível no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, a opção por este sensor foi devido à disponibilidade de imagens da área de estudo gratuita e com resolução espacial e espectral que possibilitou a identificação visual dos rios nestas imagens.

Para facilitar a identificação dos rios na região da foz do rio Doce, foi empregada a composição colorida destas RGB-345, e a sobreposição dos rios na imagem.

Empregando-se a ferramenta *Editor*, foram completadas as falhas detectadas por meio da digitalização em tela e corrigidas as conexões entre os rios.

Após as devidas correções retornou-se à etapa de rasterização da hidrografia mapeada, realizando, novamente todas as etapas anteriormente citadas da metodologia, obtendo-se no final, o limite da bacia hidrográfica do rio Doce, bem como, o modelo hidrológico. A Figura 5 apresenta o modelo digital de elevação hidrológicamente consistente já corrigido, bem

como o limite das bacias, disponibilizadas pela ANA e gerada pelo ArcGIS®.

Figura 5. Modelo Hidrologicamente Consistente com os limites da bacia do rio Doce.

As diferenças entre os modelos MDE e o MDEHC são visíveis, houve uma variação significativa na área da bacia que segundo o limite disponibilizado pela ANA era de aproximadamente 82.568 km² para aproximadamente 83.129 km² no limite do MDEHC gerado.

Mais importante do que a variação na magnitude da área foi a inclusão de regiões que pertencem à bacia e que pelo limite da ANA estavam excluídas, principalmente na região oeste da bacia.

Embora estas regiões não sejam afetadas diretamente pelos usos na bacia (por estarem em uma região de cabeceira) elas contribuem para o fluxo nesta bacia, podendo ser regiões de aporte de poluentes, dependendo dos usos que aí se instalem.

Outro ponto importante neste resultado é em relação à região da foz da bacia, que neste modelo (o MDEHC) apresentou uma área menor do que a contida no limite da ANA (como apresentado na figura 5, anteriormente).

Nesse ponto constatou-se, por meio da análise visual da composição colorida, que embora haja um ponto de exutório, que seria o ponto de deságue do rio Doce no mar, há também a formação de bolsões de areia nesta região que se modificam em magnitude e localização geográfica

em função do tempo, fazendo com que o exutório não seja exatamente um ponto e sim uma região, tal comportamento não é previsto computacionalmente pelas rotinas de geração de bacias no SIG empregado, sendo portanto, este um dos motivos da grande diferença do limite gerado com o da ANA nesta região. Assim, há a necessidade de se realizar estudos direcionados à esta questão, para que se possa delimitar o limite desta bacia (e de bacias com o mesmo comportamento) na região do exutório desta.

Outro ponto muito importante deste trabalho foi o aprofundamento da hidrografia para a geração do MDEHC, embora possa parecer exagerado o rebaixamento em 10 km, esse “exagero” fez com que o SIG não identificasse os *pixels* da hidrografia como depressões espúrias no momento da correção do modelo, assim mantendo-se os *pixels* nos locais dos rios rebaixados forçou-se o SIG a direcionar o fluxo para estes locais. A visualização deste rebaixamento pode ser facilmente constatada observando-se os perfis topográficos gerados. Na Figura 6a é apresentado o MDE com o aprofundamento das células nos locais dos rios e na sequência a Figura 6b, com o MDEHC após o retorno dos rios à quase sua cota anterior ao rebaixamento.

Figura 6a. Perfil transversal do Modelo Digital de Elevação aprofundado.

Figura 6b. Perfil transversal do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente aprofundado.

Também foi elaborado o mapa de direção de fluxo para os dois modelos, ou seja, MDE e MDEHC, com a finalidade de verificar se houve alteração nesta direção com a realização do MDEHC. Observando a Figura 7, podem-se encontrar as diferenças em relação à direção de

fluxo nestes modelos, a Figura 7, demonstra a direção de fluxo nos dois modelos, na mesma região. No qual, a Figura A representa a direção de fluxo gerada a partir do modelo MDE e a figura B, a direção de fluxo gerada a partir do modelo MDEHC.

Figura 7. Diferença nas direções de fluxo para uma mesma região.

A partir da análise dos dois modelos, regiões retiradas das mesmas coordenadas, percebe-se que, enquanto que no MDE apresentava a direção 16, na porção sudeste do mapa, passaram a apresentar as direções 1 e 64, o que indica uma grande variação no quesito direção de fluxo.

Esta análise é de grande importância, visto que, segundo Martini et al. (2012) entre os processos de transporte nos compartimentos ambientais, a lixiviação e o escoamento superficial se destacam.

Ainda segundo os mesmos autores, o escoamento superficial favorece a contaminação das águas superficiais, através do transporte do agrotóxico adsorvido às partículas do solo erodido ou dissolvido em água.

Por fim, também houve variação nos valores de altitude, em metros, dos dois modelos, enquanto que o valor o valor máximo obtido no MDEHC foi de 2637 m contra 2868 m no MDE; apresentando como altitude média 561,9 no MDE e 575,8 m no MDEHC, e um desvio padrão de 282,4 no MDEHC contra um de 296,7 para o MDE.

A variação na altitude é devida ao emprego da ferramenta para a eliminação das depressões

espúrias, que por ser um filtro elimina tanto *pixels* isolados que constituem um aprofundamento ou uma elevação no modelo e consequentemente se tornam um sumidouro ou um desvio para o fluxo alterando assim a direção deste.

Conclusões

Este trabalho teve como base de dados o GDEM do ASTER e a hidrografia da ANA com os quais, após todos os procedimentos metodológicos empregando o SIG ArcGIS® chegou-se ao Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente.

Pôde-se perceber variações significativas, comparando-se o MDE e o MDEHC, nas direções de fluxo, nos dados estatísticos, bem como a delimitação da bacia hidrográfica.

Com isto, concluiu-se que uma mesma imagem, antes de passar pelas etapas da metodologia explicitada anteriormente (conversão do MDE para o MDEHC), apresenta resultados hidrológicos não tão fiéis, em relação àqueles que foi trabalhado.

A verificação do resultado gerado pelo SIG se confirmou como de extrema importância, visto

que, sem esta, o trabalho teria se encerrado com o primeiro modelo gerado. Esta verificação também permitiu a identificação do problema de não haver uma rotina implementada para bacias que não apresentam a foz como um ponto e sim como uma região.

Com a execução deste trabalho ficou evidente o cuidado que deve se dispensar ao empregar a ferramenta para a eliminação das depressões espúrias, visto que por ser um filtro, este tende a suavizar o modelo.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Itajubá – *Campus* Itabira por ceder os equipamentos e softwares necessários para a execução deste trabalho, ao INPE, ao USGS e à ANA pela disponibilização dos dados empregados neste trabalho.

Referências

- Borges, L. A. C., Rezende, J. L. P., Pereira, J. A. A., Coelho Júnior, M. L., Barros, D. A., 2011. Áreas de preservação permanente na legislação ambiental brasileira. *Ciência Rural* 41, 1202-1210.
- BRASIL, 1997. Lei nº 9433, de 8 de janeiro.
- BRASIL, 2012. Lei nº 12651, de 25 de maio.
- Coelho, A. L. N., 2007. Modelagem hidrológica da bacia do rio Doce (MG/ES) com base em imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). *Caminho de Geografia* 8, 116 – 131.
- CBH-DOCE. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Doce, 2014. A Bacia. Disponível: <http://www.cbhdoce.org.br/a-bacia/>. Acesso: 14 jul. 2016.
- CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais, 2016. Bacia do rio Doce. Disponível: http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/peixe_vivo/Paginas/rio_doce.aspx. Acesso: 06 out. 2016.
- Chaves, M. A., 2002. Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a bacia Amazônica. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal). Viçosa – MG, UFV.
- Ferreira, R. G., Moura, M. C. O., Castro, F. S., 2012. Caracterização morfométrica da sub-bacia do ribeirão Panquinhas, ES. *Enciclopédia Biosfera* 8, 2247-2256.
- Finkler, R., 2012. Planejamento, manejo e gestão de bacias. Disponível: http://www.planejamento.mppr.mp.br/arquivos/File/bacias_hidrograficas/planejamento_manejo_e_gestao_unidade_1.pdf. Acesso: 20 ago. 2016.
- Grohmann, C. H., Riccomini, C., Steiner, S. S., 2008. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. *Revista Geográfica Acadêmica* 2, 73-83.
- IBIO AGB DOCE, 2015. Diagnóstico consolidado da bacia do rio Doce. Disponível: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/02/diagnostico.pdf>. Acesso: 10 out. 2016.
- Martini L. F. D., Caldas S. S., Bolzan C. M., Bundt A. D. C., Primel E. G., Avila L. A., 2012. Risco de contaminação das águas de superfície e subterrâneas por agrotóxicos recomendados para a cultura de arroz irrigado. *Revista Ciência Rural* 42, 1715-1721.
- Merten, G. H.; Minella, J. P. G., 2002. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para sobrevivência futura. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*, Porto Alegre 3, 33-38.
- Nery, C. V. M., Braga, F. L., Moreira, A. A., Fernandes, F. H. S., 2013. Aplicação do Novo Código Florestal na Avaliação das Áreas de Preservação Permanente em Topo de Morro na sub-bacia do rio Canoas no Município de Montes Claros/MG. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 1673-1688.
- Pereira Neto, M. C., 2016. Análise areal como subsídio aos estudos integrados da bacia hidrográfica do rio Seripó (RN/PB). *Revista Equador* 5, 250-261.
- Poleto, L. J. C., Silva, C. H. C., Ribeiro Júnior, S., Vieira, C. A. O., Santos, A. P., 2008. Validação de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC). II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife.
- Pruski, F. F., Brandão, V. S., Silva, D. D., 2003. *Escoamento Superficial*. Editora UFV, 88p.
- Santos, E. C. A., Araújo, L. E., Marcelino, A. S., 2015. Análise climática da bacia hidrográfica do Rio Mamanguape. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19, 9-14.
- Soares, V. P., Moreira, A. A., Ribeiro, C. A. A. S., Gleriani, J. M., Gripp Junior, J., 2011. Mapeamento de áreas de preservação permanentes e identificação dos conflitos legais de uso da terra na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu – MG. *Revista Árvore* 35, 555-563.
- Tachikawa T., Hato M., Kaku M., Iwasaki A., 2011. The characteristics of ASTER GDEM version 2, IGARSS.