



**Aplicação de Geotecnologias na Geração do Divisor de Bacias
Hidrográficas: Uma Ferramenta para a Política de Recursos Hídricos**
Geotechnologies on Hydrographic Watershed Generation: a Instrument for Hydric Politics

Thais Gisele Torres Catalani¹; Fabrício Bau Dalmas²; Alesandro Copatti³;
Thais Barbosa de Azambuja Caramori⁴; Manoel Afonso Costa Rondon¹ &
Antonio Conceição Paranhos Filho¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais,
Avenida Costa e Silva, s/n, 79070-900, Cidade Universitária, Campo Grande, MS, Brasil

²Universidade Univeritas UNG, Programa de Mestrado em Análise Geoambiental,
Praça Tereza Cristina, 239, 07023-070, Guarulhos, SP, Brasil.

³ Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul, Rua Des. Leão Neto do Carmo, s/n, 79037-100, Campo Grande, MS, Brasil

⁴ Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul,
Rua Pres. Manuel Ferraz de Campos Salles, 214, Jardim Veraneio, 79031-907, Campo Grande, MS, Brasil

E-mails: tgorres@gmail.com; fdalmas@prof.ung.br; acopatti@hotmail.com;
tcaramori@semagro.ms.gov.br; manoel.rondon@ufms.br; antonio.paranhos@pq.cnpq.br

Recebido em: 27/08/2018 Aprovado em: 16/09/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_153_166

Resumo

Neste trabalho são utilizadas geotecnologias na obtenção de divisores de bacia em um estudo de caso. Considerando que a legislação determina que a bacia hidrográfica deve ser considerada a unidade elementar de estudo, são testadas diferentes técnicas de obtenção do divisor de águas. Em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) utilizou-se o modelo digital de elevação obtido pela missão de radar topográfico em ônibus espacial norte-americano (SRTM) como fonte de dados altimétricos, a partir destes, utilizando rotinas de modelagem SIG foram identificadas as vertentes, encostas e cumeeiras, que conduziram ao divisor de bacias. Neste trabalho observou-se que o ambiente SIG permite a diminuição do caráter subjetivo da obtenção dos divisores de bacia e possibilita a diferentes usuários obterem limites similares de modo impessoal, sendo um indicativo de que estas tecnologias podem fornecer o substrato adequado à política de recursos hídricos no tocante a individualização das bacias hidrográficas. A bacia do Formoso (Bonito - MS), escolhida pela importância de seus recursos hídricos para a região que banha, serviu para este estudo de caso e o limite de bacia obtido foi consistente com as cartas topográficas e aos pontos de controle obtidos em levantamento de campo, porém significativamente diferente do limite utilizado oficialmente.

Palavras-chave: divisor de bacias; SRTM; MDE; geotecnologias

Abstract

In this work geotechnologies are used to obtaining the watershed in a study case. Taking in account that the Law determines that the hydrographic basin must be considered the elementary study unit, different techniques for obtaining the watershed are tested. In the GIS (Geographic Information System) environment has been used the digital elevation model obtained by the shuttle radar topographic mission (SRTM) as elevation data font, from which, using GIS routines, have been identified the hillside, slopes and the peak line that guides to the watershed identification. In this work has been observed that the GIS environment aloud the diminution of the subjective character of the watershed gathering and gives the opportunity of different user getting very similar watershed limits on an impersonal way, becoming a indication that these technologies can give the basement to the hydrographic resources politics on about the basin limits determination. The Formoso basin (Bonito - MS), has been choose as study area by the importance of its hydrologic resources importance to its region, has been used as a study case and the basin delimitation obtained was consistent with the topographic sheets and to the ground control points, but a quite different from the official limit.

Keywords: watershed; SRTM; DEM; geotechnologies

1 Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH, instituída pela Lei 9.433 de 08 de janeiro de 1997, define como seu primeiro objetivo “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”. Para que este direito fosse assegurado a Lei estabeleceu fundamentos que dizem respeito aos princípios basilares da PNRH, sendo o quinto fundamento que “a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (Brasil, 1997).

A bacia hidrográfica é a área cujo escoamento das águas superficiais contribui para um único ponto denominado de exutório. Estas superfícies de terra são limitadas pelos chamados divisores de águas ou divisores de bacia hidrográfica. Ressalta-se que os limites da bacia são constituídos pelo perímetro da área a ser planejada a fim de facilitar o confronto entre as disponibilidades e as demandas de água essenciais para o balanço hídrico. A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento foi feita para atribuir maior base ambiental para o gerenciamento de forma que as unidades político-administrativas se obrigassem a executar ações coordenadas e integradas com base técnica para defenderem os interesses comuns (Silva, 2005).

Os limites de uma bacia são delimitados por dois tipos de divisores de água: um divisor condicionado pela topografia e um divisor freático ou subterrâneo (Villela & Matos, 1975). As técnicas aplicadas neste estudo abordaram somente o divisor topográfico que fixa a área contribuinte da bacia formada pelo rio e seus afluentes.

Talvez o maior problema nesta obtenção seja o caráter subjetivo utilizado na sua obtenção (Torres *et al.*, 2005). Isto tem feito com que diferentes operadores obtenham diferentes limites, sem, contudo haver necessariamente erro de algum deles. Este problema se torna ainda mais grave, se for considerada a necessidade de um limite acurado de bacia, para que se possa efetuar a outorga e cobrança da água pelo comitê de bacia.

Granell-Pérez (2001) e Guerra (1995) descrevem que a bacia hidrográfica ou a bacia de drenagem é constituída pelo conjunto de superfícies que, através de canais e tributários, drenam água de chuva, sedimentos e substâncias dissolvidas para um canal principal cuja vazão ou deflúvio converge numa saída única denominada de exutório ou foz do canal principal de um rio, lago ou mar.

Os limites da bacia são definidos pelos divisores topográficos ou divisores de águas onde as cristas ou cumes das elevações do terreno que separam as drenagens de duas bacias adjacentes (Guerra, 1995).

Estes limites são traçados pelos divisores de água e seus tamanhos podem variar de dezenas de metros quadrados até milhões de metros quadrados. As bacias de tamanhos diferentes articulam-se a partir dos divisores de água, integrando um sistema de drenagem organizado hierarquicamente. Assim, dependendo da saída única que for escolhida, uma bacia pode ser subdividida em sub-bacias e microbacias de menor dimensão (Granell-Pérez, 2001).

Segundo Santana (2003) o tamanho e os limites da bacia são importantes para determinar parâmetros do recurso água como total anual e potencial de enchente, para avaliar como, quando e onde aplicar medidas de manejo para o controle da qualidade da água, a quantidade ou o regime. O tamanho é uma consideração essencial no comportamento hidrológico, é um dos parâmetros mais difíceis de modelar em uma bacia.

Em relação ao regime jurídico, o dos recursos hídricos começou a ser definido ainda no século XIX, apesar de omissão quanto à questão da preservação e distribuição equitativa do consumo de água, iniciou com a Lei Imperial de 1º de outubro de 1828. A Constituição da República dos Estados Unidos do Brasil de 16 de julho de 1934 foi a primeira Constituição a abordar o regime jurídico das águas (Silva, 2005).

À medida que o país foi crescendo, a utilização da água foi aumentando e os problemas relativos aos recursos hídricos foram se multiplicando e se destacando. Com isso, foi necessário modernizar a legislação o que começou a ocorrer, basicamente,

com a Constituição Federal de 1.988 (Hubert *et al.*, 2002). Com ela vigoraram algumas modificações positivas como a permissão da gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos.

A Lei Federal 9.433 de 08 de janeiro de 1997 (Brasil, 1997), que regulamentou o inciso XIX do art. 21 desta constituição, consagrou alguns princípios como: a água é um recurso natural limitado; bem de domínio público e dotado de valor econômico; a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos; a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

O artigo 8º da Lei 9.433 dispõe que os Planos de Recursos Hídricos deverão ser elaborados por bacias, por Estado e para o país. Três planos poderão ser concebidos: o Plano Nacional, os Planos Estaduais de Recursos Hídricos e Planos de Bacias Hidrográficas. Estes últimos podem incluir dois tipos de bacia: aquelas em que os cursos de água se inserem totalmente em um Estado - Plano Estadual de Bacia Hidrográfica de Rios sob domínio Estadual, e aquelas que alguns cursos de água se inserem em mais de um Estado - Plano de Bacia Hidrográfica de Rios sob o domínio Federal (Lanna & Pereira, 2002).

A bacia hidrográfica é a unidade ambiental de planejamento mais apropriada porque recebe diretamente todos os impactos positivos e negativos decorrentes de alterações do uso do solo, às vezes originados de políticas públicas. A bacia deve ser adotada como unidade territorial de planejamento e gerenciamento ambiental, no entanto, existem algumas vantagens e desvantagens. A vantagem é que a rede de drenagem de uma bacia pode ser capaz de indicar relações de causa-efeito, particularmente àquelas que envolvem o meio hídrico. A desvantagem é que nem sempre os limites municipais e estaduais respeitam os limites da bacia (Lanna, 1995).

Este artigo apresenta como principal produto uma avaliação da técnica de delimitação de divisor de bacia hidrográfica a partir do modelo digital de elevação - MDE, alimentado pelos vetores das cartas

topográficas oficiais da Divisão do Serviço Geográfico - DSG e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE e pelos dados altimétricos levantados pela Missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

O objetivo geral desta pesquisa foi elaborar o divisor de bacia hidrográfica do Rio Formoso a partir do modelo digital de elevação SRTM em ambiente SIG, onde pode-se avaliar o uso de técnicas de geoprocessamento na obtenção automática, com a mínima interferência do operador, usando divisor da bacia do Rio Formoso como estudo de caso. Posteriormente foi realizada a comparação entre o divisor de bacia elaborado pelo SRTM com o divisor oficial, fornecido pelo Instituto de Meio Ambiente do Pantanal do Mato Grosso do Sul – IMASUL, onde pode-se avaliar a eficácia na utilização dos dados SRTM para delimitação de bacia hidrográfica para auxiliar a implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul.

2 Área, Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A bacia do Rio Formoso está localizada na porção Leste do Estado de Mato Grosso do Sul, compreendida entre as coordenadas 55°30' e 57° de longitude Sul e 21° e 22° de latitude Oeste (Figura 1) e está inserida no Município de Bonito - MS, possui uma área de aproximadamente 147.536 ha e perímetro de 190 km (MS, 2005).

Esta bacia compreende 23 municípios e é uma importante contribuinte hídrica da bacia do Rio Paraguai pertencente à grande bacia do Rio Prata, a quarta maior em extensão no mundo. Em relação às outras bacias que drenam o Pantanal sul-mato-grossense, destaca-se devido a enorme variabilidade do relevo englobando unidades fisiográficas distintas como a planície pantaneira, a escarpa da Serra de Maracajú, o planalto de Campo Grande e no oeste está na borda da Serra da Bodoquena. Com uma população de 16.956 habitantes, Bonito tem como atividade econômica principal o turismo, mas tem também a mineração, principalmente em calcário, ainda em mármore, cobre, dolomita, areia, calcita industrial.

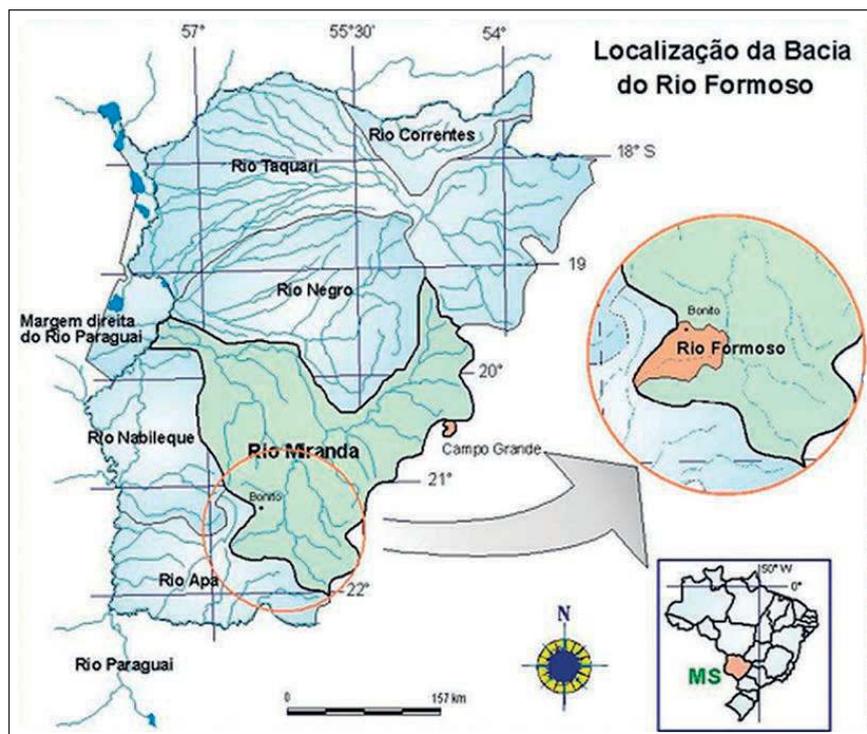


Figura 1 Localização da bacia do rio Formoso inserida na bacia do Rio Miranda.

A bacia do Rio Formoso é de terceira ordem, é sub-bacia da bacia do Rio Miranda, que por sua vez é sub-bacia do Rio Paraguai (Figura 2). A bacia do Rio Miranda é uma das principais bacias do Estado e uma das maiores também, corresponde a 12% da área total de Mato Grosso do Sul com 43.787 km².

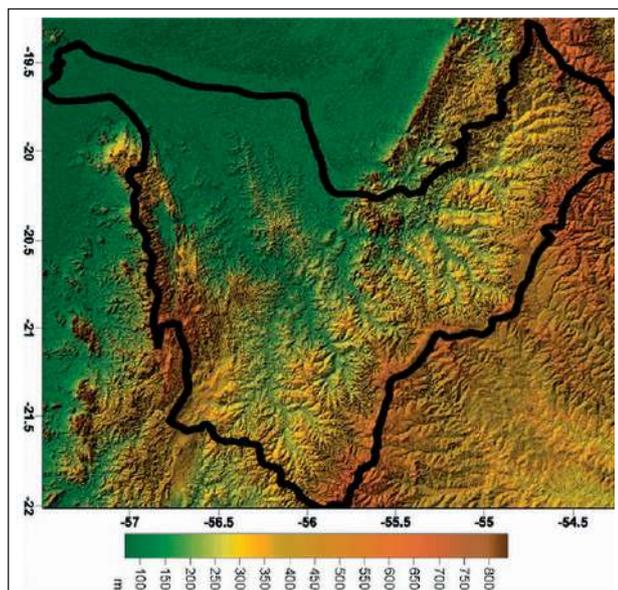


Figura 2 Ilustração do MDE da bacia do Rio Miranda em 2D. O divisor cedido pela IMASUL-MS está sobre o modelo da SRTM em cores hipsométricas.

O Rio Formoso é um dos afluentes da margem esquerda do Rio Miranda, drena áreas do planalto da Bodoquena e tem como predomínio as rochas carbonáticas. Esta bacia possui lineamentos tectônicos, representados por falhas e fraturas, constituindo zonas polarizadoras do fluxo e armazenamento de águas subterrâneas, exercendo forte controle da rede de drenagem superficial. Estas feições geológicas, por representarem situações de maior porosidade e permeabilidade do subsolo, polarizam os processos de dissolução e precipitação de carbonatos de cálcio e carbonatos de magnésio na formação de estalagmites e estalactites representando importantes atrações ecoturísticas na região de Bonito (Mendes *et al.*, 2004).

Quanto aos recursos hídricos, em termos qualitativos, é uma das regiões mais sensíveis devido a intensa atividade de ecoturismo nos municípios de Bonito e Jardim. A enorme expansão do ecoturismo exige cuidados especiais, em face da fragilidade dos ecossistemas cársticos, onde a água subterrânea adquire importância preponderante nas relações rio-aquífero. Destaca-se a importância dos recursos hídricos desta bacia, comportando-se como indutora de atividades de ecoturismo na região de Bonito, em

face das características espeleológicas envolvidas. Este potencial de desenvolvimento econômico vinculado ao turismo constituindo um ambiente suscetível à alteração da qualidade da água subterrânea (Mendes *et al.*, 2004).

A vegetação da bacia do Rio Formoso é constituída predominantemente pelo Cerrado, mas na borda oeste da bacia constitui as escarpas da Serra da Bodoquena existindo remanescentes da Mata Atlântica, de transição do Cerrado e de Floresta Estacional Residual Além do relevo, a vegetação da Serra da Bodoquena contribuiu com a criação do Parque Nacional em setembro de 2000 (Mendes *et al.*, 2004).

2.2 Recursos Computacionais

A metodologia do trabalho utilizou os seguintes softwares: Geomatica (PCI, 2002) para aplicação do geoprocessamento incluindo a modelagem e o processamento digital de imagem, Systat (Systat, 2000) para a análise estatística de tendência e destaque dos resíduos e

Variowin (Pannatier, 1996) para a escolha do semivariograma. O Geomatica (PCI, 2002) foi utilizado para eliminar as falhas do MDE da SRTM, para seleção das amostras e exportação dos arquivos para o formato ASCII, além disso, foi usado na mosaicagem, no processamento digital de imagem - PDI e na preparação do material para controle de campo.

Na seqüência o Systat (Systat, 2000) serviu para fazer a análise de tendência e obtenção dos resíduos, no processamento dos valores numéricos da SRTM. Em seguida, com os dados obtidos no Systat, no software Variowin (Pannatier, 1996) foram escolhidos os melhores semivariogramas, isto é, as funções teóricas que melhor representaram o relevo para as amostras escolhidas. E finalmente, no software Geomatica (PCI, 2002) o modelo foi krigado, com base na escolha do melhor semivariograma e os respectivos valores de entrada para: alcance ou range, patamar ou sill, efeito pepita ou nugget effect e contribuição, previamente calculados pelo Variowin (Pannatier, 1996).

E a partir do MDE da SRTM krigado com o semivariograma escolhido, em Geomatica (PCI,

2002), fechou-se a seqüência metodológica, gerando os limites de bacia da bacia do Rio Formoso, juntamente com suas sub-bacias. Para edição e elaboração de mapas e figuras de localização o software utilizado foi o Freehand (Macromedia, 2000) com o SIG Mapublisher (Avenza, 2001) plugado.

2.2.1 Obtenção dos Dados

As imagens da Missão SRTM foram adquiridas na página da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Para a América do Sul os dados estão disponíveis em uma resolução de 90 metros. As imagens foram copiadas do site no formato “.hgt” e posteriormente transformadas em “.geotiff”. Cada cena possui 1° de latitude por 1° longitude para facilitar a manipulação e a mosaicagem e estão distribuídas em 1201 linhas por 1201 colunas. As informações necessárias à transformação de hgt para geotiff encontram-se nas notas para os usuários.

O nome dos arquivos SRTM refere-se à latitude e longitude do canto inferior esquerdo

(lower left), por exemplo, o nome do arquivo S23W058.hgt possui coordenadas do canto esquerdo inferior de 23° Sul de latitude e 58° Oeste de longitude. Estas coordenadas referem-se ao centro geométrico do pixel inferior esquerdo.

Com resolução espacial de 90 metros, a diferença da primeira versão SRTM para a segunda consistiu em uma atualização e edição, feita pela própria NASA, a fim de definir melhor as linhas de contato das margens dos espelhos d'água. Esta segunda versão também ficou conhecida como a versão finalizada e além do melhoramento das margens hídricas, também houve uma edição na correção de sinks e peaks. Mesmo com esta edição, a versão 2 ainda apresenta os voids - vazios.

A Versão 2 também traz junto com as imagens editadas, os vetores extraídos nas linhas litorâneas, denominados de SRTM Water Body Data - SWBD. Para exemplificar a diferença dos dados SRTM versão 1 e versão 2, a Figura 3 traz no detalhe, na imagem à direita, o cursor amarelo em cima da foz do Rio Miranda desaguando sobre o leito do Rio Paraguai e as respectivas informações de elevação estão dispostas nas tabelas à esquerda. O cursor em amarelo

lo sobre o MDE mostra na primeira janela de dados os valores originais da edição do SRTM Version 2, e a janela dos dados abaixo mostra os valores dos pixels com falhas “-32.768” da primeira versão.

A primeira tabela refere-se aos dados altimétricos da Versão 2 da SRTM e a segunda tabela abaixo reflete os dados altimétricos da Versão 1 da SRTM. Repare que a Versão 1 possui valores de falha representados pelo valor “-32.768”, enquanto a Versão 2 SRTM, que foi editada, para os mesmos pixels possui outros valores representando uma altimetria coerente com a topografia de entorno dessa região, isto acontece porque a maioria dos valores de falha das imagens SRTM Versão 2 foram corrigidas. Esta edição proporciona aos usuários uma grande melhora na aplicação dos dados SRTM.

2.2.2 Preparação dos Dados

Para a mosaicagem da área que compõe a bacia do Rio Formoso foram selecionadas duas cenas com largura de 1° de longitude por 1° de latitude. O mosaico foi reprojeto de WGS84 para o datum horizontal Córrego Alegre, igual às cartas topográficas oficiais do DSG/IBGE. O tratamento dos dados consistiu na modificação do modelo original SRTM para um novo modelo com resolução mais refinada, passando os pixels de 90 metros para 30 metros. Entre

as modificações compreenderam ainda: remoção das falhas, obtenção dos dados em ASCII, refinamento da resolução espacial de 90 metros para 30 metros utilizando como interpoladores vizinho próximo, bilinear e convolução cúbica e krigagem com a escolha do melhor semivariograma.

2.2.3 Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação - MDE é um exemplo de utilização dos modelos digitais de terreno ou modelos numéricos de terreno. Estes modelos representam uma superfície espacial cuja grandeza é em geral contínua e o fenômeno por ela representado pode ser variado. É possível modelar temperatura, criminalidade, doenças, dados geoquímicos e a elevação é mais um exemplo destas grandezas. Rocha (2000) afirma que o termo modelo numérico de terreno foi utilizado pela primeira vez em 1955 no *Massachusetts Institute of Technology* e hoje não traduz apenas a superfície altimétrica do terreno.

Inicialmente o termo MDE foi utilizado para os dados de elevação fornecidos pelo *United States Geological Service* que adotava o termo *Digital Terrain Elevation Data* para os dados de elevação gerados pela *Defense Mapping Agency* (Schrader & Pouncey, 1997). O modelo numérico de terreno é um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pon-

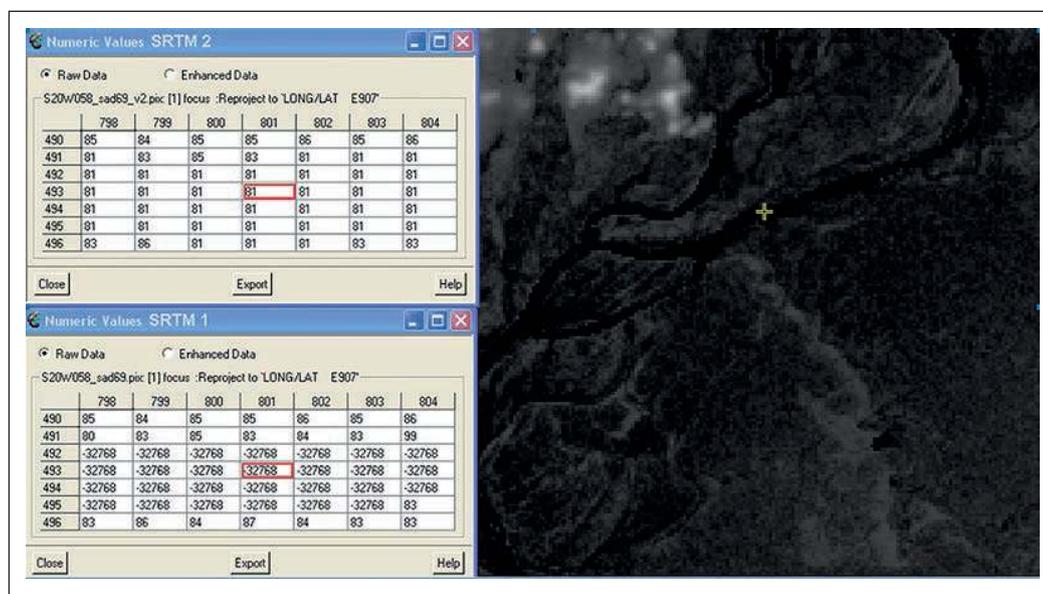


Figura 3 Comparação dos MDEs das Versões 1 e 2 da SRTM para uma mesma localização.

tos xy , em um referencial qualquer, com atributos z , que descrevem a variação contínua da superfície (Câmara & Medeiros, 1998).

Os modelos numéricos representam matematicamente a distribuição espacial, com dados contínuos, de um fenômeno que ocorre numa região da superfície terrestre (Felgueiras & Câmara, 1998). Estes fenômenos podem ser dados topográficos, geológicos, meteorológicos, geofísicos, profundidades do mar ou de um rio. O MDE representa exclusivamente a distribuição espacial da altimetria na superfície terrestre, relacionando diretamente os pontos xy com os respectivos valores de elevação Z .

Em ambiente SIG o modelo digital de elevação pode ser gerado a partir de dados vetoriais como curvas de nível, hidrografia, pontos cotados, malha regular de pontos - *grid* ou irregular, ou ainda a partir de pares estereoscópicos. O sistema interpola as informações e gera uma superfície de dados contínuos - *raster* com o valor de elevação atribuído em cada célula na forma de *pixel*.

Segundo Felgueiras (1997) um sistema de modelagem digital de terreno compreende: a aquisição de um conjunto de mostras representativas do fenômeno a ser estudado; a criação do modelo digital propriamente dito; a definição de uma série de processamentos de análises sobre os modelos com a finalidade de se extrair informações úteis à uma aplicação de geoprocessamento. Estas análises permitem gerar imagens sombreadas, calcular volumes de aterro e corte, mapeamentos de declividade, mapas de drenagem, mapas de curva de nível.

2.2.4 SRTM

A utilização de modelos digitais de elevação obtidos por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a carência de mapeamentos. Grande parte do território da América do Sul é provida de mapeamento em escalas demasiadamente generalizadas para várias utilizações topográficas. Assim, a resolução de 90 metros dos dados SRTM representa um importante avanço em relação às alternativas disponíveis (Valeriano, 2005).

A bordo do ônibus espacial Endeavour, a Missão de Radar Topográfico em Ônibus Espacial mais

conhecida pela sua sigla em inglês SRTM, de “*Shuttle Radar Topography Mission*”, gerou o mais completo dado topográfico do mundo, um gigantesco arquivo de dados com 12 *terabytes* referente à 80%, da massa de terra emersa do planeta (área contida entre as latitudes 60°N e 56°S). Os dados gerados na missão disponibilizaram ao usuário final um MDE com uma resolução espacial de 90 metros, ou 3 arc-segundos (3”), para todo o mundo, com exceção da área dos Estados Unidos que foi disponibilizada com uma resolução maior, 30 metros, ou 1 arc-segundo (1”). Estes dados estão disponíveis gratuitamente na *internet*, pelo *site* do USGS *Eros Data Center* - Centro de Dados do Departamento de Levantamento Geológico dos Estados Unidos, disponível em <http://srtm.usgs.gov/>.

Os modelos gerados pela SRTM possuem uma boa acurácia, fornecendo uma confiabilidade vertical de 90%, e a vantagem de prover MDE homogêneos (Rabus *et al.*, 2003). Higa *et al.* (2006) avaliaram a precisão vertical do modelo digital de elevação da SRTM para todo o Estado de Mato Grosso do Sul, comparando as altitudes SRTM com as alturas ortométricas dos marcos da Rede GPS do Estado e de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (Brasil, 1984), e constataram a possibilidade de utilização altimétrica destes dados nas escalas 1:30.000 para *Classe A*, 1:25.000 para *Classe B* e 1:20.000 para *Classe C*.

A SRTM possui duas versões disponíveis na *internet*: SRTM *Version 1* e *Version 2*. Esta segunda sofreu uma correção de falhas como *sinks* e *peaks* e, possui um delineamento no formato vetorial dos limites das margens litorâneas ou de outras lâminas de água pronunciadas. De acordo com as orientações do *Jet Propulsion Laboratory* neste trabalho foram utilizados os dados da SRTM versão 2 por estarem mais corrigidos que a versão 1. Porém estas correções basearam-se em edições em espelhos d’água não alterando os demais conteúdos dos dados SRTM.

Dentre algumas das aplicações dos dados do programa estão: o desenvolvimento sustentável da agricultura, os programas de manejo de bacias hidrográficas, a preservação dos recursos florestais, o zoneamento ecológico e econômico - ZEE, os estu-

dos de conservação de solos para identificar e evitar erosões e até a implantação de eletrificação rural e de estradas. Analisando os mapas verificam-se, dependendo da direção, os declives ou aclives de uma estrada, além de sua altitude, o que pode facilitar o planejamento de viagens e transporte de cargas, por exemplo. Os mapas da SRTM podem contribuir também para a melhoria da cartografia altimétrica existente, principalmente em áreas isoladas, como a Amazônia (Miranda, 2005).

2.2.4.1 Interpolação do SRTM

No presente artigo, realizou-se uma interpolação utilizando o método do vizinho mais próximo para aumentar a resolução espacial de 90 metros para 30 metros. A vantagem deste método é a rapidez computacional. Este método preserva o valor do digital number após a interpolação não envolvendo nenhuma média. Realizou-se também uma interpolação utilizando o método bilinear para aumentar a resolução espacial de 90 metros para 30 metros.

A característica deste método é de não suavizar tanto o modelo. Este método é indicado para fazer o adensamento de grade de modelos digitais de elevação quando não se deseja suavizá-los (Souza & Loch, 2006). E ainda uma terceira interpolação foi executada utilizando o método convolução cúbica para aumentar a resolução espacial de 90 metros para 30 metros. Este método elimina os picos topográficos sem significado, obtendo um plano que mais aproximadamente representa a tendência geral da topografia.

2.2.4.2 Interpolação do SRTM Utilizando Krigagem

Esta metodologia consistiu em fazer: a análise de tendência e obtenção dos resíduos, escolha do semivariograma mais adequado e então, a aplicação das técnicas de geoprocessamento propriamente ditas para a obtenção das redes de drenagens, linhas de direção de fluxo de escoamento superficial e o limite do divisor da bacia do Rio Formoso.

Em um estudo geostatístico a primeira providência é efetuar uma análise exploratória dos dados

(Landim, 2003). Para isso foi feito Systat 10.2 (Systat, 2000) uma análise de regressão linear adotando xy como variáveis independentes e z como variável dependente. Esta análise gerou o resíduo para cada par de coordenadas xy. Posteriormente à análise exploratória dos dados efetuou-se a análise variográfica ou estrutural.

Primeiramente, foi calculado os possíveis pares de valores à serem utilizados na confecção do semi-variograma através do aplicativo PREVAR.EXE. Devido a capacidade de memória deste programa, a matriz de dados aceitável é de no máximo 1.000 amostras e 48 variáveis, isto é, até um máximo de 16384 pares. Apesar de este aplicativo calcular até 48 variáveis, a análise é feita em apenas uma variável por vez (Landim, 2003).

No aplicativo VARIO.EXE foi feita a análise variográfica em duas dimensões. A análise variográfica que atinge seu auge com a modelagem, interpreta a estrutura de correlação espacial de dados procurando quantificá-la. Com isso, fornece os pesos referentes aos valores estimados para o processo estimativo da krigagem e desse modo controla a qualidade dos resultados. A modelagem é o ajuste de um variograma experimental a um modelo teórico, este passo é fundamental na análise variográfica. No Variowin o ajuste é manual estando sujeito a erros, pois não é feito com o auxílio de algoritmos para ajuste automático. Nestas tentativas manuais a experiência do usuário pesa muito (Landim, 2003).

2.3 Tratamentos Geoestatísticos

Para desenvolver as técnicas de krigagem, foram utilizados dados como: alcance (range), patamar (sill), efeito pepita (nugget effect) e contribuição. O semivariograma experimental foi determinado a fim de se obter o melhor ajuste do modelo teórico ao terreno real, ou seja, com a menor geração de resíduos possível. Para isso a imagem raster SRTM foi exportada em um arquivo de coordenadas xyz, formato ASCII, com um arc-segundo ou 30 metros de resolução espacial para xy. Nesta etapa foram excluídos os pixels com falhas de valores correspondentes à “-32768” (sinks). Em seguida o arquivo ASCII foi convertido para um layer vetorial de pontos e, pos-

teriormente, krigado utilizando os valores do melhor modelo teórico analisado no semivariograma.

A preparação da imagem até esta etapa é muito importante, pois se a krigagem for feita sem a remoção das depressões, falhas, speckles, o sistema utilizará como valor base o valor da falha, por exemplo, o valor “-32.768”, somando este valor para todas as células, mascarando o valor real da elevação e comprometendo os algoritmos posteriores de modelagem de bacia.

2.4 Delimitação de Bacias Hidrográficas

A metodologia de delimitação de bacia hidrográfica através da utilização do MDE obtido por RADAR interferométrico deve ser composta de: preenchimento de sink e peaks, determinação das direções de fluxo, cálculo das áreas acumuladas, determinação das exutórias de modo automático e por fim extração dos limites das bacias hidrográficas. As bacias foram modeladas obedecendo às mesmas rotinas de algoritmos para a topografia de planalto e de planície.

Preenchimento das depressões As depressões e as áreas planas geram mapas de fluxo com dados inconsistentes. Para que isso não aconteça, a imagem deve passar por um processo de preenchimento de sinks. O algoritmo fill depression gera dados digitais de elevação com as depressões preenchidas.

O modelo digital de elevação original sofreu correções para a eliminação de sinks e peaks ainda existentes, para posteriormente ser utilizado na geração das direções de escoamento superficial. A formação desses sumidouros e picos é comum na própria geração do MDE (Tarboton, 1991), por isso existem algoritmos específicos para esta correção. Estes sinks são considerados impedimentos ao escoamento quando ocorre a aplicação de modelos chuva-vazão, modelos sedimentológicos e de poluentes de origem difusa (Mendes *et al.*, 2004).

2.4.1 Direção do Fluxo

O algoritmo flow direction indica a direção de fluxo para cada pixel. A partir do MDE foram rea-

lizadas as correções das depressões, determinou-se as direções dos fluxos considerando que cada pixel drena a água para um de seus oito pixels vizinhos. Seguindo a metodologia do algoritmo D8 Isto ocorre de acordo com uma linha de maior declividade do terreno. Este mapa foi gerado a partir da imagem de RADAR com as depressões preenchidas.

2.4.2 Direção de Fluxo Acumulado

Com a utilização do algoritmo flow direction foi gerado um grid indicando os valores de direção para cada pixel indicando o vizinho de maior declividade. O algoritmo flow accumulation indica dados de acumulação de fluxo para cada pixel um valor igual ao total de células que estão drenando em sua direção. E nesta etapa ainda existe o algoritmo flow delta indica os valores de delta para cada pixel igual ao crescimento nos valores de acumulação de fluxo na direção do fluxo, ou seja, onde está formando um volume maior de água. Cada pixel recebeu o valor correspondente ao somatório das áreas de todos os pixels cujo escoamento distribui para o pixel analisado (Jenson & Domingue, 1988).

2.4.3 Determinação das Exutórias de Modo Automático

Foram gerados os pontos de encontro dos fluxos de água do escoamento ou seeds, que foram gerados a partir do grid de fluxo de acumulação e o grid do fluxo delta, isto é, são os pixels com informações onde ocorre maior ocorrência de volume de água. Neste aplicativo também é possível inserir os pontos em formato “.txt” com as coordenadas XYZ da localização exata das exutórias previamente levantados para a geração dos contornos das bacias e sub-bacias desejadas.

Nesta etapa existe o limiar de drenagem ou drainage threshold que é o valor mínimo do pixel para a drenagem ser detectada. A partir deste valor pré-determinado é que serão agrupados os pixels para iniciar o processo de agrupamento das sub-bacias. Este valor é que determina a ordem da bacia de entrada. Podem-se alterar os valores conforme a opção de tamanho para a geração das sub-bacias, quan-

to maior o limiar maior será o tamanho da subbacia e menor será sua ordem.

2.4.4 Bacia Hidrográfica

O último procedimento foi utilizar os layers dos pontos de contribuição e do fluxo de direcionamento do escoamento para a geração dos divisores de bacias hidrográficas todos obtidos a partir do modelo digital de elevação.

2.5 Controle de Campo

Foi realizado ainda, em diferentes etapas, totalizando cerca de 20 dias de trabalho, o controle de campo, identificando in loco o divisor de bacias, com o apoio de receptor GPS de navegação (Magellan Meridian), altímetro digital e imagens Landsat, utilizando-se como apoio os limites preliminares das bacias do Rio Miranda e Formoso. Manteve-se o erro médio do receptor GPS abaixo de 10m (Figura 4).

3 Resultados e Discussão

Para a krigagem do MDE, primeiramente foram selecionados os melhores modelos teóricos analisados na bacia do Rio Formoso. A amostragem das células para a análise variográfica foi aleatória sistemática e iniciou com a escolha de pequenas áreas de 30 x 30 pixels distribuídas em toda a bacia. Estas áreas foram coletadas determinando uma grade de 1 x 1 km e delimitadas a célula de 30 x 30 pixels no canto superior esquerdo por toda a área da bacia do Formoso.

Depois de coletadas, as amostras, foram transformadas em formato ASCII para análise

de seus resíduos, isto feito no software Systat b (Systat, 2000), tendo como variável dependente z e independentes xy. Com os resíduos foi elaborada uma lista de valores x, y, z-resíduos e em seguida fez-se a análise variográfica para as 18 amostras. A

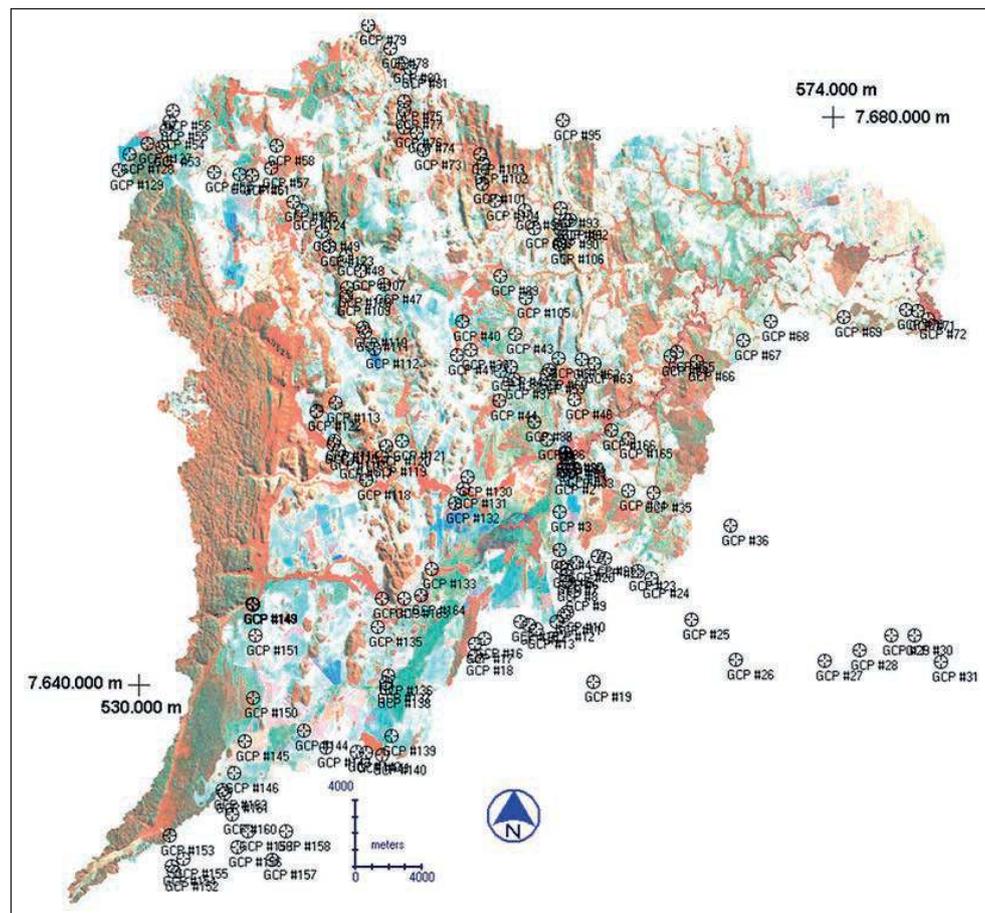


Figura 4 Pontos de controle ao solo, levantados durante a primeira viagem de campo.

análise variográfica foi realizada no Variowin (Panatier, 1996) e resultou em 18 semivariogramas respectivos às amostras coletadas.

Para utilizar os dados dos melhores semivariogramas foi realizado uma média para cada um dos valores e aplicado na krigagem o modelo gaussiano com pepita de 0,054975, range de 0,006175 e sill de 0,9725. Com os dados dos semivariogramas a krigagem foi feita e se mostrou o melhor resultado para a delimitação de bacia.

Durante a conferência da localização do divisor da bacia do Formoso em campo, houve dificuldade na sua determinação em locais onde a topografia do terreno é plana. Para identificar a direção de caimento do divisor no trecho sul da bacia necessitou-se o auxílio de um clinômetro. As áreas da bacia do Formoso e das duas sub-bacias principais foram: Rio Formoso com 145.740,43 ha e perímetro de 266,48 km, Córrego Anhumas com 20.586, 99 ha e perímetro de 92,36 km, Rio Mimoso com 27.035 ha e perímetro de 113,89 km.

Com pontos coletados em dois trabalhos de campo foram avaliados os limites gerados, que se mostraram coerentes e precisos com a realidade de campo obedecendo a escala de trabalho de 1:100.000 de acordo com as cartas topográficas do DSG/IBGE. A Figura 5 apresenta a sobreposição entre o divisor obtido a partir da krigagem do MDE e os pontos coletados em trabalhos de campo.

Foi observado e monitorado ainda que na superfície do modelo SRTM existem artefatos gerados pela vegetação que podem alterar o posicionamento do divisor de bacias. As áreas e perímetros calculados das duas sub-bacias do Formoso foram: na bacia do Córrego Anhumas, uma área de 20.166, 83 ha, com perímetro de 91,34 km e na bacia do Rio Mimoso a área de 27.064 ha, com perímetro de 114,61 km.

A principal discussão no resultado do levantamento desse divisor de bacia foi quanto ao formato obtido para a bacia do rio Formoso. Inicialmente foram adquiridos os limites da bacia através do órgão ambiental estadual IMASUL-MS e comparados aos

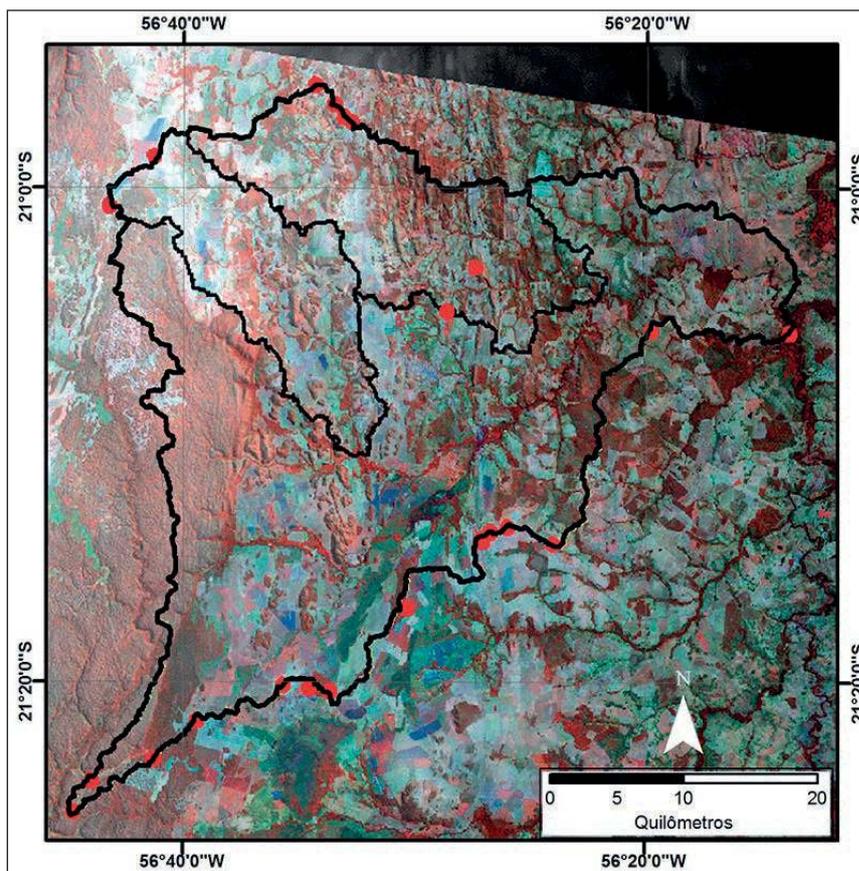


Figura 5 Pontos coletados em campo sobre o divisor de bacia do Formoso, Mimoso e Anhumas.

obtidos a partir do MDE da SRTM, com o apoio de técnicas de geoprocessamento. O principal destaque está na região sudoeste dos limites modelados com os dados SRTM (Figura 6). O limite modelado com os dados SRTM mostrou-se coerente e consistente com os dados levantados em campo.

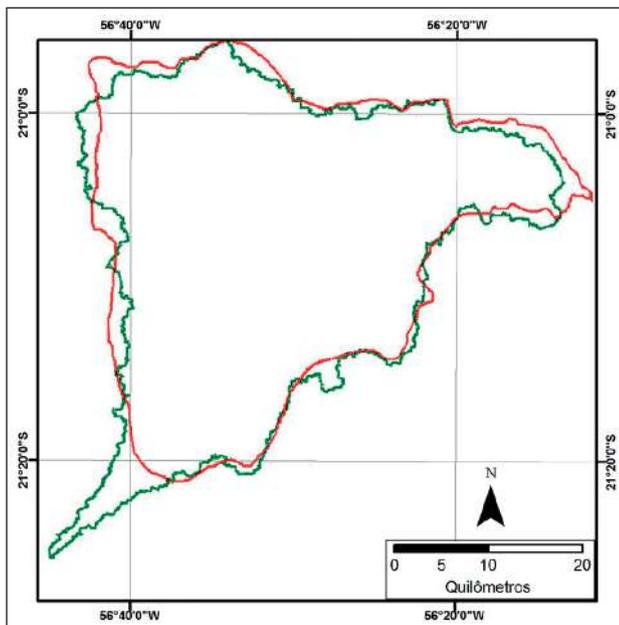


Figura 6 Ilustração dos diferentes divisores para a bacia do Rio Formoso: em vermelho obtido do órgão ambiental estadual (IMASUL-MS) e em verde o limite delimitado a partir dos dados SRTM em ambiente SIG e consistente com os resultados levantados em campo.

O modelo de elevação da SRTM obteve confusão ao gerar os divisores de bacia na região de exutório da bacia do Rio Formoso, sem o prévio tratamento geoestatístico do MDE. Talvez por ser uma área muito plana e o modelo SRTM imagear os objetos nele presentes, por exemplo, árvores, capões, instalações na área do Pantanal onde a declividade é muito baixa, estes objetos podem ter um grande papel de erro.

Por isso a necessidade da utilização de técnicas de krigagem, uma vez utilizada esta técnica ela suaviza as feições muito abruptas permitindo uma melhor homogeneização dos dados locais sem perder a precisão, com contornos suaves e sem artefatos indesejáveis (LANDIM, 2003).

O principal resultado deste trabalho foi a técnica de determinação dos limites de bacia do Formoso. Além da diferença de formato, existe uma di-

ferença significativa de área, principalmente no sul da bacia com cerca de 1795 ha apenas neste trecho. As Figuras 7 e 8 apresentam os limites de bacia e a drenagem vetorizada das cartas topográficas e a rede de drenagem gerado no MDE krigado. A drenagem da carta e do MDE estão dentro do divisor krigado, porém a rede de drenagem cartográfica e a gerada a partir do DEM não estão dentro do limite da IMASUL.

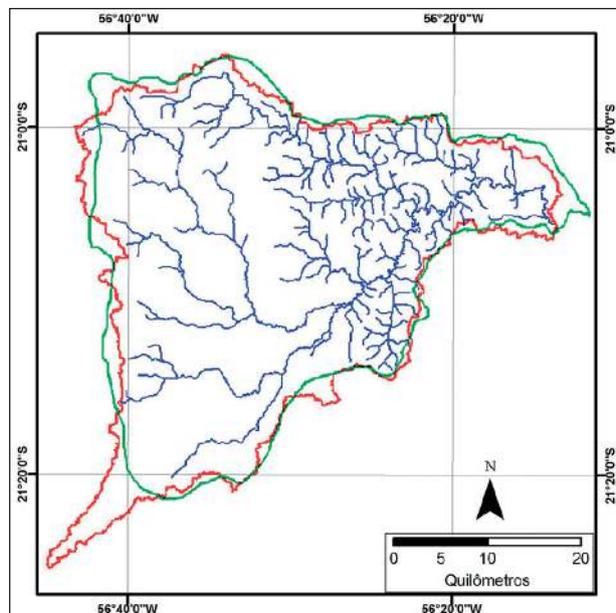


Figura 7 Comparação dos limites de bacia, com a rede de drenagem vetorizados na carta topográfica escala 1:100.000.

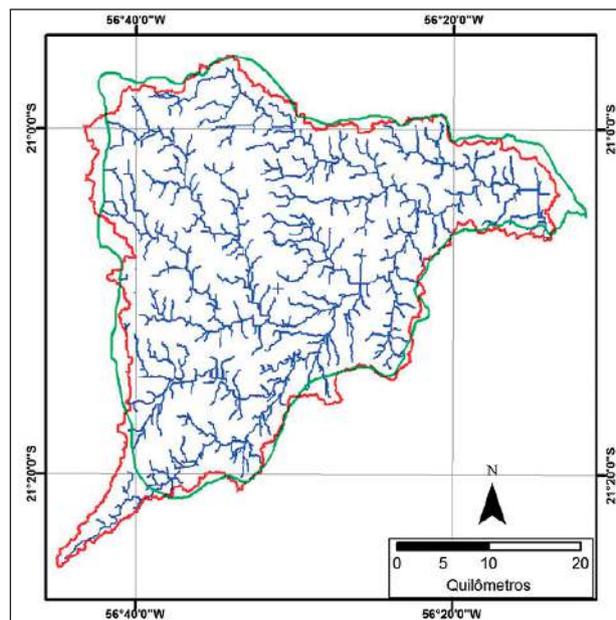


Figura 8 Comparação dos limites de bacia com a rede de drenagem, ambos extraídos do SRTM krigado.

4 Conclusão

A utilização das ferramentas de geotecnologias permite delimitar e avaliar os divisores

de bacia hidrográfica obtidos a partir de modelos digitais de elevação. Mesmo possuindo características indesejáveis, do ponto de vista da modelagem topográfica, como a sensibilidade a quaisquer objetos presentes sobre a superfície do terreno, tais como antenas, edificações e mesmo variações da cobertura vegetal, que dificultam a percepção da superfície do terreno em si, principalmente nas áreas mais planas, a utilização desta técnica automática permite delimitar os divisores de bacia se mostrando eficiente com mínima interferência do operador salvo na análise dos semivariogramas.

O limite obtido para a bacia do Rio Formoso neste trabalho é condizente com as cartas topográficas oficiais do DSG/IBGE escala 1:100.000, bem como com os dados de controle obtidos em campo. Isto permite indicar que, em situações semelhantes, o modelo SRTM é fonte de dados e referência para modelagem de divisores de bacia hidrográfica. Os resultados obtidos em SIG são confiáveis e este se mostra como o meio para padronizar a obtenção de divisores de bacia de modo impessoal, o que permite a diferentes usuários, obterem limites de bacia compatíveis entre si e coerentes com a realidade de campo.

A utilização de geoprocessamento e sensoriamento remoto apresenta-se como uma eficiente ferramenta para automatizar processos mecânicos facilitando e acelerando os trabalhos. Assim, o uso dos dados de RADAR SRTM contribuiu com eficiência e rapidez na delimitação da área de bacia hidrográfica do Rio Formoso. Os dados de acurácia levantados em campo sugerem que os dados da SRTM podem ser utilizados como apoio para a delimitação de bacias hidrográficas, podendo auxiliar assim a implementação das Políticas de Recursos Hídricos.

A aplicação da krigagem se mostrou eficiente para delimitar o divisor da bacia do Rio Formoso e foi comprovada em campo. O limite gerado a partir dos dados remotos SRTM foi condizente com o campo, diferente do limite oficial da IMASUL-MS.

Esta técnica, porém, necessita de um operador treinado para realizar as análises dos semivariogramas. Esta análise é a etapa mais importante do trabalho e também a mais subjetiva levando em consideração a experiência do analista na metodologia de krigagem.

5 Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela Bolsa de Mestrado de Thais Gisele Torres Catalani e pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa de A.C. Paranhos Filho (Processo 304122/2015-7).

6 Referências

- Avenza Systems Inc. 2001. MaPublisher version 4.0. Inc Canadá.
- Brasil. 1984. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d89817.htm>. Acesso em julho de 2018.
- Brasil. 1997. Lei 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Lex: coletânea de legislação: edição federal.
- Câmara, G. & Medeiros, J.S. 1988. Mapas e suas representações computacionais. In: ASSAD, E.D. & Sano, E.E. (ed.) *Sistemas de informações geográficas. Aplicações na agricultura*. 2º ed. rev. e ampliada. Embrapa Serviço de Produção de Informação, Brasília, DF. 434 p.
- Felgueiras, CA. 1997. Análises sobre Modelos Digitais de Terreno em Ambiente de Sistemas de Informação Geográfica. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL, 8, Venezuela.
- Granel-Pérez, M.D.C. 2001. *Trabalhando geografia com as cartas topográficas*. Ed. Unijuí: Ijuí, Rio Grande do Sul. 128 p.
- Guerra, A.J.T. 1995. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B (org.). *Geomorfologia: uma atualização de base e conceitos*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2ª ed. p. 149-209.
- Higa L.T.; Paranhos Filho A.C.; Torres T.G. & Salles A.T. 2006. Avaliação da precisão vertical do modelo SRTM para a bacia do rio Paraguai no Estado de Mato Grosso do Sul. In: 1º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. Embrapa Informática Agropecuária / INPE. Campo Grande, Brasil. p. 834-840.
- Hubert, G.; Pereira, J.S. & Lanna, A.E.L. 2002. Os novos Instrumentos de Planejamento do Sistema Francês de Gestão de Recursos Hídricos: I - Apresentação e Análise. *Revista Brasileira de Recursos Hídrico*, 7(2): 87-107.
- Jenson, S.K. & Domingue, J.O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engi-*

- neering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600.
- Landim, P.M.B. 2003. *Análise estatística de dados geológicos*. 2. ed. revisada e ampliada – São Paulo: Editora UNESP. 217 p.
- Lanna, A.E.L. 1995. *Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos*. Brasília, DF. IBA-MA. 171 p.
- Lanna, A.E.L. & Pereira, J.S. 2002. Os novos Instrumentos de Planejamento do Sistema
- Francês de Gestão de Recursos Hídricos: II - Reflexões e Propostas para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(2): 109-120.
- Macromedia In. 2000. *Freehand version 9*. San Francisco - Califórnia.
- Poder Legislativo do Estado do Mato Grosso do Sul - MS. 2005. *Gerenciamento de Recursos Hídricos nas Vizinhanças da Cidade de Corumbá (MS)*. Relatório de Qualidade das Águas Superficiais da Bacia do Alto Paraguai / MS, 2004 - Campo Grande - MS. 137 p.
- Mendes, C.A.B.; Dias, F.A.; Lange, M.B.R.; Pereira, M.C.B.; Becker, M.; Barreto, S.R. & Grehs, S. A. 2004. *Bacia Hidrográfica do Rio Miranda: estado da arte*. Campo Grande, MS. Universidade Católica Dom Bosco - UCDB. 118 p.
- Miranda, J.I. 2005. *Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425 p.
- Pannatier, Y. 1996. *VarioWin: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. New York: Springer-Verlag.
- PCI Geomatics Geomatica. 2002. *Versão 8.2 for Windows*. Ontário, CANADÁ. CD-ROM.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A. & Bamler, R. 2003. The shuttle RADAR topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne RADAR. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57: 241-262.
- Rocha, C.H.B. 2000. *Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar*. Ed. Do Autor. Juiz de Fora, MG. 220 p.
- Santana, D.P. 2003. *Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas*. Embrapa Milho e Sorgo. Documentos 30. Sete Lagoas – MG. 62 p.
- Schrader, S. & Pouncey, R. 1997. *Erdas Field Guide*. Erdas Inc. 4th ed. Atlanta. 656 p.
- Silva, A.L.M. 2005. *Direito do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais*. Volume 2. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais. 672 p.
- Souza, J. M. & Loch, R.E.N. 2006. Refinamento do Modelo Digital de Elevação da Shuttle RADAR Topography Mission - SRTM e sua qualidade cartográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. UFSC. Florianópolis, SC.
- Systat. 2000. Systat Software Inc, Release 10.2 for Windows. State College.
- Tarboton, D.G.; Bras, R.L. & Roriguez-Iturbe, I. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5: 81-100.
- Torres, T. G.; Paranhos Filho, A.C.; Rondon, M.A.C.; Lastoria, G. & Souza, A. 2005. Comparação do divisor de bacia obtido de diferentes modos: o caso de estudo da bacia do córrego Guarairoba, MS. *Revista de Estudos Ambientais*, 7 (1): 39-51.
- Valeriano, M.M. 2005. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, p. 3595-3602.
- Villela, S.M. & Matos, A. 1975. *Hidrologia aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 245p.