

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DAS SUB-BACIAS DO ALTO CURSO DO RIO PRETO

**Paulo Roberto de Sousa Carvalho, Renato Fontes Guimarães &
Osmar Abílio de Carvalho Júnior.**

Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Laboratório de Sistemas de
Informações Espaciais, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70.910-900
Brasília, DF, Brasil.
{osmarjr, renatofg}@unb.br

Recebido 25 de julho de 2010, revisado 13 de setembro, aceito 25 de novembro

RESUMO - O desenvolvimento de técnicas para o manejo de bacias é fundamental devido ao aumento das demandas por água e a degradação de sua qualidade. Sistemas de informação geográfica (SIG) são ferramentas úteis para a gestão de bacias hidrográficas, permitindo o desenvolvimento de modelos de simulação, processamento de dados e visualização. A identificação e delimitação manual de bacias hidrográficas a partir de mapas ou fotografias aéreas requerem muito tempo e esforço. Portanto, algoritmos para extração automatizada de bacias hidrográficas a partir de dados de elevação digital e GIS têm sido desenvolvidos. O presente trabalho possui como objetivo avaliar metodologias de delimitação automática de sub-bacias através de técnicas de geoprocessamento, utilizando os programas TauDEM e Archydro. A área de estudo é o alto curso do Rio Preto caracterizado por atividades agrícolas e intensivo uso da água. Os resultados demonstram a importância do uso de procedimentos para a confecção de Modelos Digitais de Elevação hidrologicamente corrigidos.

Palavras chaves: geoprocessamento, bacias hidrográficas, modelo digital do terreno, recursos hídricos.

ABSTRACT - The development of techniques for watershed management is critical due to increased demands for water and degradation of their quality. Geographic

information systems (GIS) are useful tools for watershed management, allowing the development of simulation models, data processing and visualization. The identification and manual delineation of watersheds from maps or aerial photographs requires much time and effort. Therefore, algorithms for automated extraction of watersheds from digital elevation data and GIS have been developed. The present study aims to evaluate methods of automatic delineation of sub-watershed from GIS techniques, using the programs TauDEM and Archydro. The study area is the Upper Rio Preto catchment characterized by intensive agricultural activities and water use. The results demonstrate the importance of the use of procedures for the production of hydrologically corrected Digital Elevation Models.

Keywords: geoprocessing, watershed basin, Digital Elevation Model, water resources.

INTRODUÇÃO

A deterioração dos recursos naturais, principalmente dos recursos hídricos é uma das maiores preocupações da atualidade. A água é insumo fundamental à vida, sendo um elemento insubstituível em diversas atividades humanas, além de manter o equilíbrio do meio ambiente. O aumento da demanda de água, em função do acelerado crescimento populacional no mundo, vem ocasionando, em diversas regiões, problemas de escassez dos recursos hídricos. Estima-se que, atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas vivem em condições insuficientes de disponibilidade de água para consumo e que, em menos de 20 anos, cerca de 5,5 bilhões de pessoas enfrentarão problemas de falta de água (SETTI *et al.*, 2000). Segundo a Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) no Brasil, a água é um “recurso natural de disponibilidade limitada” (BRASIL, 1997). A referida lei institui também a

bacia hidrográfica como a unidade territorial para implantação da PNRH.

A bacia hidrográfica é a área coletora ou de captação natural da água proveniente da precipitação, na qual existe a convergência de um conjunto de canais de escoamento inter-relacionados para um único ponto de saída, denominado exutório. A quantidade de água que atinge os cursos fluviais está na dependência do tamanho da área ocupada pela bacia da precipitação total e de seu regime, e das perdas devidas a evapotranspiração e infiltração (SILVEIRA, 1997; CHRISTOFOLETTI, 1980). A bacia hidrográfica pode ser descrita como um sistema aberto com trocas permanentes e dinâmicas de matéria e energia com seu meio (SILVA *et al.*, 2006). A evolução de uma bacia de drenagem é o resultado da interação entre os fluxos de matéria e energia e a resistência topográfica. A soma de matéria e energia que atuam sobre as variáveis definem as características de uma bacia hidrográfica. Algumas dessas características podem ser quantificadas pelos estudos morfométricos. A bacia hidrográfica consiste em uma unidade ecossistêmica e morfológica adequada para o planejamento territorial.

A delimitação de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais. Para isso, tem sido comum a utilização de informações de relevo em formato analógico, como mapas e cartas, o que compromete a confiabilidade e a reprodução dos resultados devidos à carga de subjetividade inerente aos métodos manuais. Com o advento e consolidação dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e, conseqüentemente, o surgimento de formas digitais consistentes de representação do relevo, como os MDT's, métodos automáticos para delimitação de bacias

têm sido desenvolvidos (GARBRECHT & MARTZ, 1999). O uso de MDT para delimitação de bacias e sub-bacias se configura hoje na forma mais prática e rápida e menos subjetiva. Além disso, existe a possibilidade de extração de uma maior gama de informações dos dados topográficos representados nestes MDT's.

A presente pesquisa tem como objetivo geral analisar a melhor metodologia a ser utilizada na delimitação automática das sub-bacias hidrográficas do alto curso do rio Preto utilizando técnicas de geoprocessamento.

ÁREA DE ESTUDO

O alto curso da bacia do rio Preto está localizado nos Estados de Goiás, Minas Gerais e Distrito Federal estando inserido em municípios que compõem a Região Integrada de Desenvolvimento Econômico do Distrito Federal e Entorno (RIDE-DF), que foi criada pela Lei Complementar nº 94, de 19 de fevereiro de 1998 e regulamentada pelo Decreto nº 2.710, de 04 de agosto de 1998, com a finalidade de diminuir as desigualdades econômicas e sociais do Distrito Federal e seus municípios vizinhos (Entorno).

O rio Preto tem sua nascente no município goiano de Formosa, constituindo a divisa leste entre o Distrito Federal e o Estado do Goiás (GO), sendo um dos principais tributários do rio Paracatu, no Estado de Minas Gerais (MG). Este último é um importante afluente do médio curso do rio São Francisco. A bacia do rio Preto engloba os municípios de Formosa (GO), Cabeceiras (GO), Cabeceira Grande (MG), Unaí (MG), Natalândia (MG), Dom Bosco (MG), além do Distrito Federal. O alto curso do Rio Preto está inserido na porção leste

do território do Distrito Federal, nos municípios goianos de Formosa e Cabeceiras e no município mineiro de Cabeceira Grande (**Figura 1**).

Dentro do território do Distrito Federal a bacia do rio Preto se localiza na porção oriental, limitando-se a oeste com a Bacia do rio São Bartolomeu e a sudeste com a bacia do rio São Marcos. Seus principais afluentes são o ribeirão Santa Rita e o ribeirão Jacaré, ambos situados na porção norte da bacia; o ribeirão extrema e o rio jardim, localizados na porção central da bacia e que drenam a mesma no sentido noroeste-sudeste; e o córrego São Bernardo, localizado ao sul da bacia. No Estado de Goiás o principal tributário é o rio Bezerra (**Figura 2**).

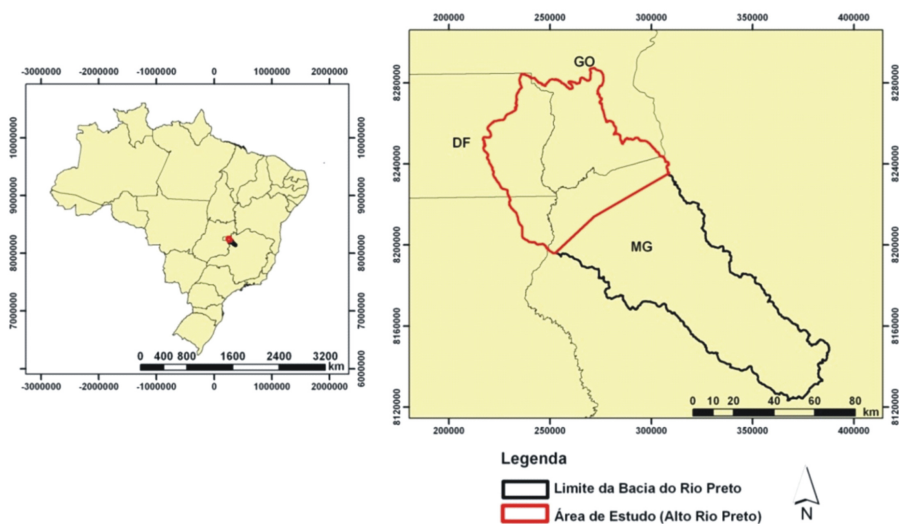


Figura 1. Mapa de localização do alto rio Preto.

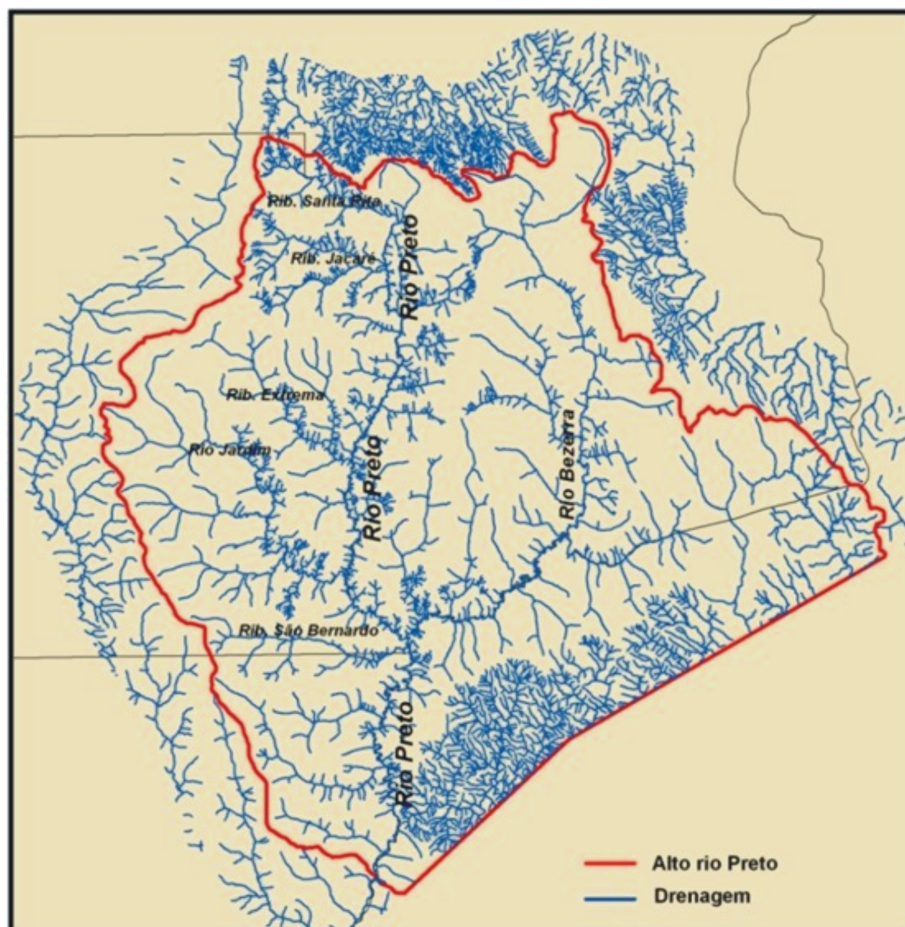


Figura 2 – Principais tributários do alto rio Preto.

HIDROGRAFIA

O rio Preto possui 400 km de extensão e pode também ser dividido em três trechos principais: o Alto Preto, que vai de suas nascentes até o local da estação fluviométrica de rio Preto em Fazenda Limeira, com 80 km de extensão e área de drenagem de 3.882 km²; o Médio Preto, que vai de Fazenda Limeira até a

estação de rio Preto em Santo Antônio do Boqueirão, com 190 km de extensão e área de contribuição de 2.021 km² e o Baixo Preto, que vai de Santo Antônio do Boqueirão até a foz e têm suas vazões medidas na estação de rio Preto em Porto dos Poções, este último trecho tem uma extensão de 130 km e uma área de drenagem parcial de 4.556 km² (BRASIL, 1996) (**Figura 3**).

CLIMA E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Segundo dados do Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Paracatu o clima da bacia do rio Preto, na classificação de Köppen, é tropical úmido de savana com inverno seco (Aw). O índice de aridez, na classificação de Martonne e Sauer, que representa o número de meses úmidos durante o ano é da ordem de 7.

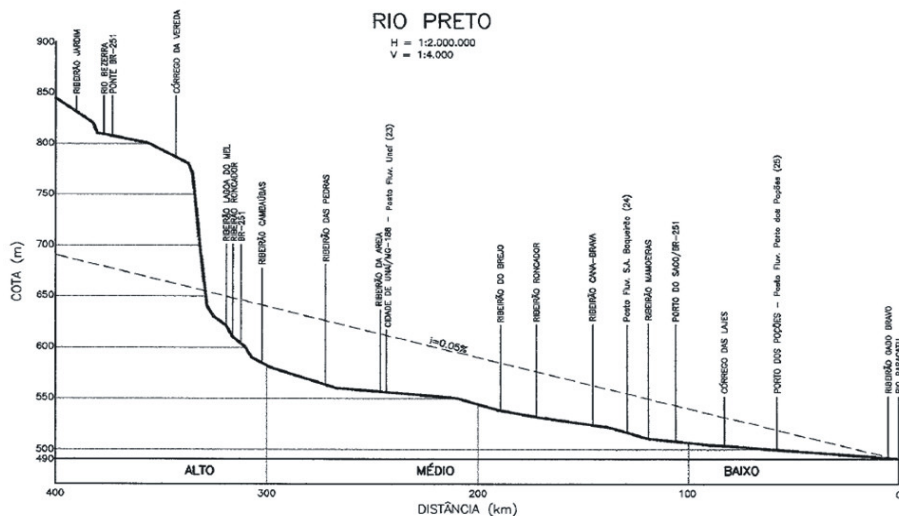


Figura 3. Perfil do Rio Preto (Fonte: BRASIL, 1996).

A precipitação média anual é de 1.336,8 mm, com uma temperatura média anual entre 21° e 24° C, sendo os meses de setembro e outubro os mais quentes (21° a 26° C), e os mais frios os meses de junho e julho (17° a 22° C). O balanço hídrico no solo da bacia indica que a região apresenta deficiência hídrica durante o período de inverno.

GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A bacia é constituída por rochas pertencentes ao Grupo Paranoá de idade pré-cambriana média a superior, uma cobertura detrito-laterítica de idade Terciária-Quaternária (predominante) e de aluviões recentes do Quaternário (SADF, 2001).

Segundo o ZEE da RIDE-DF, o alto curso do rio Preto está inserido na compartimentação geomorfológica designada como Unidade Geomorfológica Planalto do Alto Rio Preto, sendo drenado pelos rios Preto e Bezerra, dentre os principais. Este planalto está delimitado, a oeste, pelo vale encaixado do rio São Bartolomeu, por meio de abruptos rebordos erosivos; a noroeste, pelo planalto do rio Pípiripau, através de um nítido degrau estrutural de aproximadamente 70 metros de desnivelamento; a norte, pela depressão do alto rio Parana, por meio de uma escarpa erosiva; e a leste, pela depressão São-Franciscana, também delimitada por meio de uma escarpa erosiva.

Essa unidade geomorfológica apresenta extensas superfícies tabulares sulcadas por uma rede de drenagem de baixa densidade e padrão dendrítico, mantidas em cotas de 900 a 1.000m, sendo que os fundos de vales dos dois rios principais da bacia (Preto e Bezerra) registram cotas em torno de 850 metros (CPRM, 2003).

O planalto do alto rio Preto consiste num planalto de configuração morfológica similar ao do planalto do Distrito Federal, porém está rebaixado por volta de 100 a 200 metros em relação a este. Processos de etchplanação parecem ser responsáveis por

esse desdobramento da Superfície Sul-Americana, podendo também estar associados com reativações tectônicas. Extensas áreas do planalto do alto rio Preto estão capeadas por crostas detrítico-lateríticas que, devido a sua resistência, apresentam a ocorrência de pediplanos (CPRM, 2003).

O vale do rio Preto situa-se em uma depressão onde predomina o relevo de colinas e interflúvios tabulares de declividades pouco acentuadas, em cotas altimétricas entre 1200 a 640 metros. A topografia é recoberta por latossolos vermelhos, latossolos vermelho-amarelos e laterita (SADF, 2001).

RELEVO E SOLOS

O relevo da bacia do rio preto pode ser dividido em duas unidades geomorfológicas: a) superfícies aplainadas, constituídas por chapadões; b) superfícies dissecadas. Os solos predominantes nas superfícies aplainadas são os Latossolos correlacionados às formações detrítico-lateríticas. O Latossolo Vermelho-Escuro distrófico ou álicos é o predominante na área, seguido pelo latossolo vermelho-amarelo. Nas superfícies dissecadas predominam os Cambissolos e os Litossolos, que ocorrem de forma muito associada, desenvolvidos a partir de metassiltito. Os Litossolos caracterizam-se pela baixa permeabilidade e capacidade de retenção hídrica, e altamente erodíveis (IESA & CEMIG, 2003).

USO ANTRÓPICO

A exploração econômica da bacia do rio Preto no estado de Goiás é pouco expressiva, tendo em vista que a maior parte da área ocupada pela bacia neste

Estado é pertencente ao Exército, sendo utilizada como área de treinamento (CORDEIRO NETTO *et al.*, 2000).

Segundo o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal, a área da bacia do rio preto é definida como Zona Rural de Dinamização, o que significa que essa área é caracterizada pela atividade agropecuária consolidada, sendo incentivado o uso rural produtivo (IPDF, 1997).

No Distrito Federal a bacia se caracteriza hoje pelo intensivo uso dos recursos hídricos destinado ao desenvolvimento das atividades agrícolas. Dentre os principais produtos comercializados na região destaca-se o milho; os hortifrutigranjeiros, que atendem o mercado interno, mas também são comercializados no restante do país; a soja, que atende o mercado nacional e que também é exportada por intermédio de multinacionais; e o feijão, que atende ao mercado nacional (MALDANER, 2003). A presença das atividades agrícolas, em larga escala, no alto curso do rio Preto, se apóiam e um modelo de agricultura irrigada, com um uso intensivo de defensivos agrícolas, que podem acarretar na contaminação do lençol freático e rede de drenagem (CPRM, 2003).

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a obtenção das sub-bacias do alto rio Preto envolveu as seguintes etapas: (a) confecção do Modelo Digital do Terreno hidrologicamente consistente (MDT) (b) construção do *flow path* da bacia; (c) obtenção automática da bacia e sub-bacias através dos módulos *TauDEM* e *Archydro*, utilizando o software *ArcGIS 9.2*.

CONFECÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO (MDTHC)

O MDTHC deve representar o relevo de forma mais fiel possível à realidade e assegurar a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem (BAENA et al., 2004). Na elaboração do MDTHC foram adotadas as seguintes etapas: geração de um MDT inicial, extração de uma rede de drenagem e geração do MDTHC.

Na elaboração do MDT inicial foi utilizada uma base cartográfica na escala 1:100.000, em formato digital, cedida pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), contendo curvas de nível, pontos cotados e hidrografia. Os dados originais sofreram as seguintes correções: adição de valores nas curvas de nível e pontos cotados que apresentam valores zerados ou errados; inserção da direção do fluxo da rede de drenagem; conectividade dos eixos dos canais de drenagem. Os dados vetoriais corrigidos foram interpolados pelo módulo TOPOGRID (HUTCHINSON, 1989), gerando um MDT inicial com resolução de 20m x 20m, considerando uma área estendida do limite da bacia de 10 km (**Figura4**).

A rede de drenagem numérica foi obtida pela aplicação do algoritmo *TRACEGRID* do programa *ArcInfo*, desenvolvido por Chris Duncan (Universidade de Massachusetts). Este programa utiliza como dados de entrada: pontos de nascentes e a direção de fluxo da drenagem gerado através do método D8. O uso desse algoritmo resulta em uma rede de drenagem mais coerente para a delimitação de bacias (BARBOSA et al., 2007).

Após obtenção da rede de drenagem foi gerado um MDT com um *canyon* de 100 metros sobre a calha da drenagem com a finalidade de criação do MDTHC, o qual

contém a rede de drenagem com a direção de fluxo inclusa. Os dados de entrada para criação do MDT *canyon* são: o MDT e a rede de drenagem gerada pelo *TRACEGRID*. No *ArcGIS* efetuam-se as seguintes etapas: (1) subtração de 100 metros do MDT original, (2) multiplicação deste MDT pela grade da drenagem com valor 1 para a drenagem e 0 para não-drenagem; (3) reclassificação da drenagem para obter-se uma imagem com valor 0 para a drenagem e 1 para não-drenagem; (4) multiplica-se o MDT original pela grade reclassificada na etapa anterior; (5) soma-se os arquivos gerados nas etapas 2 e 4 obtendo-se o MDTHC.

CONSTRUÇÃO DO FLOW PATH

Após a construção do MDTHC foi criado o arquivo *flow path*, que força a direção de fluxo ocorra nos locais de drenagem, sendo gerado através do preenchimento das depressões e o cálculo da direção de fluxo utilizando o método D8. O arquivo de direção de fluxo D8 é então dividido pela grade de drenagem do *TRACEGRID* com valores 1 para drenagem e 0 para não-drenagem, obtendo-se, assim, o *flow path*. Na presente pesquisa também foi utilizado um arquivo, em formato *shape*, com o exutório no trecho a jusante do alto curso do rio Preto (**Figura 5**).

DELIMITAÇÃO DE BACIAS E SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

No presente trabalho foram utilizados dois programas para delimitação automatizada de sub-bacias a partir do MDT do alto rio Preto: o programa *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)* e *Archedro*.

Utilização do programa TauDEM para delimitação de bacias

O programa *TauDEM* (TARBOTON, 2002) incorpora ferramentas que contêm funções de análise do terreno que tratam dados matriciais para a extração da rede de drenagem e bacias.

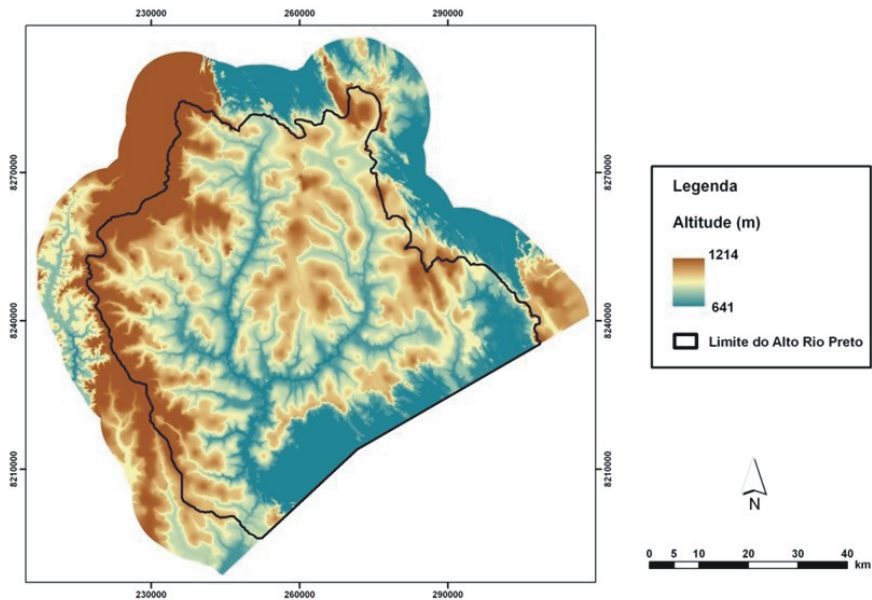


Figura 4. Modelo Digital do Terreno da bacia do alto rio Preto.

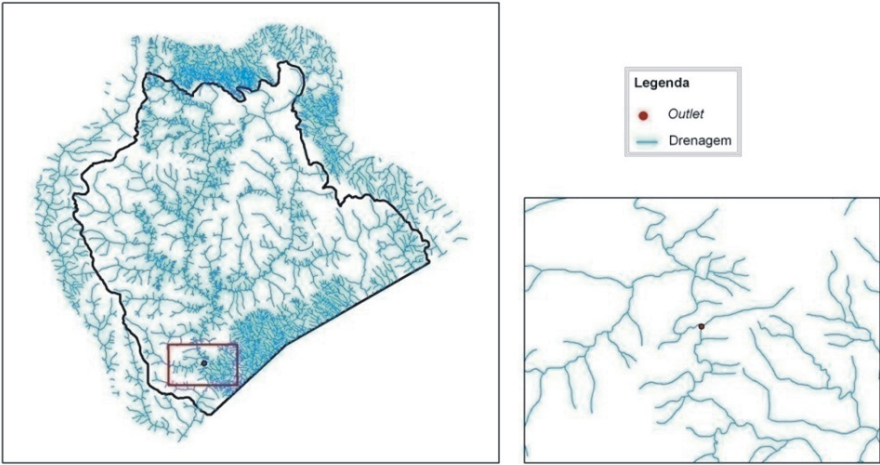


Figura 5. Exutórios utilizado para delimitação das sub-bacias.

Uma das vantagens encontradas na utilização do *TauDEM* está na possibilidade de delimitação de bacias e sub-bacias baseadas na classificação de Strahler (1952). Segundo este autor, a ordem dos cursos d'água pode ser determinada seguindo os seguintes critérios (**Figura 6**): (a) os menores canais identificáveis são designados por ordem 1; (b) onde dois canais de ordem 1 se unem, resulta em um canal de ordem 2 a jusante; em geral, onde dois canais de ordem i se unem, resulta em um canal de ordem $i+1$ a jusante; (c) onde um canal de ordem menor se une a um canal de ordem maior, o canal a jusante mantém a maior das duas ordens a ordem da bacia hidrográfica (i) é designada como a ordem do rio que passa pelo exutório.

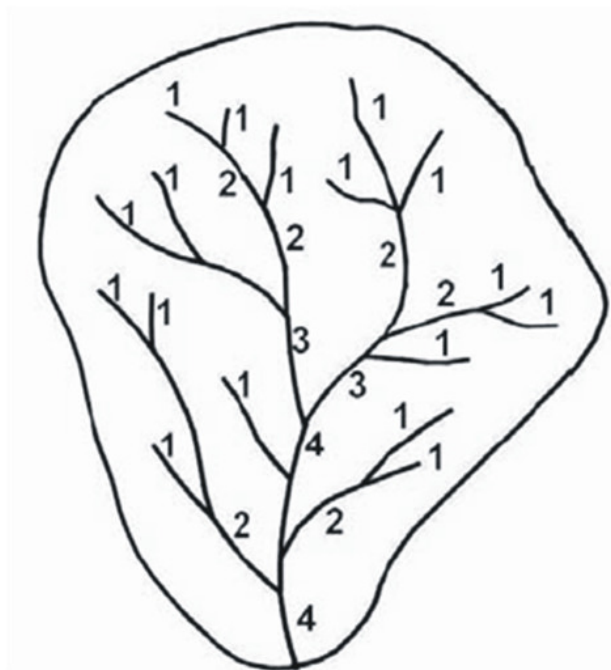


Figura 6 – Ordem de uma rede de drenagem segundo classificação de Strahler (1952).

A delimitação de bacias através do programa *TauDEM* requer continuidade e confluência entre todos os vetores que representam a drenagem. Além disso, vetores representando lagos e canais anastomosados devem ser substituídos por linhas em seu “centro de fluxo”. Quando alguma descontinuidade não puder ser tratada faz-se necessária a seleção de pontos de saída do fluxo d’água (exutório), para delimitação das bacias de interesse (TARBOTON, 2002).

A geração de bacias através desse programa é baseada no uso das direções de fluxo da drenagem, que é o caminho preferencial de escoamento da água. Dentre os métodos de obtenção de direção de fluxo de uma rede de drenagem existem os métodos D8 e D-infinity.

A utilização do método D8 para determinação da direção de fluxo envolve a análise de fluxo para cada célula de uma imagem com base nas cotas altimétricas dessas células (**Figura 7**). A direção de fluxo indica para qual das oito células vizinhas uma determinada célula drena sendo atribuído uma única direção, a qual pode ter oito variações. A grade

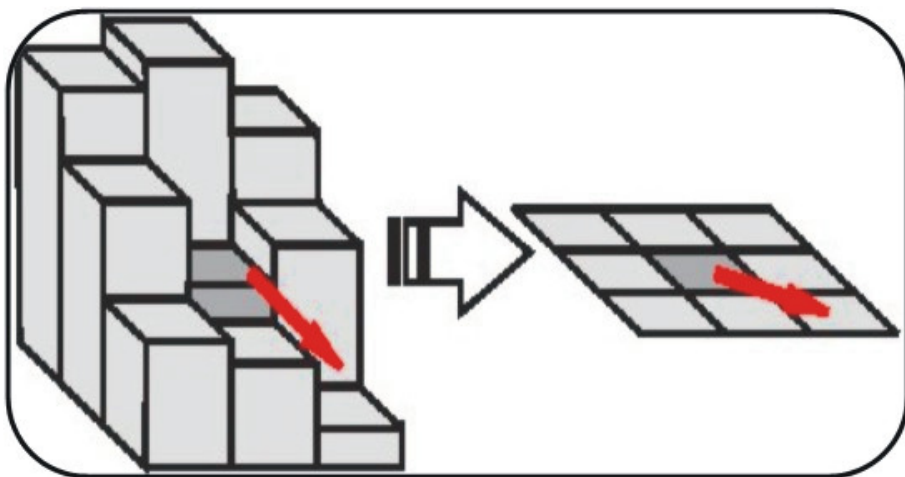


Figura 7 – Esquema de determinação da direção de fluxo para uma célula a partir das cotas e distâncias relativas às células vizinhas.

de direção de fluxo gerado no método D8 usa a seguinte codificação de sentido: 1 - leste, 2 - nordeste, 3 - norte, 4 - noroeste, 5 - oeste, 6 - sudoeste, 7 - sul, 8 – sudeste (**Figura 8**).

A direção de fluxo obtida através do método D-Infinity considera a inclinação mais íngreme em uma faceta triangular (**Figura 9**) medido em radianos, contado no sentido horário a partir do leste. Este método permite ângulos contínuos de fluxo e o particionamento da direção entre duas ou mais células vizinhas (TARBOTON, 1997).

Para a delimitação da rede de drenagem o *TauDEM* utiliza a análise integrada das grades de: direção de fluxo D8; área de contribuição D8; declividade D-Infinity; área de contribuição D-Infinity; e ordem dos canais de rio, baseada na classificação de Strahler.

Utilização do programa Archydro para delimitação de bacias

O programa *Archydro* é um programa que foi desenvolvido pela Universidade do Texas (GISWR, 2006) e que possui funcionalidades para a construção de modelagens hidrológicas. A delimitação automatizada desse programa utiliza como dado de entrada

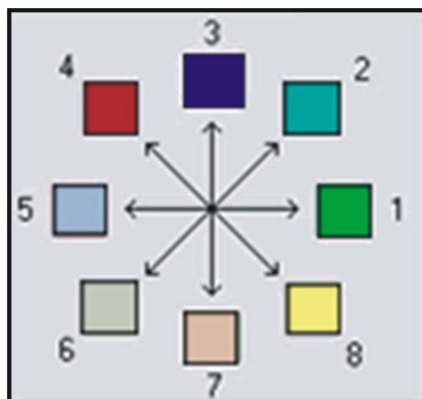


Figura 8 – Orientações da direção de fluxo do método D8.

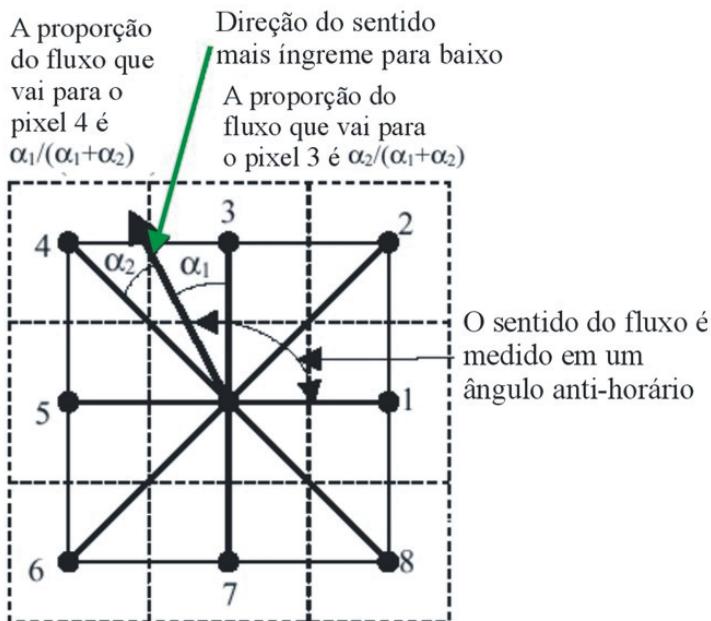


Figura 9 – Esquema de obtenção da direção de fluxo da drenagem baseado no método D-Infinity proposto por Tarboton (1997).

o MDT e os parâmetros utilizados são baseados, basicamente, na determinação da direção de fluxo pelo método D8, fluxo acumulado e no número de células, a critério do usuário, da área de contribuição.

RESULTADOS

DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS ATRAVÉS DO PROGRAMA ARCHYDRO

A partir do MDT original da bacia do rio Preto foram realizados três testes para delimitação das sub-bacias no programa *Archydro*. Foram realizados testes de delimitação de sub-bacias com os valores de área de contribuição de 5.000, 10.000 e 20.000. Foram aplicados os seguintes passos: (a) aplicação do comando “fill sinks”,

que confere a consistência da drenagem; (b) direção de fluxo pelo método d8; (c) *flow accumulation*; (d) *stream definition*, onde é escolhido o número de células; (e) *stream segmentation*; (f) *catchment grid delineation*; (g) *catchment polygon processing*; e (h) *drainage line processing*. O resultado da aplicação dessas rotinas é a geração de arquivos com as sub-bacias e drenagens, em formato vetorial. Os mapas a seguir mostram as sub-bacias delimitadas considerando as áreas de contribuição: 5.000 (**figura 10**), 10.000 (**figura 11**) e 20.000 (**figura 12**).

DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS ATRAVÉS DO PROGRAMA TAUDEM

A delimitação automática das sub-bacias utilizando o programa *TauDEM* foi realizado considerando três possibilidades: (a) delimitação com o MDT inicial e o exutório; (b) delimitação com o MDTHC e *exutório*; e (c) delimitação com o MDT original, *flow path* e exutório.

Delimitação com utilização do MDT original e o exutório

Neste primeiro teste foi selecionado o MDT original para realização das rotinas do programa. Foi aplicado o comando “*do all*” do menu “*basic grid analysis*”, sendo inserido no comando de determinação da área de contribuição d8 o arquivo com o *exutório*. Com a finalização desse passo é obtido um arquivo *raster* contendo a drenagem, baseado no método de curvatura do MDT, resultante da análise integrada da direção de fluxo d8 e D-Infinito, suas respectivas direções de fluxo, além de um arquivo preliminar com a drenagem ordenada segundo a classificação de Strahler.

Após este procedimento é aplicado o comando “*stream order grid and network files*” do menu “*network delineation*”. O produto é um *raster* com a drenagem ordenada segundo Strahler para toda a bacia. Retorna-se ao último comando do menu “*basic grid analysis*” e aplica-se o comando “*full river network raster*” e troca-se o arquivo

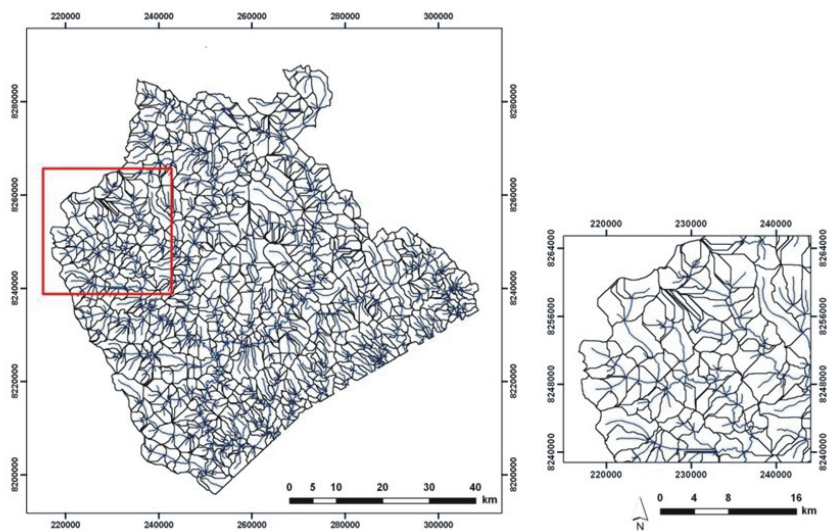


Figura 10 – Mapa das sub-bacias com 5.000 células.

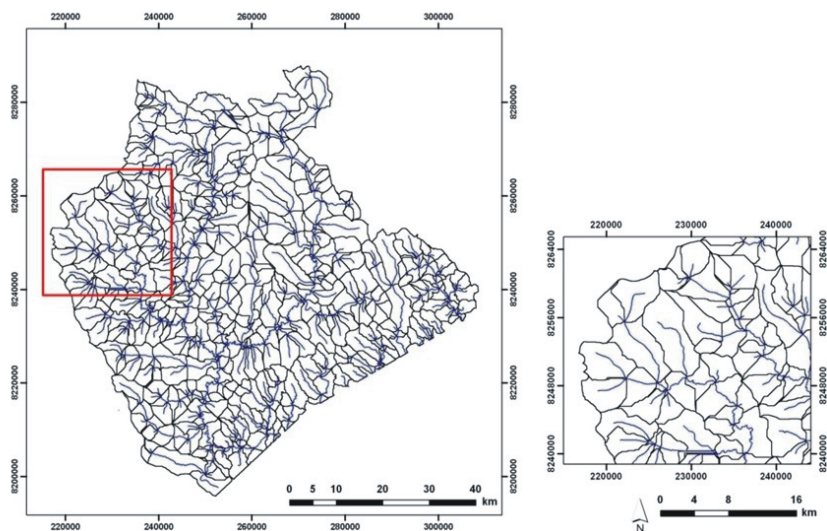


Figura 11 – Mapa das sub-bacias com 10.000 células.

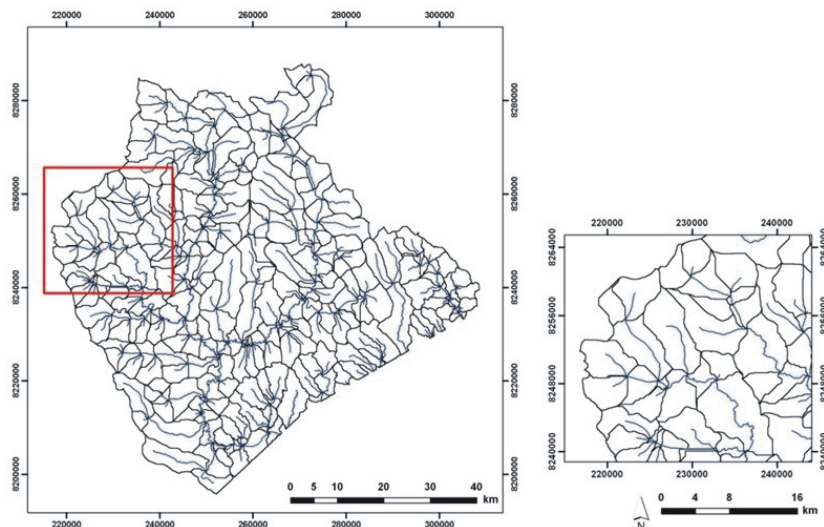


Figura 12 – Mapa das sub-bacias com 20.000 células.

de entrada do “*network order grid*” pelo *raster* de drenagem gerado nesta última etapa. Nesse procedimento é ativada a função “*grid order threshold*” e escolhida a ordem do rio, segundo Strahler, com a qual se pretende delimitar as sub-bacias. No caso, esse procedimento foi realizado três vezes, para obter-se as sub-bacias de 1ª, 2ª e 3ª ordens.

Os resultados são apresentados nos mapas a seguir (**Figuras 13, 14 e 15**). O primeiro contém as sub-bacias de primeira ordem, o segundo de segunda ordem e o terceiro de terceira ordem.

Delimitação com utilização do MDTHC e exutório.

Neste teste foram realizados os mesmos procedimentos do teste anterior, sendo apenas trocado o arquivo de entrada pelo Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente

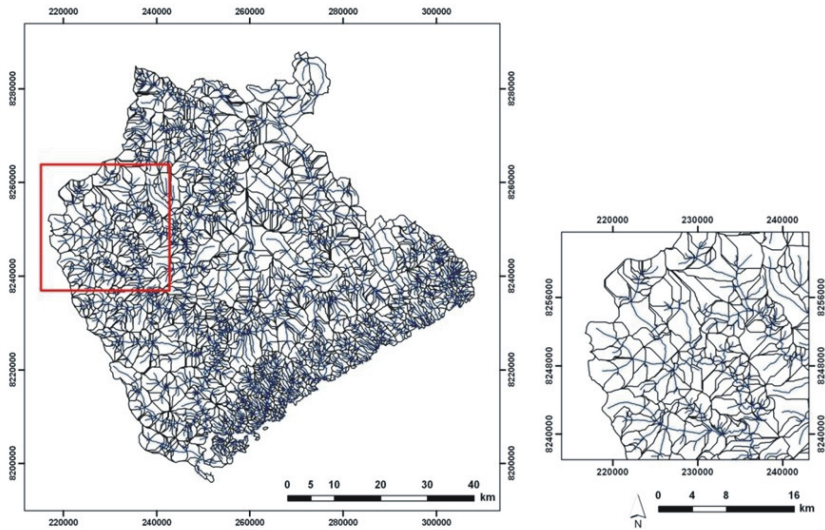


Figura 13. Mapa das sub-bacias de primeira ordem – MDT original.

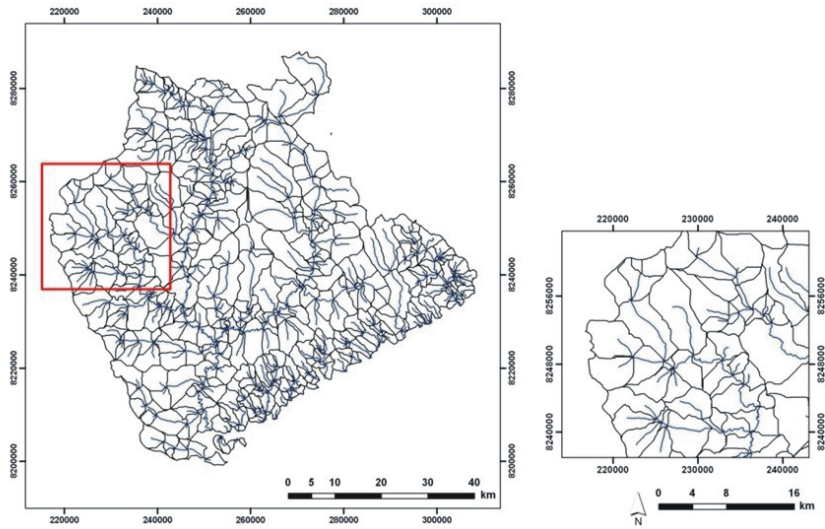


Figura 14. Mapa das sub-bacias de segunda ordem – MDT original.

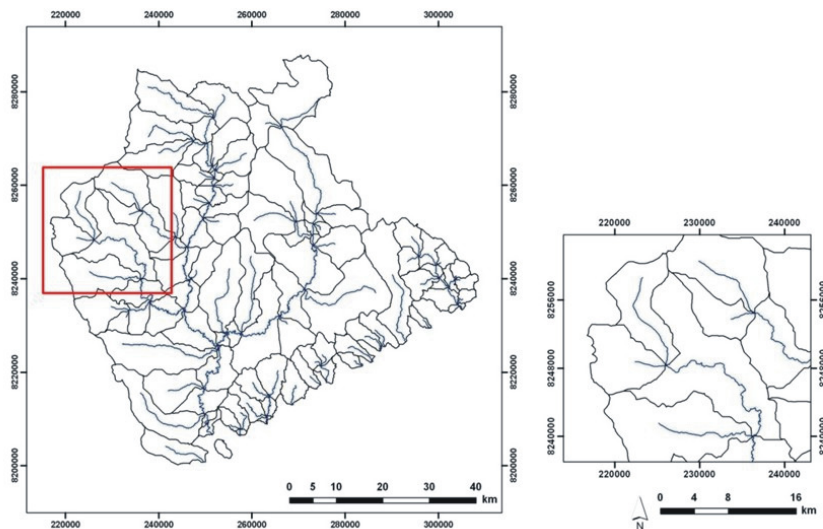


Figura 15. Mapa das sub-bacias de terceira ordem – MDT original.

Consistente (MDTHC), ou seja, o MDT com um *canyon* de 100 metros. Os resultados são apresentados nos mapas a seguir (**Figuras 16, 17 e 18**).

Delimitação com utilização do MDT original, flow path e exutório

Neste último teste, utilizando o *TauDEM*, foram utilizados o MDT original, o *exutório* e o arquivo *flow path*, este último foi inserido no comando “*do all*”. Neste procedimento o método utilizado para delimitação das sub-bacias se apóia no *flow path* e não na curvatura do MDT, como ocorrido nos dois primeiros testes. Os mapas resultantes estão apresentados nas **Figuras 19, 20 e 21**.

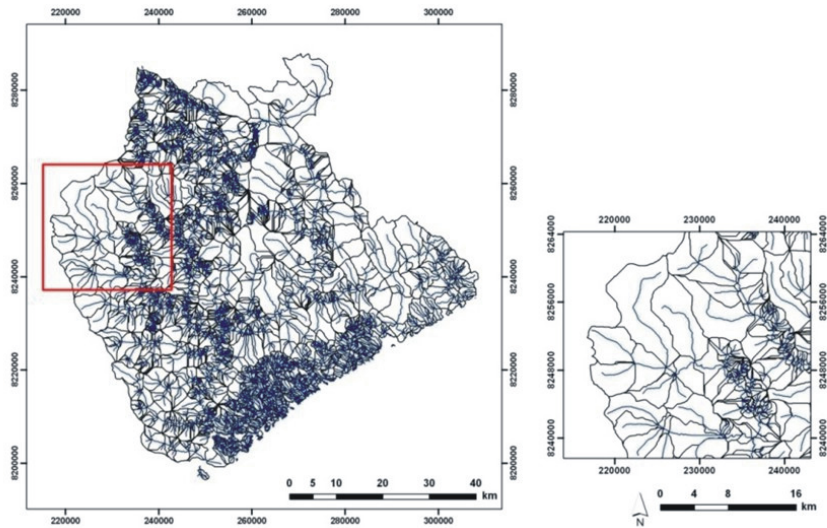


Figura 16. Mapa das sub-bacias de primeira ordem – MDTHC.

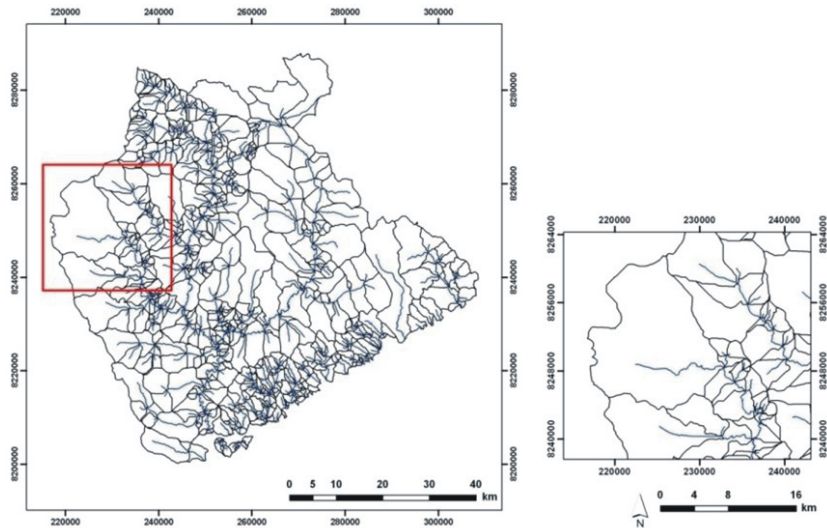


Figura 17. Mapa das sub-bacias de segunda ordem – MDTHC.

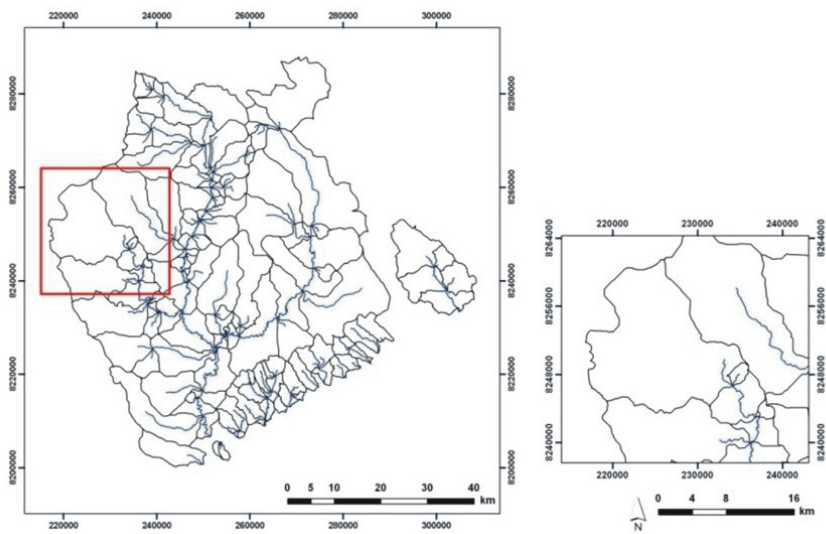


Figura 18. Mapa das sub-bacias de terceira ordem – MDTHC.

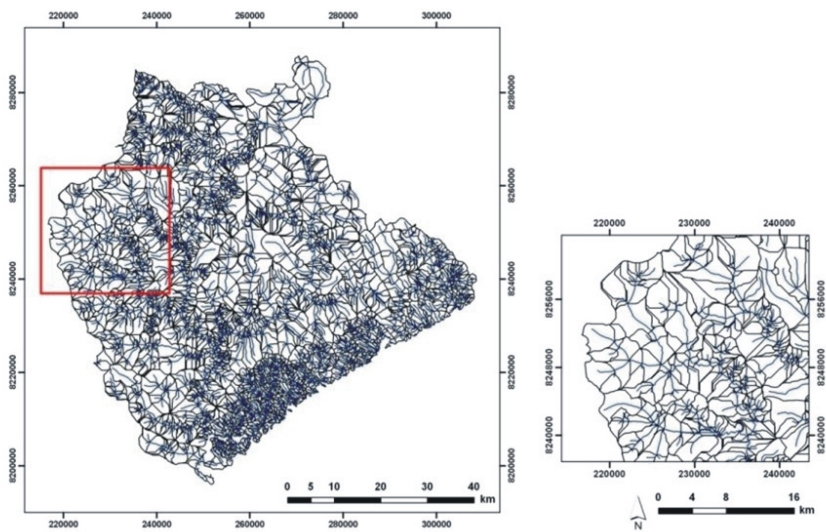


Figura 19 – Mapa das sub-bacias de primeira ordem – Flow path.

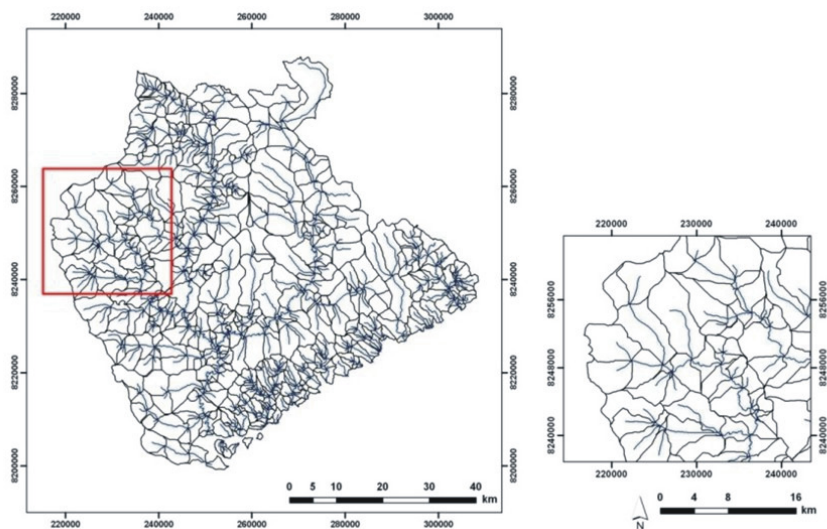


Figura 20 – Mapa das sub-bacias de segunda ordem – Flow path

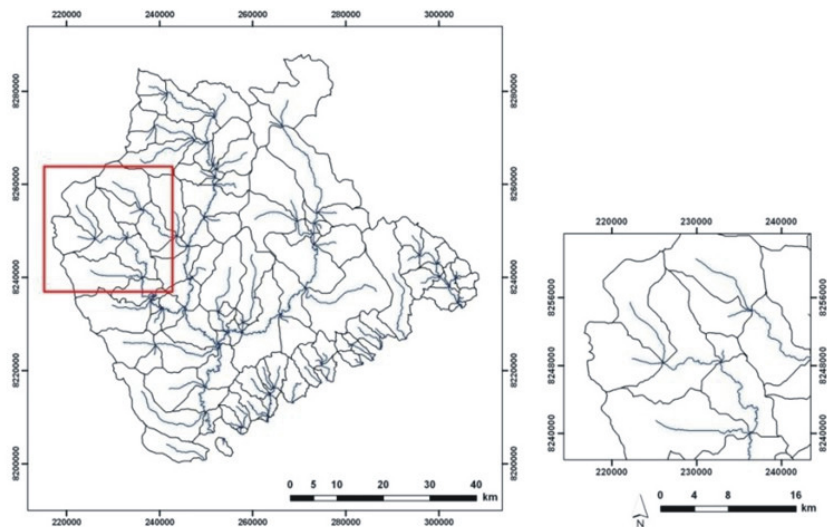


Figura 21 – Mapa das sub-bacias de terceira ordem – Flow path.

DISCUSSÕES

Através da classificação dos tributários do alto rio Preto, realizada através do programa *TauDEM*, foi determinado que o curso principal, em sua foz, apresenta uma grandeza de 6ª ordem, segundo Strahler.

Os valores calculados a partir da base cartográfica para a área da bacia do alto rio Preto (4.603,27 km²) e comprimento total dos cursos de rios (3.428 km), comparados aos valores dos produtos gerados, apontam que o *Archydro* é capaz de preencher uma maior parcela da área da bacia (4.556,77 km² – 5.000 células) em comparação ao *TauDEM* (4.512 km² – MDT *flow path*), porém, quanto ao comprimento total dos cursos, o *TauDEM* se aproxima mais da base com 3.256,42 km (1ª ordem – MDT *canyon*) contra 1.923,04 do produto do *Archydro* (5.000 células) (**Tabela 1**).

A utilização do programa *TauDEM* requer algumas etapas de pré- processamento que podem conferir o aumento do tempo disponível para obtenção das bacias, porém o resultado encontrado para a rede de drenagem se mostra mais condizente com a rede de drenagem da base cartográfica como verificado nos comprimentos totais dos cursos dos métodos MDT *canyon* e MDT *flow path*.

A delimitação de sub-bacias partindo apenas do MDT resulta em polígonos muito segmentados para drenagens de primeira e segunda ordem (figuras 12 e 13), ocorrendo

Tabela 1. Comprimentos totais dos cursos de rios e áreas das sub-bacias.

		Comprimento Total dos Cursos (km)			Área (Km2)		
		MDT	MDT canyon	MDT Flowpath	MDT	MDT canyon	MDT Flowpath
<i>TauDEM</i>	1ª Ordem	2529,15	3256,42	2830,36	4481,16	4477,49	4512,01
	2ª Ordem	1325,57	1241,13	1426,45	4428,56	4417,81	4430,28
	3ª Ordem	725,16	655,01	744,18	4344,83	4210,77	4328,67
<i>Archydro</i>	5.000	1923,04	-	-	4556,77	-	-
	10.000	1492,02	-	-	4547,56	-	-
	20.000	1182,53	-	-	4539,78	-	-

à delimitação de sub-bacias não condizentes com a realidade. A utilização de um MDT com *canyon* (figuras 15 e 16) ameniza esse problema por evidenciar a rede de drenagem durante o processamento de direções de fluxo, que é um dos parâmetros no qual o programa se apóia.

A utilização do programa *Archydro* representa uma boa ferramenta para delimitação de bacias, no entanto, seus resultados são melhores se aplicados a pequenas extensões. Em bacias com áreas grandes o resultado pode gerar sub-bacias homogêneas, mascarando as diferenças de feições dos cursos da rede de drenagem. As figuras 9, 10 e 11 demonstram essa tendência dos produtos gerados pelo *Archydro* em homogeneizar o tamanho dos polígonos finais das sub-bacias.

A **Tabela 2** compara a quantidade de sub-bacias geradas pela aplicação dos dois programas. A ocorrência de uma rede de drenagem mais densa na porção oriental do Distrito Federal, em comparação à porção da bacia no Goiás, não é refletida nos produtos gerados no *Archydro*. Diferentemente, dos produtos obtidos pelo *TauDEM*, no qual podem ser escolhidas as ordens das drenagens. Nos mapas representados nas figuras 15 e 18 (1ª ordem – MDT canyon e 1ª ordem – MDT Flow path), que delimita as sub-bacias de primeira ordem, ficam evidenciadas essas características do território do DF.

Tabela 2. Número de sub-bacias geradas.

		Número de Sub-bacias		
		MDT	MDT canyon	MDT Flowpath
<i>Taudem</i>	1ª Ordem	2332	3079	3175
	2ª Ordem	497	632	613
	3ª Ordem	100	135	114
<i>Archydro</i>	5.000	1.024	-	-
	10.000	525	-	-
	20.000	284	-	-

A **Tabela 3** compara as densidades de drenagem de acordo com o método utilizado, apontando que o método MDT *canyon* apresenta uma maior proximidade (0,72 km²/km) com a densidade de drenagem calculada da base cartográfica (0,74 km²/km), seguido do método MDT *flow path* (0,62 km²/km), para a rede de drenagem obtida na delimitação de cursos de 1ª ordem. Porém, a utilização do método *flow path* apresenta ganhos nas delimitações para 2ª e 3ª ordem.

A análise combinada dos valores de comprimento total dos cursos, área da bacia e densidade de drenagem apontam que a utilização do método MDT *flow path* apresenta maiores ganhos na delimitação de bacias dentre os demais métodos, devido à menor redução da rede de drenagem extraída e conseqüentemente do aumento da área ocupada pela bacia.

CONCLUSÃO

O emprego de técnicas de geoprocessamento para delimitação automática de bacias hidrográficas configura-se na forma mais viável, eficiente e menos subjetiva que os métodos utilizados através de cartas topográficas. A celeridade com a qual foram obtidas

Tabela 3. Densidades de drenagem de acordo com o método utilizado.

		Densidade de Drenagem		
		MDT	MDT canyon	MDT Flowpath
<i>TauDEM</i>	1ª Ordem	0,56	0,72	0,62
	2ª Ordem	0,29	0,28	0,32
	3ª Ordem	0,16	0,15	0,17
<i>Archydro</i>	5.000	0,42	-	-
	10.000	0,32	-	-
	20.000	0,26	-	-

as sub-bacias do alto curso do rio Preto reforça a eficiência e importância do emprego dessas técnicas no processo de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

A metodologia aplicada neste estudo resultou em produtos úteis para o desenvolvimento de análises mais aprofundadas da bacia, a exemplo de estudos morfométricos, que significam o aumento de parâmetros a serem utilizados na delimitação de planos e programas de monitoramento da bacia.

Na presente pesquisa foi utilizado um modelo digital do terreno com células de 20 x 20 metros, talvez a geração de um MDT com uma resolução maior (10 x 10m ou 15 x 15m) possa trazer melhores resultados, principalmente para drenagens de primeira ordem, que possuem geralmente menores comprimentos.

Paralelamente ao aumento da resolução do MDT podemos inserir mais pontos de exutório nas confluências dos tributários, representando em um ganho na acurácia da delimitação automática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. & CALIJURI, M. L. (2004). Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Engenharia Agrícola*, 24(3): 612-624.
- BARBOSA, F. L. R., SILVA, M. A.; TEIXEIRA, A. A.; PRADO, A.; SCHERER-WARREN, M.; RIBEIRO, R. M. P. (2007). Delimitação de otobacias a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do Verde Grande. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. Florianópolis, Brasil. *Anais do XIII*, São José dos Campos: INPE. p. 3271-3278.
- BRASIL, 1996. Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR. [S.I.]: (CD-ROM).

- BRASIL. (1997). *Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997* (Política Nacional de Recursos Hídricos).
- CHRISTOFOLETTI, A. (1980). *Geomorfologia*. 2ª Edição. São Paulo: Edgard Blücher.
- CORDEIRO NETTO, O. M., BALTAR, A. M. & PIMENTEL, C. E. B. (1999). Critérios para outorga de uso da água para irrigação: o caso da bacia do rio Preto no Distrito Federal. SILUSBA Simpósio Luso-Brasileiro de Recursos Hídricos. 4. Coimbra, Portugal, *CD-ROM dos Anais...* Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. 20 p.
- CPRM (2003). *Zoneamento ecológico-econômico da região integrada de desenvolvimento do Distrito Federal e entorno: fase I - Rio de Janeiro*, CD-ROM. Rio de Janeiro: CPRM/EMBRAPA/SCO-MI.
- GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. (1999). Digital elevation model issues in water resources modeling. In: Annual Esri Users Conference, California. *Proceedings...* California: ESRI, 1999.
- GISWR– GIS Water Resources Consortium. (2006). *ArcGIS Hydro Data Model*. Austin: Center for Research in Water Resources, University of Texas,
- HUTCHINSON, M.F. (1989) A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211-232.
- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO TERRITORIAL E URBANO DO DISTRITO FEDERAL - IPDF. (1997). *Plano Diretor de Ordenamento Territorial e Urbano do Distrito Federal – PDOT*. Brasília: Instituto de Planejamento Territorial e Urbano do Distrito Federal.
- INTERNACIONAL DE ENGENHARIA S.A. - IESA & COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. (1993). UHE – Queimado – Estudo de viabilidade: *Relatório Final. Estudo de Impacto Ambiental*, v.3. Belo Horizonte: IESA / CEMIG.
- MALDANER, V. I. (2003). *Análise dos conflitos do uso da água na bacia hidrográfica do rio Preto no DF*. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental). Universidade Católica de Brasília, Brasília.

- SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO DISTRITO FEDERAL - SADF. (2001). *Projeto de aproveitamento hidroagrícola da bacia do rio Preto no Distrito Federal*. Brasília: Secretaria de Agricultura do Distrito Federal.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. DE M.; PEREIRA, I. C. (2000). *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. 2ª Edição. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas.
- SILVA, A. M.; HERPIN, U.; MARTINELLI, L. A. (2006). Morphometric characteristics of seven meso-scale river basins in state of São Paulo (southeastern Brazil). *Revista Caminhos da Geografia*, 3 (17): 20-30.
- SILVEIRA, A. L. L. (1997). Ciclo Hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C. E. M. (org). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora UFRGS / ABRH.
- STRAHLER, A. N. (1952). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transaction American Geophysical Union*, 38: 913-920.
- TARBOTON, D. G. (1997). A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 33: 309-319,
- TARBOTON, D. G., (2002). *Terrain analysis using digital elevation models (TauDEM)*. Disponível em: www.engineering.usu.edu/dtarb.