

Revista Brasileira de Cartografia (2012) N^o 64/5: 677-691
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS MORFOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO PACUÍ/MG

Geotechnologies Applied to Automatic Extraction of Morphometric Data Basin River Pacuí/MG

Marcos Esdras Leite; Jefferson Willian Lopes Almeida & Renato Ferreira da Silva

Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES

Departamento de Geociências/Laboratório de Geoprocessamento

Av. Ruy Braga, s/n. Campus Darcy Ribeiro. Montes Claros/MG. CEP 39400-000

marcosesdras@ig.com.br; jeffersonlopesalmeida@gmail.com;

renato.ferreiradasilva@yahoo.com.br

Recebido em 13 de outubro, 2011/ Aceito em 18 de janeiro, 2012

Received on october 13, 2011/ Accepted on January 18, 2012

RESUMO

Os conhecimentos das características físicas de uma bacia hidrográfica são de suma importância para identificar parâmetros que auxiliam no melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Assim, os estudos voltados para as variáveis morfométricas possibilitam caracterizar as bacias hidrográficas de forma homogênea. Desse modo, o uso de instrumentos presentes nas geotecnologias e materiais com uma facilidade de aquisição considerável, como é o caso do modelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) tem se mostrado significativo na extração automática de dados. Sendo assim, o presente trabalho pautou no uso do sensoriamento remoto e do SIG para análise de variáveis morfométricas da bacia do rio Pacuí. Os parâmetros morfométricos foram divididos em: lineares, zonais e hipsométricos. Desse modo, os procedimentos metodológicos realizados em ambiente SIG foram significativos para gerar informações sobre as características físicas da rede de drenagem do rio Pacuí.

Palavras chaves: Bacia hidrográfica, Morfometria, SIG e Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The knowledge of the physical characteristics of a watershed are of paramount importance to identify parameters that assist in better management of water resources. Thus, studies focused on the morphometric variables possible to characterize the watershed evenly. Thus, the use of instruments present in geo and materials with a considerable ease of acquisition, such as radar model SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) has been shown to be significant in the extraction and analysis of data. Therefore, this study was based on the use of remote sensing and GIS to morphometric analysis of the Pacuí River basin. The morphometric parameters were divided into linear and zonal hypsometric. Thus, the procedures were performed in a GIS environment to generate significant information about the physical characteristics of the drainage network of the Pacuí River.

Keywords: Watershed, Morphometry, GIS and Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da apropriação do espaço pelo homem juntamente com a exploração dos recursos naturais têm acarretado significativas transformações ambientais e sociais. A atividade impactante em bacia hidrográfica não difere dessa ótica, pois todos os fenômenos ocorrentes sejam eles de origem natural, ou de origem antrópica interferem não só na quantidade e na qualidade da água, mas também, na vida dos seres vivos que necessitam dos recursos hídricos para a sobrevivência.

Desse modo, as bacias hidrográficas assumem um papel importante no planejamento e gestão ambiental, porque todos os fatores que afetam a produção e o equilíbrio no meio ambiente refletem sobre suas características físicas, bióticas e até mesmo antrópicas (RESCK, 1992).

O uso sustentável dos recursos hídricos parte da necessidade do conhecimento das singularidades locais. Os estudos voltados para o conhecimento das características físicas de uma bacia hidrográfica são de suma importância para entender as condições e potencialidades do ambiente em questão, tendo em vista, que os rios são os principais agentes erosivos e modificadores da superfície terrestre (PRESS, 2006).

Dentro dessa perspectiva, a pesquisa em bacia hidrográfica torna-se um elemento fundamental para a identificação dos componentes naturais e antrópicos, possibilitando, assim, a busca de informações que promovam diagnósticos e prognósticos sobre a área fisiográfica estudada. Para isso, o uso de Geotecnologias, como sensoriamento remoto e Sistema de Informação Geográfica (SIG) tem se mostrado ferramentas eficazes nos estudos ambientais, pois geram informações que dinamizam o processamento de dados representativos da superfície terrestre.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi aplicar o sensoriamento remoto e o SIG na análise das variáveis morfométricas da bacia do rio Pacuí. Com isso, dentro das etapas foi necessário primar pelo entendimento dos elementos e dos aspectos físicos da rede de drenagem, para tanto, foram elaborados mapas em um escala coerente (1:100.000), além de gráficos e tabelas sobre a área estudada.

A bacia do rio Pacuí configura-se em uma unidade de estudo importante, uma vez que está inserida no norte do estado de Minas Gerais, área

que carece de informações geoespaciais. Para isso, a instrumentalização de processos contidos nas geotecnologias como aporte para a análise descritiva da bacia do Pacuí torna-se necessário não só para a geração de dados, como também na identificação de parâmetros da estrutura física da rede de drenagem.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Morfometria de bacias hidrográficas

A dinâmica sistêmica das bacias hidrográficas, por constituir uma unidade complexa com uma infinidade de inter-relações, tem sido estudada por diversos autores. Sendo assim, a elucidação de alguns conceitos torna-se fundamental para embasamento do estudo em questão.

Neste trabalho adotou-se o conceito de Guerra e Cunha (2000, p. 353) que compreendem bacia hidrográfica como “uma rede de drenagens, interligada pelos divisores topográficos, onde cada uma delas drena água, material sólido e dissolvido para uma saída comum ou ponto terminal, podendo ser outro rio de hierarquia igual ou superior, lago, reservatório ou oceano”.

Conforme Lima (1996), o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é determinado pelas características morfológicas. Com finalidade de compreender as inter-relações existentes entre os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, torna-se necessário expressar as características da bacia em termos quantitativos.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas configura-se em uma abordagem quantificada da rede de drenagem. Através de procedimento sistemático e racional as formas de relevo da bacia hidrográfica podem ser mensuradas (CRISTOFOLETTI, 1980). De acordo com Lana; Castro (2006) as especificidades morfométricas revelam parâmetros morfológicos que expressam os indicadores físicos da bacia, caracterizando suas homogeneidades.

Para Granel-Pérez (2001), as configurações espaciais dos canais fluviais na rede de drenagem representam, além do processo de dissecação e esculturação do relevo, a evolução morfogenética da região estudada. Desse modo, as variáveis relacionadas ao comprimento, altura, largura, volume, inclinação, densidade, frequências, entre outras são utilizadas para os estudos

geomorfológicos, geológicos, pedológicos, agrônômicos e geotécnicos na avaliação de vulnerabilidade do meio ambiente.

Os atributos verificados em bacias hidrográficas relativos à composição dos parâmetros morfométricos são: área, perímetro e comprimento da bacia; extensão dos canais fluviais; comprimento vetorial (comprimento do vale) dos canais fluviais; número de canais fluviais; declividade da bacia (mínima, média e máxima); declividade dos canais e altimetria (mínima, média e máxima) (CHEREM, 2008).

Christofolletti (1980) agrupa os parâmetros morfométricos em lineares, zonais e hipsométricos, sendo os lineares, envolvendo os atributos da rede de drenagem e seu arranjo espacial dentro da bacia (unidade de medida em km). Os zonais tratam dos atributos da rede de drenagem e das áreas não hidrográficas do relevo. Já os hipsométricos, associados à tridimensionalidade da bacia, tratam do relevo correlacionando à rede de drenagem e à bacia hidrográfica.

Os parâmetros morfométricos aplicados no presente estudo são descritos a seguir, ressaltando, porém que não serão utilizados todos aqueles referidos na literatura e, sim, os mais condizentes com o tipo de análise proposta.

2.1.1 Hierarquia fluvial

Corresponde à ordenação dos canais fluviais dentro de uma bacia hidrográfica. Neste estudo, optou-se pela hierarquização de Strahler (1952 *apud* Christofolletti, 1980), que considera os canais de primeira ordem como aqueles que não apresentam tributários, sendo, portanto canais de cabeceiras de drenagem. Os canais de segunda ordem são os canais subsequentes à confluência de dois canais de primeira ordem e assim sucessivamente, sendo que a confluência com canais de ordem hierárquica menor não altera a hierarquização da rede.

2.1.2 Análise Linear

Esse tipo de análise está relacionada aos parâmetros lineares que quantificam a rede de drenagem por meio de seus atributos (comprimento, número, hierarquia) e da relação entre eles. Os parâmetros lineares analisados são: Relação de bifurcação, Extensão do percurso superficial e índice de sinuosidade do canal principal, os quais são apresentados a seguir:

(1) Relação de bifurcação (Rb): parâmetro definido por Horton (1945) e reformulado por Strahler (1952), como sendo a razão entre o número total de canais de certa ordem e o número total de canais de ordem imediatamente superior cujos valores dentro de uma mesma bacia, devem ser constantes e jamais inferior a 2 (CHEREM, 2008). Sendo a equação utilizada:

$$Rb = \frac{Nw}{Nw+1} \quad (1)$$

Em que: Nw é o número total de canais de determinada ordem; e $Nw + 1$ corresponde ao número total de canais de ordem imediatamente superior.

(2) Extensão do percurso superficial (Eps): parâmetro que apresenta a média da distância percorrida pela enxurrada entre o interflúvio e o rio permanente. É uma das variáveis mais importantes por representar a ligação direta entre o desenvolvimento hidrológico e fisiográfico das redes de drenagens. Sendo utilizada a equação (2):

$$Eps = \frac{1}{2Dd} \quad (2)$$

Em que: Eps é a extensão do percurso superficial e Dd é a densidade de drenagem.

(3) Índice de sinuosidade do canal principal (I_s): relaciona o comprimento verdadeiro do canal principal com o comprimento em linha reta entre os pontos extremos do canal principal. Esse parâmetro representa também a influência da carga sedimentar, a compartimentação litológica e estrutural (ALVES E CASTRO, 2003). Sendo usada a equação 3:

$$I_s = \frac{L}{D_v} \quad (3)$$

Em que: L é o comprimento do canal principal (Km); e D_v é a distância vetorial (Km) entre os pontos extremos do mesmo canal. Os valores próximos a 1 indicam elevado controle estrutural (alta energia) e valores acima de 2 indicam baixa energia, sendo os valores intermediários relativos a

formas transicionais entre canais retilíneos e meandranes.

(4) Comprimento do curso principal: entendido como a distância resultante entre a nascente e desembocadura do maior segmento fluvial. Christofolletti (1980) descreve alguns critérios para definir o segmento principal na rede de drenagem, dentre eles a aplicação do método de ordenação de Horton (o curso principal corresponde ao canal de maior ordem, determinado a partir da desembocadura até a nascente).

2.1.3 Análise Zonal

Consiste nos atributos da rede de drenagem e das áreas não hidrográficas do relevo, tem como variável fundamental a área da bacia hidrográfica. A maioria das características da bacia está relacionada à sua área. Portanto, a área total inclui todos os pontos situados em altitudes superiores à saída da bacia e dentro do divisor topográfico que separa duas bacias adjacentes (LIMA, 1996). Os parâmetros zonais analisados neste estudo são: área da bacia hidrográfica, índice de circularidade, densidade de rios, densidade de drenagem, coeficiente de manutenção, e fator forma.

(1) Área da bacia: é toda área drenada por um conjunto de sistema fluvial em geral, é expressa em Km². A mensuração desse índice pode ser realizada por métodos convencionais, ou métodos mais sofisticados, com o uso de softwares específicos.

(2) Índice de circularidade (Ic): proposto por Miller em 1953 (citado por Christofolletti, 1980), valor de Ic correlaciona um valor ideal a um mensurado. Sendo a relação entre a área da bacia e área do círculo, o resultado é adimensional que varia entre 0 e 1. O índice de circularidade é dado pela equação 4:

$$Ic = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad (4)$$

Em que: *A* é a área da bacia (Km²); *P*² é o perímetro (Km) da bacia. Esse parâmetro indica que uma bacia mais alongada (com índice abaixo de 0,51), favorece o escoamento. Se o valor encontrado estiver acima de (0,51) a bacia tende a ser mais circular com escoamento reduzido e alta probabilidade de cheias (LANA; CASTRO, 2006).

O valor máximo a ser obtido é igual a 1 (se o (Ic) for próximo a 1 a bacia tende a ter o formato circular).

(3) Densidade de rios (Dr) ou densidade hidrográfica (Dh): esse parâmetro, proposto por Horton (1945), estabelece a relação entre o número de rios e a área de uma dada bacia. A mensuração desse parâmetro é referente ao comportamento hidrológico no quesito de capacidade de gerar novos fluidos. A equação utilizada foi:

$$Dr = \frac{N}{A} \quad (5)$$

Em que: *N* representa o número total de rios ou cursos d'água e, *A* a área da bacia hidrográfica (Km²).

(4) Densidade de drenagem (Dd): correlaciona o comprimento total dos canais com a área da bacia hidrográfica (Km²). Utilizou-se a equação 6:

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (6)$$

Em que: *Lt* é o comprimento total dos canais (Km); *A* é a área total da bacia (Km²). Esse parâmetro representa o comportamento hidrológico definido pela litologia e estrutura geológica, definindo a capacidade de infiltração e de formação de canais superficiais. A densidade de drenagem apresenta relação inversa à densidade dos rios, sendo que, quanto mais canais existirem, menos extensos eles serão (CHRISTOFOLETTI, 1980).

(5) Coeficiente de manutenção (Cm): esse parâmetro, proposto por Schumm (1956), corresponde à área necessária para a formação de um canal com fluxo perene, além de ser considerado pelo referido autor como um dos parâmetros mais importantes para a realização de análises morfométricas (CHRISTOFOLETTI, 1980). A equação utilizada foi:

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1000 \quad (7)$$

Em que: *Cm* é o coeficiente de manutenção e *Dd* é a densidade de drenagem.

(6) **Fator forma (K_f):** considerado mais adequado para representar a forma fiel da bacia, sua unidade aproxima-se de um quadrado (CHORLEY *et al.*, 1957 *apud* SOUZA, 2005). De acordo com Lima (1996), a forma se enquadra em uma das características físicas mais difíceis de ser expressas em termos quantitativos. A forma da bacia pode ser influenciada entre outras características, pela geologia. Além de atuar sobre alguns dos processos hidrológicos da bacia. A equação utilizada foi a 8):

$$K_f = \frac{A}{L_2} \quad (8)$$

Em que: K_f é o fator forma (adimensional), A a área da bacia e L_2 o comprimento do eixo da bacia.

2.1.4 Análise Hipsométrica

De acordo com Christofolletti (1980), a hipsometria busca relações entre uma dada unidade horizontal (a rede de drenagem de uma mesma bacia) e sua variabilidade altimétrica. Os parâmetros hipsométricos que compõem este estudo são: amplitude altimétrica da bacia, relação de relevo, índice de rugosidade, hipsometria e declividade.

(1) **Amplitude altimétrica (Hm):** variável que corresponde à diferença altimétrica entre a foz e a maior altitude situada num determinado ponto da área da bacia. A relevância do conhecimento da amplitude altimétrica reside no fato de que a altitude influência na quantidade de energia solar que a bacia recebe (CASTRO E LOPES, 2001). A equação aplicada foi:

$$Rr = \frac{Hm}{Lh} \quad (9)$$

Em que: Hm é a amplitude altimétrica; $Hmax$: Altitude máxima e $Hmin$: Altitude mínima.

(2) **Relação de relevo (Rr):** Relaciona a amplitude altimétrica máxima da bacia e sua extensão, ou seja, seu comprimento (SHUMM, *apud* CHRISTOFOLETTI, 1980). A equação utilizada para esse cálculo é:

$$Hm = Hmax - Hmin \quad (10)$$

Em que: Hm é a amplitude altimétrica e o comprimento da bacia.

(3) **Índice de rugosidade (Ir):** para Strahler (1958 *apud* Christofolletti, 1980), esse índice refere-se um número adimensional, que representa aspectos da declividade e comprimento da vertente, através da razão entre amplitude altimétrica e densidade de drenagem. Assim, os valores elevados do índice de rugosidade (valores de densidade de drenagem e amplitude altimétrica elevados) indicam que as vertentes são longas e íngremes. Desse modo, as bacias hidrográficas com índice de rugosidade elevado são propensas à ocorrência de cheias, visto que são bacias de alta energia que convertem o fluxo de vertente em fluxo fluvial em menor tempo. A equação utilizada foi:

$$Ir = H * Dd \quad (11)$$

Em que: H representa a amplitude altimétrica e Dd densidade de drenagem.

A elaboração de hipsometria, declividade e orientação do relevo são importantes variáveis de identificação e delimitação da compartimentação altimétrica e morfoestrutural da bacia.

(4) **Hipsometria:** De acordo com Christofolletti (1980), a hipsometria tende a relacionar entre uma dada unidade horizontal de espaço (zona) e sua variabilidade altimétrica, evidenciando assim, a proporção ocupada por determinada área da superfície terrestre em relação às variações altimétricas.

(5) **Declividade:** a declividade de uma bacia hidrográfica tem relação importante com vários processos hidrológicos relacionados com a tipologia, a resistência das rochas, aos processos erosivos e intempéricos. A declividade geral da bacia é expressa entre a divisão da amplitude altimétrica pelo comprimento da bacia. Já a declividade média, associada à declividade máxima, possibilita a comparação entre energia máxima e média dentro das bacias hidrográficas (LIMA, 1996). Para a

classificação da declividade, foram utilizados os critérios estabelecidos pela Embrapa (1979).

2.2 Geotecnologias e os Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

As características físicas e morfométricas de uma bacia hidrográfica podem ser estudadas, usando como método as ferramentas presentes nas geotecnologias. Em trabalhos recentes, os métodos convencionais para se obter os parâmetros morfométricos estão sendo substituídos por técnicas realizadas em ambiente digital, via SIG.

Entre os avanços tecnológicos que têm fornecido instrumentos para pesquisas envolvendo o espaço geográfico estão as geotecnologias, com destaque ao Sistema de Informação Geográfica (SIG) e os avanços na área do Sensoriamento Remoto. De acordo com Leite (2006), esses avanços vão de encontro à atual evolução científica, que por sua vez, está diretamente relacionada ao processo de integração de saberes de ciências diferentes.

Este conjunto de tecnologia possui como principal ferramenta o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Utiliza-se esta terminologia para designar um caso particular de sistema de informação com o uso de hardware e software aplicável aos estudos geográficos. Fitz (2008, p.23) conceitua SIG “como um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido”.

Inicialmente, as análises morfométricas de bacias hidrográficas eram realizadas por meio de manipulação de atributos em cartas topográficas e cálculos manuais. No entanto, esse processo vem sofrendo modificações metodológicas principalmente com o advento das novas tecnologias que possibilitaram o desenvolvimento de sistemas computacionais para cálculos e análises de dados.

Nesse contexto, as geotecnologias, notadamente o SIG é um recurso que capacita a otimização do processo de análise quantitativa de atributos do relevo e da rede de drenagem. Desse modo, os novos métodos e técnicas empregados permitem a diminuição no tempo de manipulação e

obtenção de resultados das feições e fenômenos relativos à superfície terrestre (FONSECA, 2010).

A técnica mais comum empregada atualmente na representação do relevo em ambiente digital é feita a partir do uso do modelo digital de elevação (MDE). Entretanto, Cherem (2008) ressalta que o uso dos MDEs não é meramente figurativo, pois, além de representar o relevo, ele possibilita a extração de atributos relacionados à rede de drenagem. Desse modo, os dados em formato matricial possibilitam a geração de modelos numéricos representativos da direção do escoamento superficial da água, baseado nas direções do escoamento para cada pixel da matriz (FONSECA, 2010).

Nos últimos anos, o aprimoramento dos dados interferométricos (radar) resultou na geração de resultados positivos na produção de modelos de elevação. Um dos dados provindos dos radares interferométricos é o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), missão realizada no ano de 2000 pela NASA (National Aeronautics and Space Administration). O projeto SRTM advém de cooperação entre a NASA, a NIMA (National Imagery and Mapping Agency), o departamento de defesa dos Estados Unidos e as agências espaciais da Alemanha e da Itália (FLORENZANO, 2008).

Os MDEs mais utilizados atualmente são os que foram gerados pela missão SRTM. Esse MDEs tem resolução espacial de 30 metros para o território dos Estados Unidos e 90 metros para o restante do globo terrestre. A partir destes dados, em ambiente computacional, são aplicadas técnicas que possibilitam a manipulação e geração de informações relativas aos atributos morfométricos de uma bacia de drenagem.

Esses atributos são realizados a partir do uso dos modelos digitais de elevação adquiridos por imagens orbitais interferométricas ou pelo tratamento das cartas topográficas. No presente trabalho optou-se por extrair os atributos necessários à análise morfométrica, a partir dos dados provenientes dos modelos SRTM-3, com amplitude da grade de 90 metros, projetados para uma acurácia vertical e horizontal absoluta de 20 metros, com 90% de confiança (MEDEIROS; FERREIRA; FERREIRA, 2006).

Neste trabalho optou-se pelo uso do SRTM-3 para extração da morfometria, uma vez que o trabalho de Medeiros; Ferreira; Ferreira (2006)

mostrou que os dados extraídos automaticamente do SRTM-3, apresentam melhores resultados altimétricos que os MDE's gerados através da base cartográfica na escala 1:100.000. No trabalho mencionado concluiu que, em conformidade com o Padrão de Exatidão Cartográfica, o MDE SRTM pode ser classificado como padrão classe A para escala de 1:100.000. Além disso, os autores supracitados destacam a facilidade de aquisição e manipulação dos dados, como vantagens para o uso do MDE SRTM-3.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área

Localizada na Mesorregião Norte do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas $16^{\circ} 10' 35''$ e $16^{\circ} 54' 57''$ de Latitude Sul e entre $45^{\circ} 01' 40''$ e $43^{\circ} 50' 06''$ de Longitude Oeste, a bacia hidrográfica do rio Pacuí, afluente da margem direita do rio São Francisco, abrange os municípios de Montes Claros, Coração de Jesus, São João do Pacuí, Brasília de Minas, Ibiaí, Mirabela, São João da Lagoa, Ponto Chique e Campo Azul, como mostra a Fig. 1.

Conforme Nimer e Brandão (1989), o clima da mesorregião do norte de Minas Gerais é do tipo Tropical Sub-úmido, próximo ao limite do Sub-úmido Seco, com períodos de chuvas concentradas entre os meses de outubro a março, sendo os meses de Novembro, dezembro e Janeiro os mais chuvosos; enquanto que o período mais seco é o que compreende os meses de Junho e Agosto. A precipitação média anual é de 1.060 mm, e a temperatura média anual é de $24,2^{\circ} \text{C}$. (PMMC, 2006).

De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2006), a bacia de drenagem do Rio Pacuí é um dos principais afluentes da margem direita do Rio São Francisco, apresenta escassez de recursos hídricos e conflito pela água (destaque para a agricultura irrigada no Rio Riachão). Identifica-se também o abastecimento tanto urbano como rural em atividades econômicas que englobam a pecuária (atividade econômica predominante), irrigação, exploração mineral, indústria, geração de energia e pesca. De acordo com o censo do IBGE (2010), a população residente nos municípios de influência da bacia do Pacuí está estimada em um total de 456.485 habitantes.

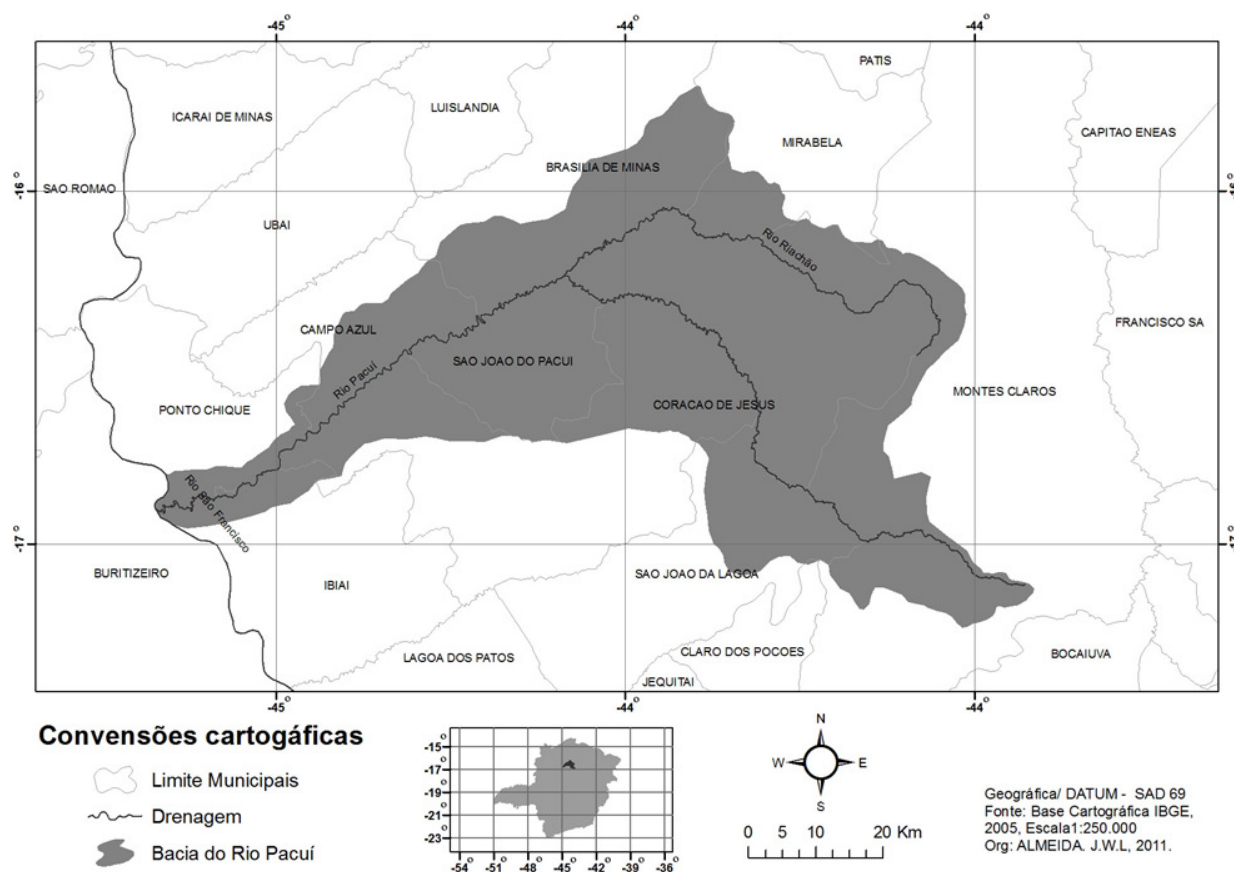


Fig. 1 - Localização da bacia hidrográfica do Pacuí.

Em termos geológicos, a bacia é caracterizada pelo predomínio de rochas sedimentares representadas em grande parte pelos calcários do período Criogeniano (era Neoproterozóica) dividido pelo grupo Paraopeba e pela formação Lagoa do Jacaré.

Em relação à geomorfologia, a bacia do rio Pacuí situa-se no domínio da depressão periférica do São Francisco com unidades caracterizadas por planaltos residuais elaboradas sobre extensa área de bacia sedimentar. As formas de relevo predominante são as superfícies tabulares reelaboradas por processos de erosão areolar, superfícies onduladas em planalto e superfícies aplainadas, cuja evolução está relacionada ao processo e desnudação periférica realizada pela drenagem do São Francisco. Encontram-se também, ao longo do canal principal, formas de relevo apresentadas por vertentes ravinadas e vales encaixados (IGA, 1977).

De acordo com a pesquisa da equipe técnica do Departamento de Solos- DPS/LABGEO (UFV, 2010), na bacia hidrográfica do rio Pacuí há maior ocorrência de solos do tipo Latossolo Vermelho Amarelo.

Conforme o levantamento do Instituto Estadual de Floresta (IEF) em parceria com a Universidade Estadual de Lavras (UFLA), no ano de 2005. Predominam na área da bacia do rio Pacuí, os seguintes estratos de vegetação: Cerrado, Campo Cerrado, Floresta Estacional Decidual Montana, Vereda, Floresta Estacional Decidual Sub Montana, além da silvicultura do Eucalipto (SCOLFORO & CARVALHO, 2006).

3.2 Materiais e Métodos

Conforme Christofletti (1980), a análise morfométrica de bacia hidrográfica é composta por elementos e seus atributos. Através de um conjunto de procedimentos, os parâmetros morfométricos são extraídos e os aspectos geométricos são analisados, ou seja, indicadores relacionados à forma, ao arranjo estrutural e à interação entre os elementos que compõem o sistema de drenagem.

Dessa forma, o presente estudo estrutura-se na análise descritiva das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pacuí, através de técnicas fundamentadas em ambiente SIG. Para isso, utilizou-se como base a revisão de literatura acerca do tema proposto, aquisição de

produtos orbitais e instrumentalização de processos presentes nas geotecnologias para a extração de dados necessários ao que se propõem.

Para melhor exemplificar, os procedimentos deste trabalho foram segmentados em duas etapas: a primeira etapa – preparação e extração de dados (área da bacia e rede de drenagem) a partir dos MDEs-SRTM; a segunda etapa – cálculos dos parâmetros morfométricos e elaboração de mapas (Hierarquia fluvial, Hipsometria, Orientação do relevo e Declividade). Os materiais, os procedimentos técnicos operacionais e software utilizado para execução das etapas do trabalho estão listados a seguir:

- MDEs na escala de 1:250.000, com resolução espacial de 90 metros oriundos da missão SRTM disponibilizadas gratuitamente no sítio EMBRAPA/Relevo. Correspondentes às seguintes cartas: SE-23-V-B, SE-23-X-A.

- Aplicativo ArcGIS 9.3.

- Arquivos no formato *Shapefile*: Mapa Geológico de Minas Gerais (CPRM, 2003), Mapa de Solos de Minas Gerais (UFV, 2010) e Mapeamento da Flora Nativa e Reflorestamento IEF-MG/UFLA (SCOLFORO & CARVALHO, 2006).

A primeira etapa dos estudos baseou-se na extração dos dados necessários para análise morfométrica, utilizando ferramentas presentes no ArcGis 9.3. Desse modo, realizou os processos pré-operacionais que consistem na organização dos dados em ambiente computacional e mosaico dos modelos SRTM. Feito isso, aplicou-se a proposta metodológica de Rosim; Pellegrino (2001), para a delimitação da bacia e extração da rede de drenagem.

Essa metodologia consiste em algoritmos que atribuem o sentido de escoamento de um pixel para o seu pixel vizinho, baseando-se no maior desnível do terreno. Após definidas as direções do fluxo, é possível gerar as áreas de fluxo acumulado (soma total de pixels à montante). Para a delimitação automática da bacia, o algoritmo analisa as áreas onde ocorrem valores iguais a zero de fluxo acumulado, bem como as respectivas direções de fluxo para o tracejamento dos limites (FONSECA, 2010).

Delimitada a bacia do rio Pacuí e extraída a rede de drenagem, partiu-se para a segunda etapa do trabalho que consistiu no uso de ferramentas

presentes na extensão *Hidrology* do ArcGis 9.3 para adequação dos canais de drenagem, hierarquização dos canais, e por fim foram realizados os cálculos necessários para a análise linear, zonal e hipsométrica da bacia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise morfométrica da bacia do rio Pacuí foram obtidos por meio da aplicação dos procedimentos expostos. Dentro da proposta realizada por Christofolletti (1980), a análise morfométrica de bacia hidrográfica do rio Pacuí dividiu-se em quatro itens: Hierarquia fluvial e os cálculos dos parâmetros morfométricos divididos em: Análise linear, Análise zonal e Análise hipsométrica.

Constata-se na bacia o padrão de drenagem do tipo dendrítica devido às ramificações em forma de ângulos agudos em que os afluentes unem-se ao curso principal. Esse padrão é indicativo de rochas sedimentares e solos homogêneos (CHRISTOFOLETTI, 1980). Quanto ao escoamento global, a drenagem da bacia apresenta como exorréica, pois, mesmo desaguando diretamente no rio São Francisco, suas águas fluem para o mar.

4.1 Hierarquia fluvial

De acordo com a Fig. 2, a hierarquização encontrada na bacia do rio Pacuí possui ramificação de 5º ordem, conforme o método proposto por Strahler (1952), sendo 645 canais de 1º ordem com 1007 km de extensão, 125 de 2º ordem, totalizando 525 km, 19 de 3º ordem com 267 km, 5 de 4º ordem medindo 89 km e 1 canal de 5º ordem com extensão de 145 km, totalizando 795 segmentos com 2033 km de extensão.

4.2 Análise linear

Como consta nos parâmetros propostos, a análise linear neste estudo abrange a Relação de bifurcação (Rb), Extensão do Percurso Superficial (Eps) e Índice de sinuosidade (Is) do canal principal. Nesse contexto, vale ressaltar o comprimento do rio principal com a extensão de 236,42 Km, medido desde a cabeceira até a desembocadura.

Na Relação de bifurcação (Rb), os dados obtidos foram 5,16 para a 1º ordem, 6,58 para o de 2º ordem, 3,8 para o de 3º ordem e 5 para o de 4º ordem. É perceptível a relação entre a pequena quantidade de segmentos de alta hierarquia fluvial e

a grande quantidade de segmentos de baixa hierarquia fluvial interferindo na proporção dos valores. De acordo com Souza (2005) os valores maiores são representativos de solos mais impermeáveis e valores menores, os solos são mais permeáveis. Os parâmetros encontrados permitem inferir que os solos da bacia do rio Pacuí possuem boa permeabilidade.

Em relação ao Índice de sinuosidade (Is), o valor encontrado foi de 1,90 km. De acordo com Lana; Castro (2006), esse valor enquadra-se em índices de baixa energia estrutural remonta a canais transicionais, regulares ou irregulares. Desse modo, os canais da bacia em estudo tende a formas transicionais entre canais retilíneos e meandantes. Esses autores destacam ainda, que a sinuosidade dos canais é decorrente da carga de sedimentos, caracterização litológica e declividade do canal.

4.3 Análise Zonal

A bacia hidrográfica do rio Pacuí apresenta uma área (A) de 3899 Km², com o perímetro (P) estimado em 400 km de extensão. O comprimento longitudinal da bacia (L), ou seja, a escala vetorial (traçado em linha reta) apresenta 124,2 km de extensão.

O índice de circularidade (Ic) encontrado na bacia foi de 0,30, o que indica para um formato mais alongado da bacia. Esses valores são adimensionais que variam entre de 0 e 1, quanto mais próximo de 1 a bacia tende para forma circular. Conforme Granell-Péres (2001), o formato alongado da bacia permite um escoamento mais distribuído no canal principal diminuindo risco de enchentes, embora o nível de vazão alta seja mais durável.

Outro parâmetro utilizado no estudo de forma de bacia é o Fator forma (Kf), sendo o mais adequado para representar a forma da bacia. O resultado permite, a partir de certos princípios, concluir que a bacia hidrográfica do Pacuí apresenta baixa tendência para inundação.

O índice obtido referente à Densidade de rios (Dr) ou Densidade hidrográfica foi de 0,203 canais/Km² em gerar novos flúvios em função das variáveis geomorfológicas, geológicas, vegetacionais, climáticas e hidrológicas. O valor encontrado para a bacia do Pacuí indica baixa capacidade em gerar novos cursos d'água. Entre outros fatores, isso se deve à forma de relevo caracterizada por superfícies

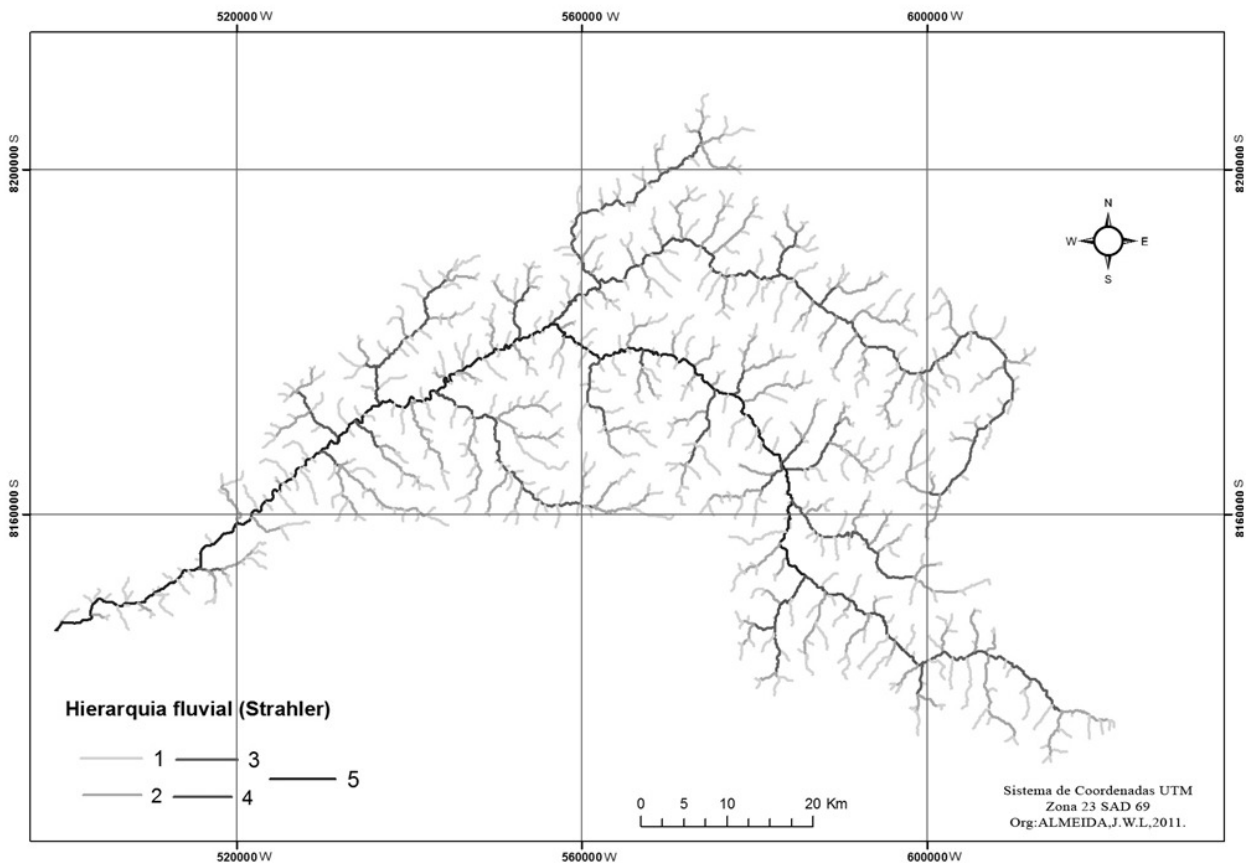


Fig. 2 - Hierarquia fluvial da rede drenagem do rio Pacuí.

aplainadas e a ocorrência predominante de Latossolo Vermelho Amarelo que tem como característica a alta permeabilidade à água (EMBRAPA, 1979).

A Densidade de drenagem (Dd) representa o grau de dissecação topográfica. A bacia do Pacuí apresentou uma densidade de drenagem igual 0,52 Km/Km². De acordo com Jesus (2007), os valores entre 0,50 e 1,0 representam média baixa Dd. Este pode ser perfeitamente relacionado à densidade de rios encontrada principalmente no que tange à porosidade dos solos.

O Coeficiente de manutenção (Cm) é o parâmetro que fornece a área mínima necessária para a manutenção de um metro de drenagem. Conforme Granell-Péres (2001) a interpretação dos valores altos e baixos é o inverso da densidade de drenagem, ou seja, um coeficiente alto é indicativo de que a bacia não possui uma boa área para manutenção dos canais. O valor de Cm encontrado foi de 1923 m²/m. Portanto, infere-se que a bacia em estudo não apresenta uma boa área para manutenção dos canais.

4.4 Análise hipsométrica

A Amplitude altimétrica (Hm) representa a variável que corresponde à diferença altimétrica entre a foz e a maior altitude situada num determinado ponto da área da bacia. O valor encontrado de Hm, a partir dos MDEs- SRTM para a bacia do rio Pacuí, foi de 628m, sendo que, o menor índice altimétrico apresentado foi 461m e o maior 1089m. De acordo com Castro e Lopes (2001), quanto maior a altitude da bacia, menor a quantidade de energia solar que o ambiente recebe e, portanto, menos energia estará disponível para esse fenômeno. Nesse contexto, a bacia se enquadra em um ambiente que apresenta taxas de evapotranspiração elevadas.

A Relação de relevo (Rr) encontrada foi 5,06. Esse valor ressalta a geomorfologia da bacia do Pacuí que se apresenta em ambiente de médio declive, com áreas de cristas e interflúvios tabulares com vertentes ravinadas à montante; e áreas de superfície ondulada em planalto ao longo do canal principal o qual vai suavizando até a jusante que apresenta um formato plano.

Índice de rugosidade (Ir) expressa um número adimensional, representando aspectos da declividade e comprimento da vertente através da razão entre amplitude altimétrica e densidade de drenagem. No caso da bacia do Pacuí, o valor encontrado foi de 326,56 apresentando um valor elevado, indicando uma bacia de alta energia que converte o fluxo de vertente em fluxo fluvial em menor tempo.

Tendo como referência o Mapa Hipsométrico, representado pela Fig. 4, elaborado com o fatiamento de 6 classes de 100 em 100 metros e 1 com a variação de 29 metros (1060 - 1089). Verifica-se, a distribuição da área de drenagem nas

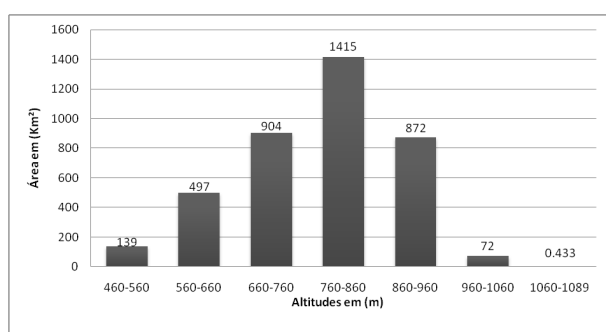


Fig. 3- Distribuição da área da bacia do Pacuí por níveis altimétricos. Org: ALMEIDA, J. W. L, 2011.

faixas altimétricas com os seguintes valores, como exposto na Fig. 3.

Conforme o resultado obtido, através da Fig. 4, observa-se que 76% (2955 Km²) da área da bacia do Pacuí apresentam uma variação entre 460 a 860 metros de altitude e 24% (944,4 Km²) variando entre 860m a 1089m. Sendo assim, mesmo com a elevada área de (1415 Km²) de altitude variando entre 760 a 860 metros no médio Pacuí, há o predomínio de terras baixas na bacia em estudo.

Em relação à declividade foi realizada uma distribuição das classes em graus e os valores encontrados foram convertidos em porcentagem. Feito isso, dividiram-se as classe encontradas por área, relacionando-as à tabela de classes de declividade da EMBRAPA (1979). Desse modo, a Tabela 1 apresenta as informações quantitativas associadas à declividade da bacia hidrográfica do Pacuí. A Fig. 5 representa a distribuição espacial das classes de declividade mostradas na Tabela 1.

Para Granell-Péres (2001), o conhecimento da energia do relevo expressa através da declividade significa um fator fundamental na análise geográfica. A relação entre declividade com a morfologia da

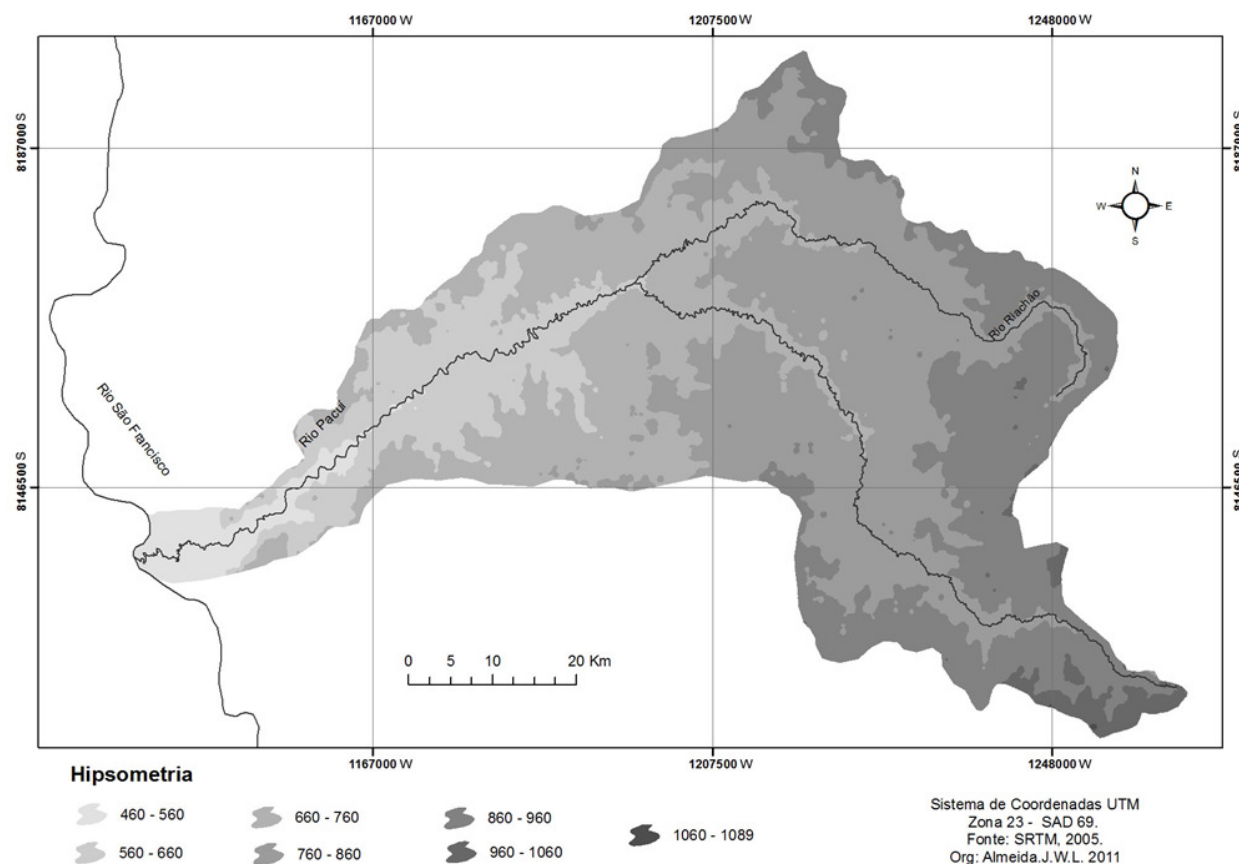


Fig. 4 - Hipsometria da bacia do rio Pacuí.

Tabela 1 - Declividade da Bacia do Pacuí.

Declividade (%)	Relevo	Área em (Km ²)	Área em (%)
0 - 3	Plano	1862	48%
03/ago	Suave ondulado	1258	32%
ago/20	Ondulado	587	15%
20 - 45	Fortemente ondulado	181	5%
45 - 75	Montanhoso	1,2	0%
> 75	Fortemente montanhoso	—	—

Fonte: EMBRAPA, 1979.

bacia hidrográfica é um importante parâmetro a ser mensurado, pois é um dos fatores que condicionam os usos do solo, o escoamento superficial e a capacidade de infiltração da água no solo.

De acordo com as classes encontradas na Fig. 05, observa-se que a maior parte da área da bacia corresponde ao relevo plano, com 48 %. O relevo com características suave ondulado tem uma representatividade significativa, com 32% da área da bacia do Pacuí. As classes: fortemente ondulado e montanhoso apresentam as menores classes de declividade por Km² na bacia do Pacuí. Tem-se, a seguir a Tabela 2, com a síntese dos parâmetros morfométricos encontrados, a partir do MDE-SRTM para a bacia hidrográfica do rio Pacuí.

Nesse contexto, o levantamento descritivo dos parâmetros morfométricos, encontrados a partir dos dados extraídos dos MDEs-SRTM, revelam aspectos condizentes com as características físicas (geomorfologia, geologia, solos) da bacia em estudo. Esse fato é comprovado por Cherem (2008) ao afirmar que o MDE-SRTM original, ou seja, na sua resolução espacial de 90 metros e em escala de análise coerente, tende a representar com consistência a morfologia e hidrologia do relevo.

Mesmo assim, ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados sobre algumas estimativas encontradas. Para isso, o trabalho *in loco* e a associação com outros elementos como a antropização da área devem ser avaliados neste tipo de análise.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Pacuí configura-se em mais um indicativo da aplicabilidade das técnicas instrumentalizadas em ambiente SIG. Em se tratando de estudos voltados para bacias hidrográficas no Norte de Minas, o uso de geotecnologias para a geração de dados

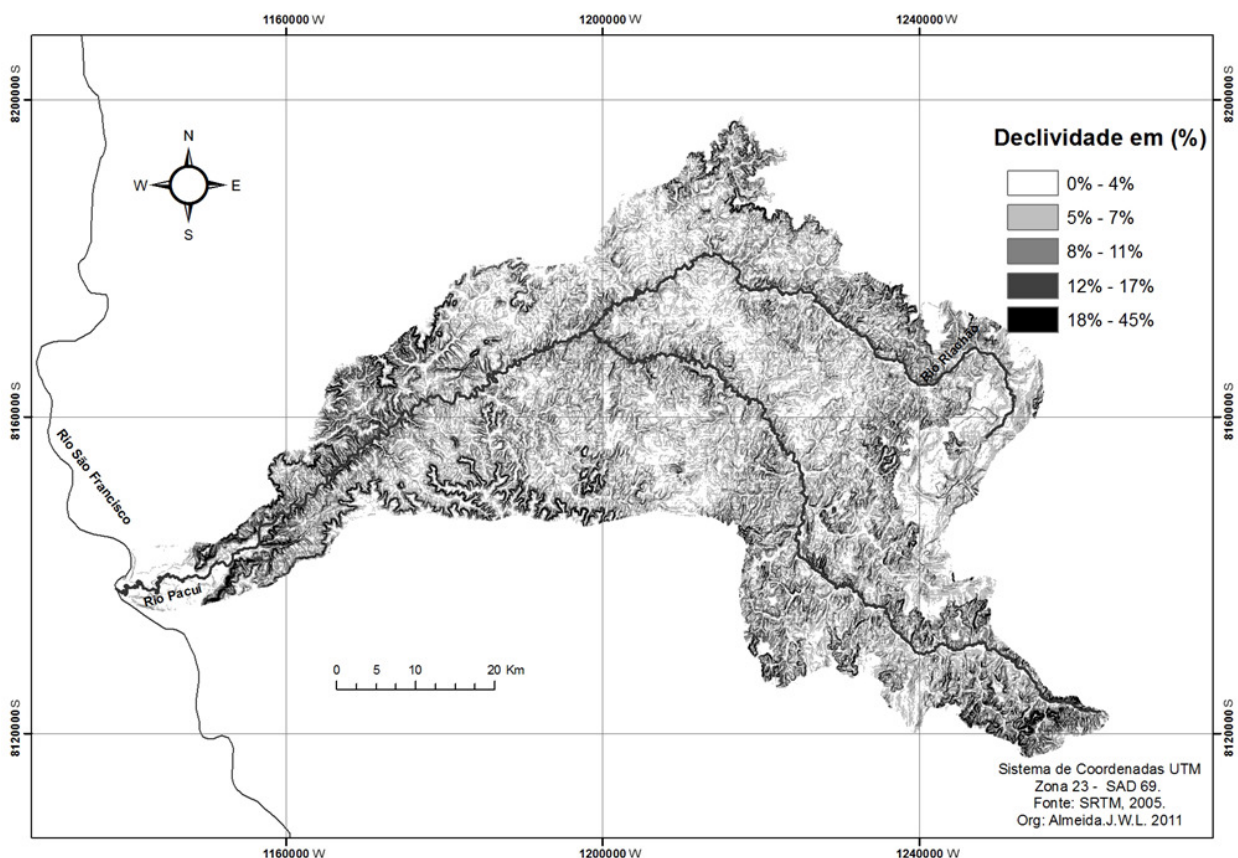
**Fig. 5** - Declividade da bacia do rio Pacuí.

Tabela 2 – Síntese dos parâmetros morfométricos da Bacia do rio Pacuí.

Parâmetros Morfométricos	Valores	Parâmetros Morfométricos	Valores
Área da bacia (A)	3899 Km ²	Rel. de bifurcação (Rb) - 4 ^o - 5 ^o ordem	5
Perímetro (P)	400 Km	Extensão do Percurso Superficial (Eps)	0,96 km
Comprimento da bacia (L)	124,2 km	Índice de sinuosidade (Is)	1,90 Km
Ordem da bacia	5 ^a	Índice de circularidade (Ic)	0,3
Número de canais	795	Fator forma (Kf)	0,25
Densidade de rios (Dr)	0,203 Km ²	Coefficiente de manutenção (Cm)	1923 m ² /m
Densidade de drenagem (Dd)	0,52 Km/Km ²	Relação de relevo (Rr)	5,06
Rel. de bifurcação (Rb) - 1 ^o - 2 ^o ordem	5,16	Índice de rugosidade (Ir)	326,56
Rel. de bifurcação (Rb) - 2 ^o - 3 ^o ordem	6,58	Altitude máxima (H1)	1089 m
Rel. de bifurcação (Rb) - 3 ^o - 4 ^o ordem	3,8	Altitude mínima (H2)	461m

Org: ALMEIDA, J.W.L, 2011.

morfométricos é incipiente. Nesse sentido, ressalta-se o pioneirismo deste estudo na região, sobretudo, quando leva em consideração a área escolhida e as técnicas adotadas para análises morfométricas.

Desse modo, um fator evidenciado atualmente é a facilidade de acesso a materiais que dinamizam a análise ambiental. A quantidade de dados disponíveis na rede mundial de computadores tem subsidiado diversos estudos, sendo fontes originárias de informações consistentes. O uso desses materiais apresentou resultados favoráveis para esse estudo, sendo relevantes para extrair os atributos concernentes à bacia hidrográfica do rio Pacuí, como também para a confecção de mapas.

Ressalta-se ainda que neste estudo, não foi realizada pesquisa de campo para comprovação dos dados, tendo em vista que o objetivo principal, concentra-se no uso das geotecnologias e na extração de dados para análise morfométrica descritiva da bacia do rio Pacuí. Desse modo, a metodologia usada foi pautada nos materiais, métodos e instrumentos presentes no arcabouço das geotecnologias que comprovaram ser de grande valia. Qualificando assim, como um instrumento capaz de auxiliar na geração de resultados consistente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do

rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 117-124, 2003.

CASTRO, P.; LOPES, J.D.S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, MG:CPT, 2001. 84p.

CHEREM, L. F. **Análise morfométrica da bacia do Alto Rio das Velhas - MG**. 2008. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Modelagem de Sistemas Ambientais. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais - IGC/UFMG, 111 p. Belo Horizonte, 2008.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 186p.

CPRM. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. 2003. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/>>. Acesso: abril de 2011.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. In: **REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS**, 10, 1979, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2008. 160p.

FONSECA, B. M. **O uso dos Sistemas de Informações Geográficas na Análise Morfométrica e Morfológica de Bacias de Drenagem na Serra do Espinhaço Meridional-**

- MG. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia, da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010. 93p.
- FLORENZANO, T. G. Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In FLORENZANO, T. G. (Org). **Geomorfologia conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2008. p. 36-71. 320p.
- GRANELL-PÉREZ, M. C. **Trabalhando Geografia com as cartas topográficas**. Ijuí: Ed. Unijuí, 2001. 128p.
- GUERRA, J. T. & CUNHA, S. B da (Org.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3ª edição. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2000. 394p.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrographical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v.56, n.2, p.275-370, 1945.
- IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo 2010. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 20 de maio de 2011.
- IGA, Instituto de Geociências Aplicadas. **Mapa Geomorfológico- Folha Montes Claros- MG**, 1977. Escala: 1:500.000.
- IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2006. Projeto **Proágua / Semiárido- Primeira Etapa do Plano Estadual De Recursos Hídricos De Minas Gerais**. Relatório Técnico 2. Contrato Agência Nacional de Águas – ANA, Governo do Estado de Minas, Contrato nº 010/2006, Setembro/2006, Rev 01.1.
- JESUS, N. de. **Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica de bacias hidrográficas**. 154 f. Tese (Doutorado em Análise Ambiental e Dinâmica Territorial). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009.
- LANA, C. E; CASTRO, P. T. A. Resposta da rede de drenagem à heterogeneidade geológica em bacias hidrográficas: uma comparação entre bacias do alto Rio das Velhas e Jequitaiá - MG. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, VI. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 2006. 11p.
- LEITE, M. E. **Geoprocessamento aplicado ao estudo do espaço urbano: o caso da cidade de Montes Claros/MG**. 161f. Dissertação de (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- LIMA, W. P. **Introdução ao manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: IPEF, 1996. 143p.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro. N 61/02, p. 137-151, 2009.
- NIMER, E. BRANDÃO, A. M.P. M, 1989. **Balanço Hídrico e Clima da região do Cerrado**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 166p.
- PRESS, F, SIEVER R, GROTZINGER, J. & JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra**. Tradução Rualdo Menegat, 4ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656p.
- RESCK, D. V. S. **Manejo e Conservação do Solo em Microbacias Hidrográficas**. Planaltina: Embrapa – CPAC, 1992. 17p. (EMBRAPA – CPAC. Documentos, 40).
- ROSIM, S.; PELLEGRINO, S. R. M. O SPRING e a Hidrologia: Início de uma Caminhada. In: Brazilian Symposium on Geoinformatics, III, 2001. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2001. 5p.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, New Jersey, v. 67, 1956. p. 597-646,
- SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T. **Mapeamento e inventário da flora nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: IEF/UFLA, 2006. 288p.
- SOUZA, C. R. de G. Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. São Paulo. Ano 6, n. 1, 2005. p. 45-61.
- TUCCI, C. E. M. ; MARQUES, D. M. (Org.). **Avaliação e controle da drenagem Urbana**. Editora da UFRGS: 2000. 748p.

Geotecnologias aplicadas à extração automática de dados morfométricos...

UFV, Universidade Federal de Viçosa –
Departamento de Solos- DPS/LABGEO. **Mapa
de Solos do Estado de Minas Gerais**, 2010.
Escala 1: 600.000