

Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas

República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Roberto Rodrigues

Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Conselho de Administração

Luís Carlos Guedes Pinto

Presidente

Sílvio Crestana

Vice-Presidente

Alexandre Kalil Pires

Cláudia Assunção dos Santos Viegas

Ernesto Paterniani

Hélio Tollini

Membros

Diretoria-Executiva da Embrapa

Sílvio Crestana

Diretor-Presidente

José Geraldo Eugênio de França

Kepler Euclides Filho

Tatiane Deane de Abreu Sá

Diretores-Executivos

Embrapa Monitoramento por Satélite

Evaristo Eduardo de Miranda

Chefe-Geral

Luís Gonzaga Alves de Souza

Chefe-Adjunto de Administração

Marcelo Guimarães

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

José Roberto Miranda

Chefe-Adjunto de Comunicação e Negócios



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Monitoramento por Satélite
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 0103-78110
Dezembro, 2005

Documentos 43

Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas

Marcos Cicarini Hott
André Luiz Santos Furtado

Campinas-SP
2005

Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 43
Área de Comunicação e Negócios

Exemplares desta publicação podem ser solicitados à:

Embrapa Monitoramento por Satélite

Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803 – Parque São Quirino

CEP 13088-300 Campinas, SP – BRASIL

Caixa Postal 491, CEP 13001-970

Fone: (19) 3256-6030

Fax: (19) 3254-1100

sac@cnpm.embrapa.br

http://www.cnpm.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José Roberto Miranda*

Secretária: *Shirley Soares da Silva*

Membros: *Carlos Alberto de Carvalho, Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues, Graziella Galinari, Luciane Dourado, Marcos Cicarini Hott, Maria de Cléofas Faggion Alencar*

1ª edição

1ª impressão (2005): 50 exemplares

Fotos: Arquivo da Unidade

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Hott, Marcos Cicarini

Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas / Marcos Cicarini Hott, André Luiz Santos Furtado. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005

25 p.: il. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 43)

ISSN 0103-78110

1. Bacias hidrográficas, 2. *AML*, 3. Sistemas de Informações Geográficas I. Furtado, André Luiz Santos. II. Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite (Campinas-SP) III. Título. IV. Série.

CDD 631.478161

© Embrapa Monitoramento por Satélite, dez. 2005

Autores

Marcos Cicarini Hott

Mestre em Ciência Florestal

Embrapa Monitoramento por Satélite

marcos@cnpm.embrapa.br

André Luiz Santos Furtado

Doutor em Ecologia

Embrapa Monitoramento por Satélite

andre@cnpm.embrapa.br

Apresentação

A água é um recurso de suma importância para a vida e, como tal, deve ser manejada de forma racional e sustentável. Ao percorrer os meandros das superfícies, após precipitação e afloramento, o recurso hídrico descreve uma rota em seu talvegue que pode revelar a natureza do solo e topografia que modela, e ao mesmo tempo quão frágil se torna diante das diversas intervenções humanas.

As linhas de cumeada e espigões vislumbrados na paisagem se configuram nos delimitadores de bacias e microbacias hidrográficas, as quais são importantes unidades de gerenciamento territoriais. O sensoriamento remoto e outras ferramentas de geotecnologias possibilitam a modelagem e mapeamento de bacias hidrográficas, agilizando a obtenção de resultados analíticos.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia automatizada em Sistemas de Informações Geográficas que visa mensurar a topografia de bacias hidrográficas por meio da obtenção de parâmetros que denotam suas características geomorfológicas, fornecendo informações importantes sobre a capacidade de suporte das mesmas aos diversos usos da terra.

Evaristo Eduardo de Miranda
Chefe-Geral
Embrapa Monitoramento por Satélite

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1. Material	9
2.1.1. Caracterização da área de estudo.....	9
2.1.2. Materiais Cartográficos e Iconográficos.....	9
2.1.3. Sistema de Informações Geográficas	12
2.2. Métodos.....	12
2.2.1. Modelagem Digital de Elevação.....	12
2.2.1.1. Refinamento do MDE	12
2.2.2. Desenvolvimento do método	12
2.2.2.1. Técnicas e arquivos usados	13
2.2.2.2. Confeção do aplicativo em AML	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1. Aplicativo desenvolvido no SIG	17
3.2. Parâmetros morfométricos gerados	18
4. CONCLUSÕES.....	23
5. REFERÊNCIAS.....	23

Índice de Figuras

Figura 1 - O município de Campinas no Estado de São Paulo	9
Figura 2 - Modelo digital de elevação do Município de Campinas.....	10
Figura 3 - Articulação das Cartas Topográficas do IBGE, em escala de 1:50.000, correspondentes ao Município de Campinas	11
Figura 4 - Delimitação das bacias hidrográficas de Campinas-SP	11
Figura 5 - Visualização tridimensional de uma microbacia hidrográfica de Campinas.	15
Figura 6 - Ilustração indicando como as direções de fluxo são representadas numericamente após sua determinação com o uso do MDE..	16
Figura 7 - Representação de uma ramificação hidrográfica e seu ordenamento pelo método de Strahler	16
Figura 8 - Fluxograma dos cálculos no SIG	18
Figura 9 - Dendograma construído a partir dos parâmetros morfométricos das bacias do município de Campinas	22

Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas

*Marcos Cicarini Hott
André Luiz Santos Furtado*

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural fundamental para a sobrevivência humana e o desenvolvimento da sociedade. A espacialização dos recursos hídricos, bem como a obtenção de parâmetros qualitativos e quantitativos determinam, em muitos casos, sua distribuição e a organização espacial e temporal dos organismos vivos. Nos continentes, em seu estado líquido, a água encontra-se encerrada, de maneira não definitiva em lagoas, lagos, infiltrada no subsolo e nos rios, os quais unidos à rede de drenagem formam a bacia hidrográfica, a qual é delimitada pela topografia do terreno.

A bacia hidrográfica se configura atualmente como umas das principais unidades de gerenciamento territorial que dispomos nas atividades agrossilvipastoris, sendo modelada pelas condições geológicas e climáticas locais. Entretanto, em função do desenvolvimento da sociedade, cada vez mais, as bacias hidrográficas têm sofrido alterações na estrutura física dos canais, no aporte de sedimentos, na composição da biota, no regime hidráulico e no fluxo de matéria e energia. Tais alterações e o padrão espacial do uso e cobertura do solo têm importantes efeitos sobre a produção e transporte de sedimentos (VANACKER *et al.*, 2005).

A hidrografia de uma bacia reflete a estrutura geológica (litológica e tectônica), a evolução morfogenética regional, o clima e as intervenções antrópicas. O uso das terras é a principal atividade humana que afeta a hidrografia de uma bacia, mas outras atividades, como a transposição, também podem causar consideráveis alterações (SNADDON *et al.*, 1998; LATRUBESSE *et al.*, 2005), definindo diferentes padrões ou modelos de drenagem básicos (dendrítico, paralelo, retangular, treliça, radial e anelar) e combinações de padrões (CUNHA, 1994; ALCÂNTARA, AMORIM, 2005).

A partir da década de 60, imagens obtidas por satélites têm sido utilizadas para a identificação, quantificação e monitoramento da paisagem do planeta. Atualmente, encontramos na atmosfera satélites equipados com diversos tipos de sensores, os quais são capazes de fornecer imagens sobre a temperatura da terra e do oceano (NASA, 2005), emissão de gases (TAKEUCHI *et al.*, 2003), aquíferos (KLOCK, UDLUFT, 2002; SARAF, CHOUDHURY, 1998) e biomassa vegetal (KASTURIRANGAN, 1996; VALTA-HULKONEN *et al.*, 2004).

Uma das possibilidades que as imagens de satélite nos oferece é o mapeamento e monitoramento das características fisiográficas do sistema fluvial, as quais são fundamentais para o estabelecimento de um sistema de informação, tendo por objetivo subsidiar medidas destinadas ao desenvolvimento de propostas de gestão ambiental (ROWNTREE, WADESON, 1998), prevenindo perdas econômicas e ecológicas.

Algumas características das bacias hidrográficas, tais como topografia e hidrografia, podem denotar a capacidade de suporte das mesmas às atividades agrícolas. No estudo da morfometria de bacias hidrográficas, vários parâmetros se destacam no contexto hidrológico, pedológico e, conseqüentemente, no uso da terra.

O uso da terra pode ser mapeado com o auxílio de imagens de sensoriamento remoto e fotogrametria, mediante validação de campo, bem como a extração de rede hidrográfica e geração de curvas de nível, fundamentais para o estudo de morfometria da superfície terrestre por meio de sua altimetria. Existem várias formas para a obtenção de informação altimétrica, desde o uso de pares estereocópicos de fotografias aéreas até o uso de laser aerotransportado, o qual pode fornecer altíssima precisão para estudos de perfis da superfície (PACHEPSKY *et al.*, 1997).

Os dados de sensoriamento remoto orbital atendem à necessidade de informação em diversas escalas, representando um meio viável de monitoramento da superfície terrestre através de satélites e seus sensores, e vem servindo de fonte de informações para estudos e levantamentos geológicos, agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, entre outros (NOVO, 1988; CRÓSTA, 1993). Os sensores medem a radiação refletida e/ou emitida pelos alvos, sendo passivos se necessitarem de uma fonte de luz externa (e.g., TM do Landsat) e ativos, caso possuam fonte própria de radiação, tais como radares e laser (MOREIRA, 2001).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) fornecem meios para o tratamento de dados georreferenciados de forma eficiente, com qualidade e rapidez, através de customizações e automatizações que permitem a padronização de resultados.

O ambiente de macro do ArcInfo Workstation 9 é formado pela edição em arquivos-texto, com os quais elabora-se uma seqüência de comandos e ou algoritmos específicos, permitindo a inserção de comandos para exibir menus e formulários projetados no software Formedit.

Esta pesquisa tem por objetivo aprofundar o conhecimento das características físicas da hidrografia e fornecer um retrato da situação atual dos canais fluviais e pluviais das bacias hidrográficas dos ribeirões Anhumas e Quilombo, e dos rios Capivari, Capivari-Mirim, Jaguari e Atibaia no município de Campinas, a partir da confecção de um aplicativo em Arc Macro Language (AML) para automatizar a extração de parâmetros morfométricos, possibilitando uma análise temporal da

evolução dos canais fluviais, a qual é fundamental para a aplicação de medidas mitigadoras e voltadas para o gerenciamento dos rios (WASKLEWICZ *et al.*, 2004).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material

2.1.1. Caracterização da área de estudo

Campinas está situada na porção Centro-Leste do Estado de São Paulo localizada nas coordenadas geográficas 22°53'20" sul e 47°04'40" de oeste, distando aproximadamente 100 km da capital do Estado. A área total do município é de aproximadamente 802,45 km². O relevo é predominantemente suave ondulado a ondulado com declives inferiores a 7%. Os solos campineiros são formados por latossolos vermelhos e vermelho-amarelos, argissolos vermelho-amarelos e nitossolos vermelhos, bem como gleissolos háplicos nos fundos de vales e terraços aluviais (BATISTELLA *et al.*, 2003).

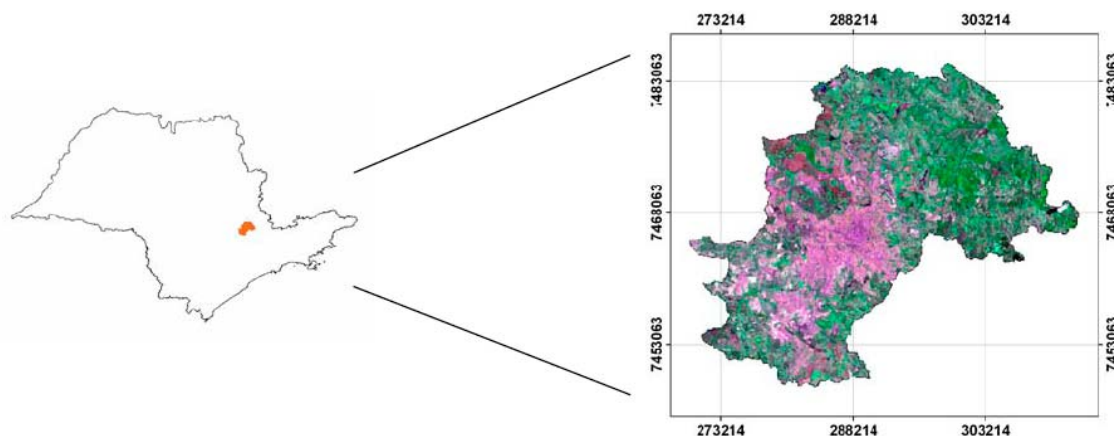


Figura 1 - O município de Campinas no Estado de São Paulo (BATISTELLA, *et al.* 2003).

2.1.2. Materiais Cartográficos e Iconográficos

Neste trabalho foram utilizados o SIG (Sistemas de Informações Geográficas) ArcInfo Workstation 9.0 (ESRI, 2004) e o modelo digital de elevação (MDE) do município como fonte de dados altimétricos, com 10 metros de resolução espacial.

Para a geração do MDE do Município de Campinas (Figura 2) foram utilizadas curvas de nível vetorizadas das Cartas Topográficas do IBGE (Figura 3), em escala 1:50.000, listadas abaixo:

- Folha Campinas (SF-23-Y-A-V-4) (IBGE, 1973);
- Folha Amparo (SF-23-Y-A-VI-1) (IBGE, 1983);
- Folha Indaiatuba (SF-23-Y-C-II-2) (IBGE, 1973);
- Folha Valinhos (SF-23-Y-A-VI-3) (IBGE, 1988);
- Folha Cosmópolis (SF-23-Y-A-V-2) (IBGE, 1988).

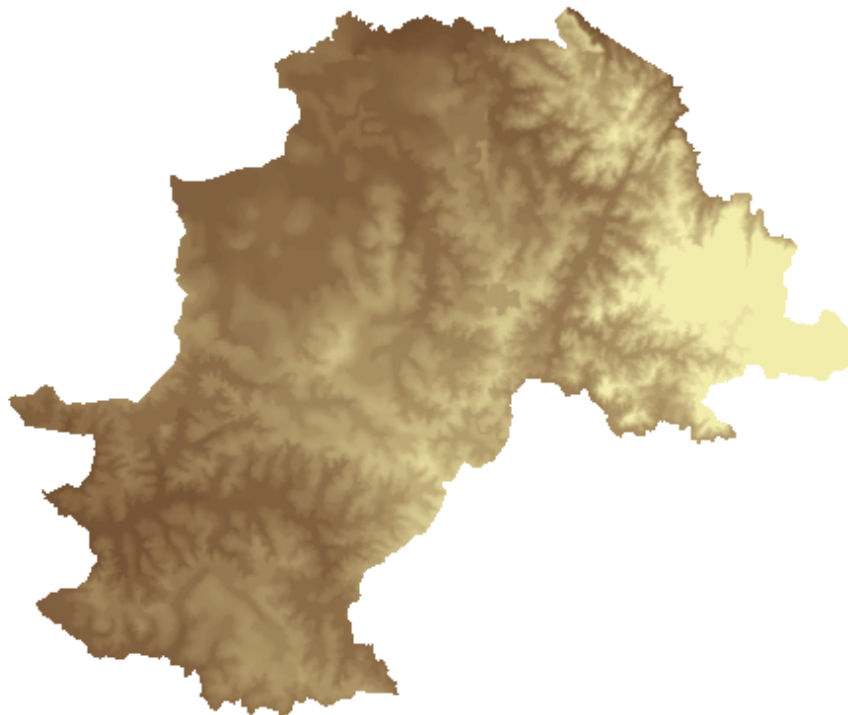


Figura 2 - Modelo digital de elevação do Município de Campinas.

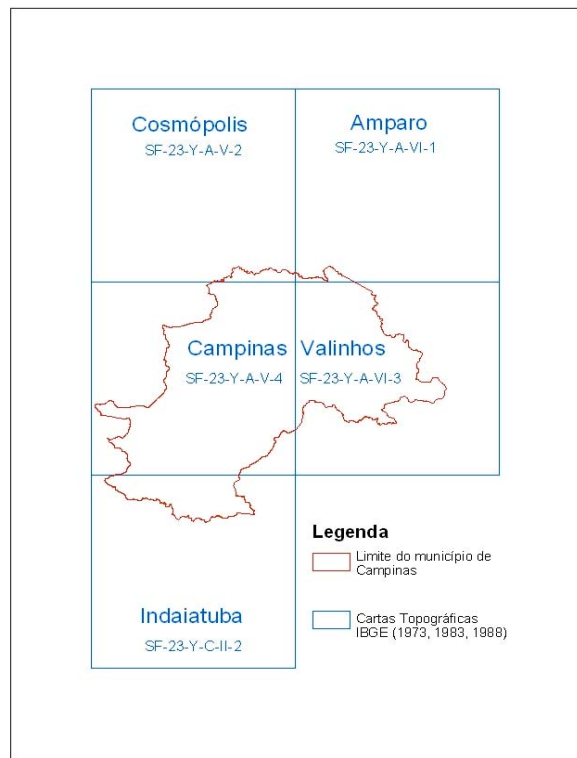


Figura 3 - Articulação das Cartas Topográficas do IBGE, em escala de 1:50.000, correspondentes ao Município de Campinas.

Foram utilizados também os arquivos vetoriais de hidrografia (Figura 4) e drenagem, ambos na escala 1:50.000, limites das bacias, exutórios das bacias e nascentes dos rios ou córregos principais.



Figura 4 – Delimitação das bacias hidrográficas de Campinas - SP.

2.1.3. Sistema de Informações Geográficas

O uso de Sistemas de Informações Geográficas comerciais toma um lugar de destaque em atividades que demandam o tratamento de grande volume de dados. O SIG ArcInfo Workstation 9 integra a família ArcGIS como uma opção para usuários que ainda não migraram completamente sua base geográfica para a nova plataforma da empresa Esri, que demandam rapidez, robustez, versatilidade e que se sentem seguros na confecção de aplicativos no ambiente de macro do *software*, o qual congrega a linguagem AML (Arc Macro Language) e a criação de formulários e menus pelo módulo Formedit.

O arquivo de extensão *.aml é um texto que contém seqüências de comandos e algoritmos que formam o aplicativo, muito apropriado para automatizar processos repetitivos e customizar formas de tratamento de dados.

2.2. Métodos

Para o desenvolvimento dessa metodologia foram usados parâmetros constantes em literatura e adaptados através da aplicação de técnicas envolvendo sistemas de informações geográficas (SIGs) e modelagem digital de elevação.

2.2.1. Modelagem Digital de Elevação

Um dos mapas digitais necessários para a execução do trabalho é o mapa raster de elevação ou terreno. Para a geração de um modelo digital de elevação é necessário lançar mão de uma fonte de dados altimétricos a partir de tecnologias, tais como radar, laser ou aerofotogrametria.

Neste trabalho, optamos por utilizar curvas de nível oriundas de restituição fotogramétrica. De posse das curvas de nível no formato digital, estas foram inseridas no módulo Topogrid do ArcInfo Workstation para a interpolação e geração do modelo digital de elevação com células (pixels) de 10 metros de resolução espacial, compatível com a escala de 1:50.000.

2.2.1.1. Refinamento do MDE

O processo de refinamento consiste basicamente na eliminação de eventuais depressões espúrias, as quais podem ser relatadas no arquivo de *sinks* gerado durante a interpolação das curvas de nível e são indesejáveis no estudo do escoamento superficial.

2.2.2. Desenvolvimento do método

A derivação de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas demanda um trabalho árduo quando se utiliza métodos analógicos ou mesmo computacionais com interação do usuário. Os recursos disponíveis no SIG permitem a eficiente obtenção de dados sobre os elementos e fenômenos envolvidos na estrutura das bacias representadas por modelos digitais.

O método usado para a determinação automática dos parâmetros morfométricos foi desenvolvido por meio da linguagem de macro do ArcInfo Workstation (AML–*Arc Macro Language*). A linguagem AML proporciona a confecção de aplicativos de fácil manuseio e execução, sendo sua estrutura bastante intuitiva.

Os parâmetros foram gerados para as bacias hidrográficas no município de Campinas-SP, área esta que permitiu uma abordagem piloto versátil com testes e consistências de forma eficazes.

2.2.2.1. Técnicas e arquivos usados

O escoamento superficial do terreno pode ser modelado a partir de modelos matriciais no SIG. Um modelo de dados matricial é uma representação em grade regular, na qual pixels dispostos em uma malha quadricular têm atributos de valor. Desta forma, na representação do terreno cada pixel têm um valor de altitude, sendo que a cada valor ou conjunto de valores (classes) pode ser atribuída uma cor.

Foi usado um modelo digital de elevação, interpolado a partir de curvas de nível, para a derivação da drenagem numérica e obtenção da declividade média da bacia.

A hidrografia mapeada e a drenagem numérica, bem como o limite da bacia foram representados no formato vetorial, os quais foram usadas para a determinação de diversos parâmetros. A drenagem numérica foi obtida a partir do MDE, após a elaboração do mapa de direção de fluxo e fluxo acumulado superficial.

Também foram gerados os pontos de foz e nascente (formato vetorial) para a hidrografia mapeada e rio principal, respectivamente, os quais foram úteis em alguns passos do método.

Foram usados os seguintes arquivos:

- Modelo digital de elevação da bacia
- Hidrografia mapeada
- Drenagem numérica
- Foz relativa à hidrografia mapeada
- Nascente relativa ao rio principal
- Limite da bacia hidrográfica

Os arquivos devem ser previamente preparados no ambiente do SIG. O modelo digital de elevação, a hidrografia e a drenagem devem ser recortados para terem as dimensões exatas da bacia hidrográfica, bem como os pontos de nascente e foz bem posicionados sobre o alinhamento da hidrografia.

Os parâmetros escolhidos para determinação foram selecionados a partir do trabalho de Pissara *et al.*(2004).

Foram determinados os seguintes parâmetros relativos à drenagem da bacia:

- Comprimento da rede de drenagem (m)
- Área da bacia (m²)
- Perímetro da bacia (m)
- Número de segmentos de rios
- Densidade de drenagem (km/km²)
- Frequência de rios (n^o/km²)
- Razão de textura (n^o/km)
- Extensão de percurso superficial (km)
- Coeficiente de manutenção

Foram determinados os seguintes parâmetros relativos ao relevo da bacia:

- Menor altitude (m)
- Maior altitude (m)
- Amplitude altimétrica (m)
- Razão de relevo (m/m)
- Razão de relevo relativo (m/m)
- Índice de rugosidade
- Declividade média (%)
- Coeficiente de rugosidade

As ferramentas de modelagem hidrológica disponíveis no ArcInfo Workstation possibilitaram inserir consistência hidrológica no modelo digital, bem como refiná-lo para que o fluxo do escoamento superficial pudesse ser explorado para auxiliar na delimitação da bacia hidrográfica (Figura 6), no ordenamento da hidrografia e no posterior cálculo do número de segmentos de rios.

O fluxo superficial é representado por dados numéricos que representam direções e derivado através do modelo D8, utilizado pelo SIG ArcInfo Workstation 9 (Figura 7), no qual a direção resultante numa vizinhança 3 x 3 é atribuída ao pixel central e, assim, as conformações dessas direções materializam os vales existentes entre as elevações ou a rede de drenagem.

O ordenamento da hidrografia foi necessário para a individualização dos canais ou segmentos de rios existentes, pois as confluências de afluentes e tributários podem criar segmentos indesejáveis.

Assim, a ordem do segmento independe das confluências intermediárias existentes, sendo usado para tal o método de Strahler (Figura 8).

A obtenção de comprimento total dos arcos da drenagem e hidrografia, bem como dos valores de altitude máxima e mínima, foi possível com o uso de ferramenta estatístico do SIG.

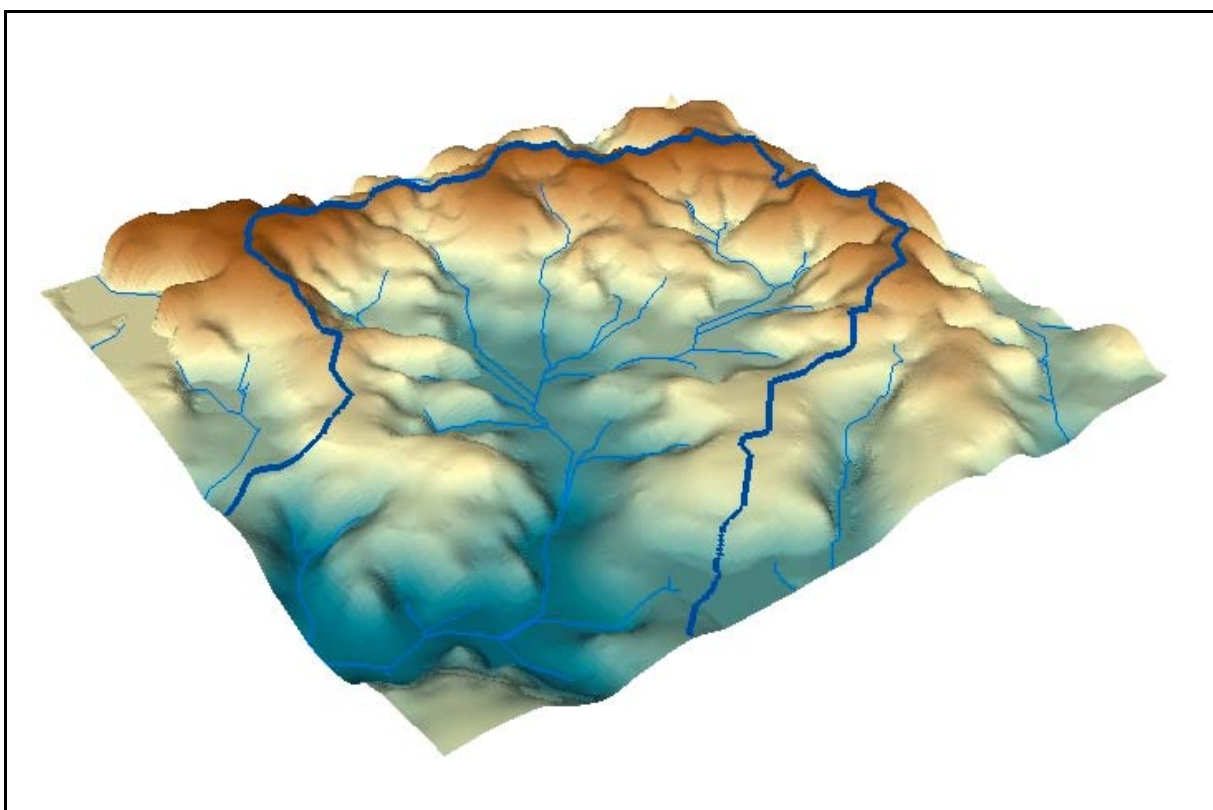


Figura 5 - Visualização tridimensional de uma microbacia hidrográfica de Campinas. As linhas azuis escuras representam os divisores d'água ou linhas de cumeadas.

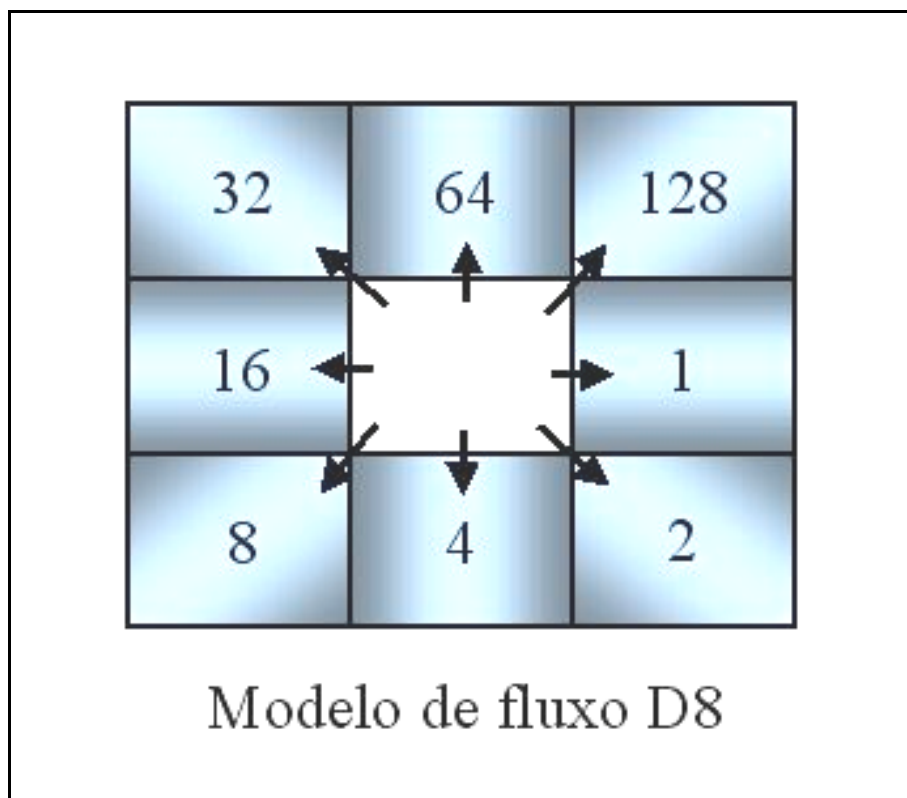


Figura 6 - Ilustração indicando como as direções de fluxo são representadas numericamente após sua determinação com o uso do MDE. As maiores diferenças de nível no terreno e declividades ao redor do pixel central resultarão na direção de fluxo que será atribuída ao pixel central, por meio do código numérico representado na figura.

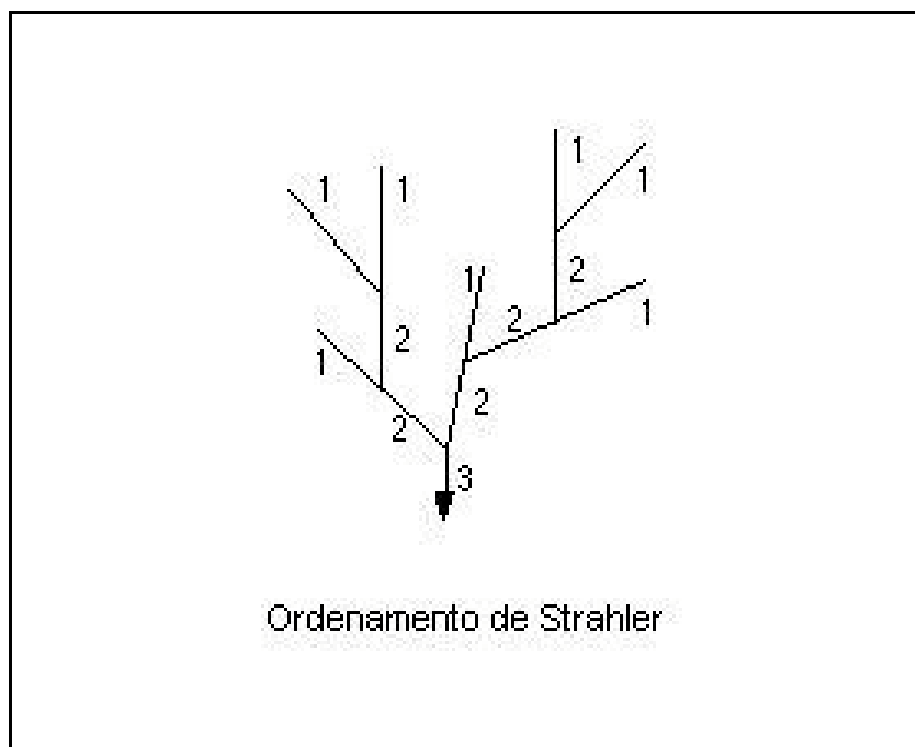


Figura 7 - Representação de uma ramificação hidrográfica e seu ordenamento pelo método de Strahler (1957). Os números indicam a ordem dos rios.

2.2.2.2. Confeção do aplicativo em AML

O aplicativo em AML foi desenvolvido a partir de um editor de texto e gravado com a extensão *.aml. Para este objetivo não foram confeccionados menus para melhorar a usabilidade da macro, mas com o aumento da demanda de processamento e interface com o usuário estão previstas melhorias, tais como a inserção de menus e formulários.

O algoritmo construído requisita os mapas necessários, bem como a escala compatível para a geração e interpretação dos resultados, estando esta ligada intimamente à resolução espacial do modelo digital de elevação. Portanto, a hidrografia mapeada deve ter a mesma escala cartográfica de origem.

Como resultado do processamento para extração dos parâmetros morfométrico úteis na análise da bacia hidrográfica, gerou-se um relatório com extensão *.txt contendo todas as informações tabuladas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obteve-se, como resultado, um aplicativo validado compatível com o SIG ArcInfo Workstation 9 para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas, cujo fluxograma está na Figura 11, e um relatório contendo todos os parâmetros de interesse calculados para as bacias do município de Campinas-SP, como mostra a Tabela 1.

3.1. Aplicativo desenvolvido no SIG

O aplicativo desenvolvido em AML para a realização dos cálculos foi denominado Morfometria, o qual consiste em um arquivo-texto com extensão *.aml contendo toda a seqüência de comandos e algoritmos necessários para execução do trabalho de forma automática.

Os mapas de hidrografia mapeada, drenagem, delimitação da bacia, foz da bacia, nascente do rio principal e modelo digital de elevação, bem como a escala de análise, são requisitados no início do processo e, em seguida, todos os cálculos são realizados, conforme fluxograma na Figura 8.

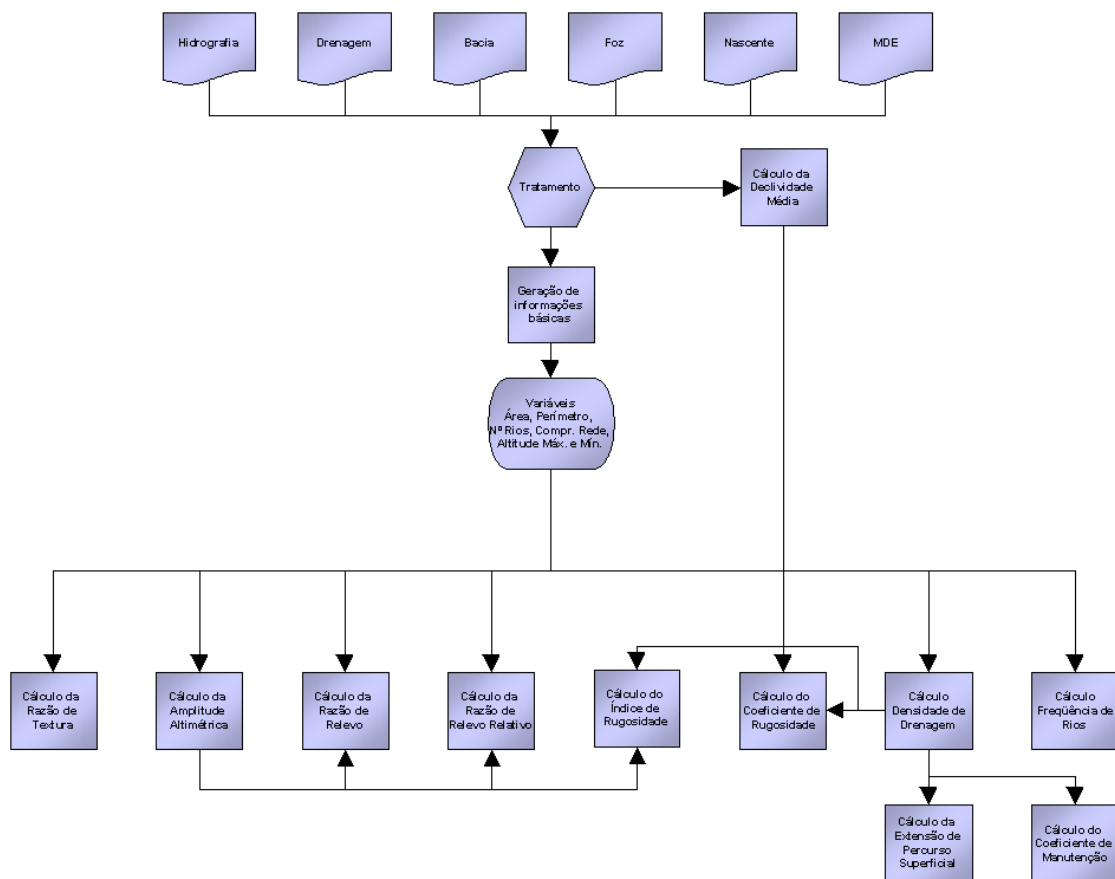


Figura 8 - Fluxograma dos cálculos no SIG.

3.2. Parâmetros morfométricos gerados

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros morfométricos calculados das bacias hidrográficas do Município de Campinas. As Bacias dos rios Atibaia e Capivari apresentam maior rede de drenagem, área e perímetro. A Bacia do Anhumas, comparativamente, pode ser considerada intermediária em relação a estes parâmetros e as bacias dos rios Jaguari, Capivari-Mirim e Quilombo são menores. O padrão de drenagem foi dendrítico exorreico, refletindo, em parte a geologia da região, sendo que, em geral, este padrão é observado na presença de rochas com resistência uniforme.

As diferenças composicionais e as estruturas maiores das rochas condicionam resistências distintas frente aos processos de intemperismo e erosão, o que pode ser observado no município de Campinas, pois esta região está inserida na zona de contato representada pelas litologias da porção nordeste da Bacia do Paraná e o Embasamento Cristalino. O tectonismo que atuou sobre o embasamento rochoso originou falhas e sistemas de fraturas que também condicionaram a esculturação do relevo e a disposição dos sistemas de drenagem, destacando-se na região de Campinas a Zona de Cisalhamento Valinhos e a Zona de

Cisalhamento Campinas, com direção N30E (YOSHINAGA *et al.*, 1993). As deformações a que estas rochas foram submetidas, causaram um fraturamento segundo as direções N30E e N50W.

O rio Atibaia tem alguns trechos orientados segundo estas direções, sendo a Zona de Cisalhamento Valinhos a estrutura mais marcante. Nas bacias dos rios Jundiá, Atibaia e do ribeirão Anhumas, no relevo de Morros Paralelos as drenagens principais estão condicionadas pela orientação da Zona de Cisalhamento Valinhos, enquanto que, seus afluentes de primeira ordem apresentam expressivo controle estrutural de direção NW (YOSHINAGA, *et al.*, 1993).

Este tipo de relevo tem influência no índice de rugosidade e na declividade média e no coeficiente de rugosidade, os quais aparecem na Tabela 1, respectivamente, com os seguintes valores 968,7, 12,5 e 23,9 para a bacia do rio Atibaia e 825,8, 17,7 e 34,5 para a do rio Jaguari. São também as bacias hidrográficas de maior altitude e amplitude altimétrica.

Apesar de apresentar área e comprimento da rede de drenagem, aproximadamente, 5 vezes superior àquela verificada para a Bacia do Jaguari, a Dd da Bacia Capivari foi similar à calculada para as demais bacias. A alta amplitude altimétrica (508,7 m) verificada nesta bacia não favoreceu a formação de canais de rios.

Para todas as bacias estudadas, a densidade de drenagem foi baixa ($< 7,5 \text{ km/km}^2$; CHRISTOFOLETTI, 1969), principalmente, se considerarmos o nível de detalhamento da escala utilizada (1:50.000). Altos valores de amplitude altimétrica, como os observados, tendem a favorecer a formação de canais, mas altas taxas de infiltração da água no terreno, responsáveis pela redução da escavação, poderiam explicar a baixa Dd.

As rochas básicas são pouco resistentes ao intemperismo, pois os minerais constituintes são muito instáveis em superfície. Nas áreas onde ocorrem estas rochas, predomina o padrão de drenagem dendrítico de baixa densidade (1,5 a 1,6, Tabela 1). A pequena amplitude e suavidade do relevo, para as bacias dos rios Capivari-Mirim e Capivari, condicionam a pouca energia de seus rios e um maior desenvolvimento das planícies fluviais, com vales abertos e canais longos, tanto de primeira ordem como os principais.

A geologia da região também exerce marcante influência sobre a formação dos canais. Considerando que as bacias estão submetidas às mesmas condições climáticas, os valores de razão de textura indicam que o terreno nas três maiores bacias permite menor infiltração, conseqüentemente, maior escoamento superficial. Entretanto, fatores antrópicos como a urbanização e a agricultura podem provocar consideráveis alterações na Dd principalmente, devido à utilização dos recursos hídricos, sugerindo que, em Campinas, a disponibilidade de água poderá tornar-se crítica no futuro. Em geral, microrbacias de grande

porte ($> 40 \text{ km}^2$), como as analisadas neste estudo, tendem a apresentar valores de Dd variando de 3 a 4 km/ km² (COLLARES, 2000).

O coeficiente de manutenção (Cr), que representa a área mínima para o desenvolvimento de um canal de drenagem, e a extensão de percurso superficial não mostraram acentuada diferença entre as bacias, apesar das diferenças nas características do relevo, como pode ser visto pelos valores de razão de relevo. Mas, observou-se correlação linear negativa entre Cr e a declividade média ($r^2 = 0,73$; $n = 6$), indicando que as bacias com maior declividade proporcionam condições mais favoráveis à formação de canais, conseqüentemente, apresentam menor Cr. Como resultado, a velocidade de escoamento nas bacias Atibaia e, principalmente, Jaguari é superior que nas demais; nestas bacias a conservação da vegetação ciliar assume maior relevância para a prevenção das cheias e redução na erosão do solo.

O índice de rugosidade (Hd) entre as bacias variou consideravelmente, resultado das diferenças na amplitude altimétrica, uma vez que, a Dd foi similar para todas as bacias e não foi relacionado à área de cada bacia. Por exemplo, para as bacias Atibaia e Capivari delimitou-se áreas similares, mas o Hd da primeira foi 2,5 vezes superior. Por outro lado, todas as bacias apresentaram valores de extensão de percurso superficial similares, ou seja, não houve diferença entre as bacias na distância média percorrida pela água pluvial até encontrar um canal, a partir do interflúvio.

A análise morfométrica mostrou acentuada diferenciação entre as bacias, podendo ser agrupadas em três grupos distintos com base na Tabela 1. Um grupo formado pelas maiores bacias, Atibaia e Capivari, um grupo intermediário, representado pela bacia Anhumas, e um terceiro grupo, no qual estariam inseridas as bacias Capivari-Mirim, Jaguari e Quilombo. Outro agrupamento pode ser feito com base no coeficiente de rugosidade (BARACUHY *et al.*, 2003). As Bacias Anhumas, Capivari-Mirim e Quilombo seriam mais aptas para atividades agrícolas e Capivari para a pecuária. A maior bacia da região, Atibaia, apresentaria características para o desenvolvimento da pecuária e florestamento e a menor bacia, Jaguari, mostra maior vocação para o florestamento. Contudo, considerando a declividade média (Dme), observa-se que a área mínima coberta por floresta na Bacia do Atibaia deve ser de 25%, enquanto que para a Bacia do Jaguari este valor deve ser duas vezes superior. As demais Bacias apresentaram Dme inferior a 10%, portanto, necessitando apenas de medidas conservacionistas.

Tabela 1 – Parâmetros morfométricos calculados para as bacias de Campinas.

Parâmetro		Bacias					
		Anhumas	Atibaia	Capivari	Capivari-Mirim	Jaguari	Quilombo
Comprimento da rede de drenagem	km	288,8	440,9	410,7	95,3	93,2	106,3
Área	km ²	174,9	231,5	219,1	58,2	47,7	70,4
Perímetro	km	75,3	107,8	94,4	47,0	49,5	40,9
Número de Segmentos de rios	nº	409	613	468	154	118	153
Densidade de drenagem	km/Km ²	1,6	1,9	1,9	1,6	1,9	1,5
Frequência de rios	nº/km ²	2,3	2,6	2,1	2,6	2,5	2,2
Razão de textura	nº/km ²	5,4	5,7	5,0	3,3	2,4	3,7
Extensão de percurso superficial	km	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3
Coefficiente de manutenção	m ²	605,9	525,2	533,5	610,8	511,7	662,5
Menor altitude	m	580,0	579,7	576,9	578,6	564,1	600,0
Maior altitude	m	766,1	1088,5	785,9	704,5	986,7	749,5
Amplitude altimétrica	m	186,3	508,7	209,0	125,8	422,6	149,6
Razão de relevo	m/m	0,0076	0,0002	0,0084	0,0070	0,0275	0,0101
Razão de relevo relativo	m/m	0,0025	0,0047	0,0022	0,0027	0,0085	0,0040
Índice de rugosidade		307,5	968,7	391,9	206,0	825,8	225,8
Declividade média		5,2	12,5	7,5	5,2	17,7	3,5
Coefficiente de rugosidade		8,6	23,9	14,0	8,4	34,5	5,3

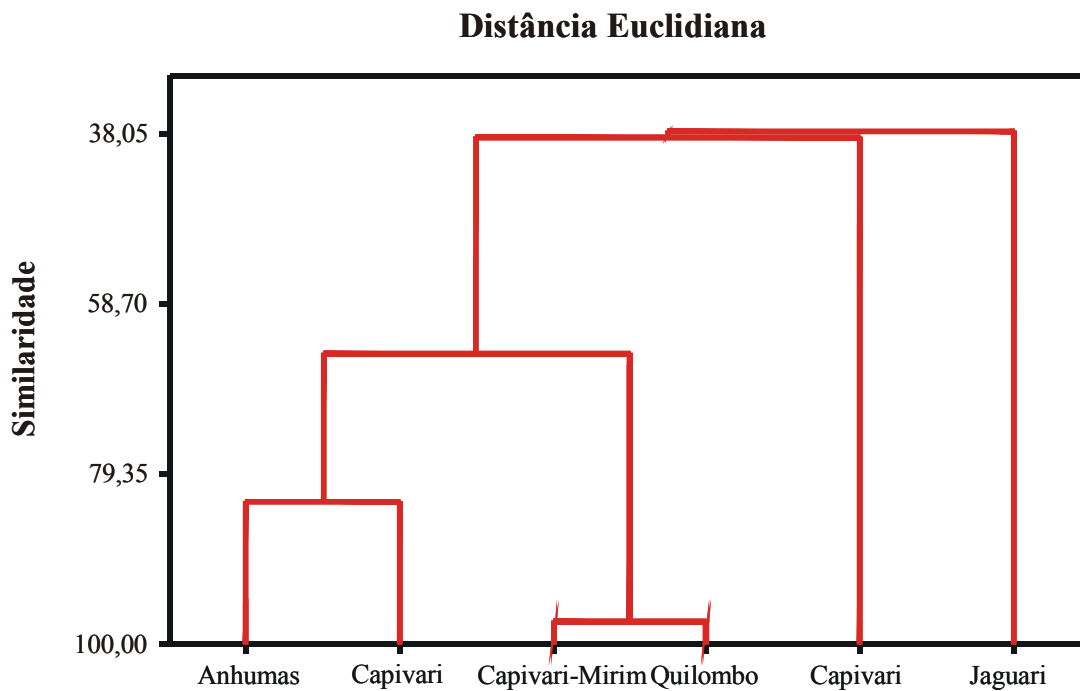


Figura 9 - Dendrograma construído a partir dos parâmetros morfométricos das bacias do município de Campinas.

Por outro lado, a análise de Cluster (Figura 9), também conhecida como análise de agrupamentos, que permite agrupar objetos semelhantes entre si. O cluster 1 foi formado por duas bacias, Anhumas e Capivari, as quais apresentaram similaridade superior a 70%. As bacias Capivari-Mirim e Quilombo formaram o segundo cluster, com similaridade próxima a 100%, sendo a característica deste agrupamento a similaridade de nos parâmetros morfométricos, como por exemplo, comprimento, perímetro, coeficiente de manutenção, entre outros. Por sua vez, a maior bacia da região, Atibaia, e a menor, Jaguari, formaram dois cluster distintos, os quais apresentaram altos valores de índice de rugosidade, declividade média e coeficiente de rugosidade.

4. CONCLUSÕES

O aplicativo desenvolvido em AML permitiu a realização dos cálculos com rapidez e a geração de parâmetros robustos para as bacias hidrográficas analisadas.

Com base no coeficiente de rugosidade, o qual pode fornecer informações sobre a aptidão das terras para atividades agropecuárias, as bacias do Anhumas, do Capivari-Mirim e do Quilombo seriam mais aptas para atividades agrícolas, a bacia do Capivari para a pecuária. A maior bacia da região, do Atibaia, apresenta características para o desenvolvimento da pecuária e florestamento e a menor bacia, do Jaguari, mostra maior vocação para o florestamento.

5. REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E. H.; AMORIM, A. de J. Análise morfométrica de uma bacia hidrográfica costeira: um estudo de caso. **Caminhos de Geografia**, v. 7, n. 14, p. 70-77, 2005.

BARACUHY, J. G. de; KURTZ, S. M. de J. M.; KURTZ, F. C.; DUARTE, S. M. A.; LIMA, V. L. A. de; ROCHA, J. S. M. da; NETO, J. D. Deterioração físico-conservacionista da microbacia hidrográfica do riacho Paus Brancos, Campina Grande, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.159-164, 2003.

BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; PANCIERA, F.; ASSIS, M. C. de; VALLADARES, G. S. **Base de dados geográficos para o município de Campinas com ênfase no uso e cobertura das terras**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2003. 45 p., il. (Documentos, 26).

COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia do Rio Capivari, SP**. 193 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2000.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 9, n.18, p. 35-64, 1969.

CUNHA, S. B. Geomorfologia fluvial. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p. 211-252.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. ver. Campinas: UNICAMP-IG, 1993. 164 p.

ESRI. **Geoprocessing in ArcGIS**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2004. 368 p.

IBGE. **Amparo - folha topográfica (SF-23-Y-A-VI-1)**. Escala: 1:50.000. Rio de Janeiro, 1983.

IBGE. **Campinas - folha topográfica (SF-23-Y-A-V-4)**. Escala: 1:50.000. Rio de Janeiro, 1973.

IBGE. **Cosmópolis - folha topográfica (SF-23-Y-A-V-2)**. Escala: 1:50.000. Rio de Janeiro, 1988.

IBGE. **Indaiatuba - folha topográfica (SF-23-Y-C-II-2)**. Escala: 1:50.000. Rio de Janeiro, 1973.

IBGE. **Valinhos - folha topográfica (SF-23-Y-A-VI-3)**. Escala: 1:50.000. Rio de Janeiro, 1988.

KASTURIRANGAN, K. Gound based measurements for interpretation of vegetation indices over developing countries. **Advances in Space Research**, v. 17, n. 8, p. 31-40, 1996.

KLOCK, H.; UDLUFT, P. Mapping groundwater recharge and discharge zones in the Kalahari: a remote sensing approach. **Arid Lands 51**, on line, 2002. Disponível em: <<http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln51/klock.html>>. Acesso em: 18 nov. 2005.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical rivers. **Geomorphology**, v. 70, n. 3-4, p. 187-206, 2005.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

NASA. **Website principal**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/gallery>>. Acesso em: out. 2005.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blüncher, 1988. 308 p.

PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; GIMENEZ, D. Fractal modeling of airborne laser altimetry data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 150-161, 1997.

PISSARA, T. C.; POLITANO, W; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características

morfométricas na relação solo-superfície da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 297-305, 2004.

ROWNTREE, K.; WADESON, R. A geomorphological framework for the assessment of instream flow requirements. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, v. 1, n. 2, p. 125-141, 1998.

SARAF, A. K.; CHOUDHURY, P. R. Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge site. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n.10, p. 1825-1841, 1998.

SNADDON, C. D.; WISHART, M. J.; DAVIES, B. R. Some implications of inter-basin water transfer for river ecosystem functioning and water resources management in southern Africa. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, v. 1, n. 2, p. 159-182, 1998.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transaction of the American Geophysical Union**, v. 36, n. 6, p. 913-920, 1957.

TAKEUCHI, W.; TAMURA, M.; YASUOKA, Y. Estimation of methane emission from West Siberian wetland by scaling technique between NOAA AVHRR and SPOT HRV. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, n. 1 p. 21-29, 2003.

VALTA-HULKKONEN, K.; KANNINEN, A.; PELLIKKA, P. Remote sensing and GIS for detecting changes in aquatic vegetation of a rehabilitated lake. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 24, p. 5745-5758, 2004.

VANACKER, V.; MOLINA, A.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DERCON, G.; DECKERS, S. River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. **Geomorphology**, v. 72, n. 1-4, p. 340-353, 2005.

WASKLEWICZ, T. A; ANDERSON, S.; LIU, P.-S. Geomorphic context of channel locational probabilities along the lower Mississippi River, USA. **Geomorphology**, n. 63, n. 3-4, p. 145-158, 2004.

YOSHINAGA, S.; PIRES NETO, A. G. (coords). **Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas. Programa: Cartas Geológicas e Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. v. 1-3.



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Monitoramento por Satélite
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803 - Parque São Quirino
CEP 13088-300, Campinas-SP - Brasil
Fone (19) 3256-6030 Fax (19) 3254-1100
<http://www.cnpm.embrapa.br> sac@cpnm.embrapa.br