

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/6: 1231-1245
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

A CARTOGRAFIA DA DISSECAÇÃO VERTICAL PARA AVALIAÇÃO DO RELEVO: PROPOSTA DE TÉCNICA AUTOMÁTICA

*The Cartography of Vertical Dissection to Evaluate the Relief:
a Proposal of an Automatic Technique*

**Mateus Vidotti Ferreira¹, Thais Minatel Tinós¹, Leandro de Godoi Pinton²
& Cenira Maria Lupinacci³**

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP
Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente
Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro/SP, Brasil
mateusvidotti@yahoo.com.br, thaistinos@gmail.com

²Universidade Estadual Paulista, UNESP
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro/SP, Brasil
gpgeo@yahoo.com.br

³Universidade Estadual Paulista, UNESP
Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento - Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro/SP, Brasil
cenira@rc.unesp.br

Recebido em 19 de Novembro, 2014/ Aceito em 01 de Junho, 2015
Received on November 19, 2014/ Accepted on June 01, 2015

RESUMO

A análise das variáveis geomorfológicas fornece dados quantitativos que permitem uma avaliação da potencialidade morfológica dos terrenos. A dissecção vertical se destaca como uma variável que representa a altitude relativa do relevo, refletindo seu grau de entalhamento. Essa variável é de extrema relevância para a identificação de áreas mais susceptíveis a ações gravitacionais e, portanto, mais frágeis aos processos denudativos. Tradicionalmente, a obtenção de dados de dissecção vertical era um trabalho moroso, mas com a evolução das técnicas digitais, a análise dessa variável pode ser tornar mais rápida e precisa. O objetivo desse artigo é apresentar e discutir uma nova técnica automática desenvolvida em meio digital para a aquisição de dados da dissecção vertical do relevo. A fim de avaliar os resultados, é apresentada ainda uma análise comparativa com um mapeamento elaborado de forma semiautomática. A área de estudo abarca a bacia hidrográfica do Córrego do Cavalheiro (Analândia - SP) e a escala trabalhada é de 1:10.000. Os resultados obtidos demonstram que a técnica automática proposta neste trabalho se mostrou vantajosa para o mapeamento da dissecção vertical perante a técnica semiautomática. A nova técnica proporcionou um ganho significativo de tempo, replicabilidade e confiabilidade devido ao uso de algoritmos computacionais, que minimizam a subjetividade inerente aos processos analógicos.

Palavras chaves: Análise Morfológica, Mapeamento Automático, Bacia Hidrográfica.

ABSTRACT

The analysis of geomorphometric variables provides quantitative data that allows an assessment of the morphogenetic potential of the land. The vertical dissection is one of the most important variables to represent the relative altitude of the relief, reflecting its incision. This variable is extremely important to identify areas which are more susceptible to gravitational and erosional processes as well. Obtaining vertical dissection data used to be a lengthy process, but with the evolution of digital techniques, this analysis is faster and accurate. The objective of this paper is to present and discuss a new automatic technique to obtain vertical dissection data regarding the relief. A comparative analysis with a semi-automatic mapping was also performed. The study area is the Cavalheiro Stream Basin – Analândia city (SP), on scale of 1:10.000. The results showed that the automatic technique is more appropriate for vertical dissection mapping than the semi-automatic technique. The new technique allows the application with significant savings in time, replicability and reliability due to the use of computational algorithms which minimize the inherent subjectivity of analogical processes.

Keywords: Morphometric Analysis, Automatic Mapping, Watershed.

1. INTRODUÇÃO

A análise das variáveis geomorfométricas fornece dados quantitativos que permitem uma avaliação hierárquica da potencialidade da geometria do relevo de ambientes qualitativamente distintos para o desenvolvimento de processos morfogenéticos. Horton (1945), Strahler (1964), Tricart (1965), Evans (1972) e Christofolletti (1980), entre outros importantes pesquisadores, consideram os dados geomorfométricos de extrema relevância na avaliação do relevo e os empregam como pilares em seus estudos geomorfológicos. Desde o surgimento da geomorfometria, a obtenção de tais dados caracterizava-se por tarefa lenta e trabalhosa devido a necessidade de análise minuciosa das curvas de nível, assim como da distribuição da rede de canais de drenagem, a fim de mensurar as amplitudes das elevações do relevo.

Na década de sessenta, o desenvolvimento tecnológico dos computadores promoveu a introdução de técnicas digitais na obtenção e análise dos dados geomorfométricos. A possibilidade de simular digitalmente métodos de medição de variáveis topográficas se tornou uma perspectiva de grande interesse no contexto da modelagem de dados do meio físico em sistemas de informação geográfica (VALERIANO, 2008). King (1969) foi um dos pioneiros no emprego de uma técnica de análise de tendência de superfície baseada em dados digitais no estudo de superfícies de erosão. Evans (1972) introduziu pela primeira vez um sistema integrado de geomorfometria, focado principalmente em dados derivados da altitude. Pike (1988) utilizou um modelo digital de elevação (MDE)

para investigar a assinatura geométrica dos diferentes tipos de terreno. Nesta mesma perspectiva, Dikau *et al.* (1995) realizaram uma classificação automática do relevo baseada em dados morfométricos derivados de MDEs. Além da evolução tecnológica, o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias de análise morfométrica do relevo em ambiente computacional foi motivado pelo interesse em superar a subjetividade relativa às interpretações realizadas manualmente.

Recentemente, os novos algoritmos e softwares desenvolvidos para calcular atributos do relevo possibilitaram um importante progresso na melhoria da precisão altimétrica. Destacam-se os trabalhos de Dinesh *et al.* (2012), que criaram um software para a análise de vários parâmetros morfométricos relativos a bacia de drenagem; De Reu *et al.* (2013), que aplicaram um algoritmo de índice de posição topográfica (*Topographic position index* – TPI) para uma classificação automática do relevo; Jasiewicz e Stepinski (2013), que realizaram análises semiautomáticas de dados morfométricos para o reconhecimento de padrões de formas do relevo através de MDEs e; Ghimire (2014) que identificou e analisou um grupo de variáveis morfométricas para a classificação de bacias hidrográficas de primeira ordem.

De forma geral, apesar de toda evolução tecnológica em ambiente digital, verifica-se que os inúmeros trabalhos produzidos atualmente apresentam alguns problemas relativos à definição e cálculo de parâmetros morfométricos. Há ainda divergência quanto aos parâmetros mais relevantes para cada tipo de terreno. Além disso, o aumento do número de parâmetros e de

técnicas estatísticas para seus cálculos tornam as análises muito mais complexas.

A dissecação vertical, que representa a altitude relativa do relevo, é um dos parâmetros que gera muita divergência quanto à forma de calculá-lo. Evans (1972) apresentou uma importante discussão sobre as possibilidades de cálculo da dissecação vertical. Esse autor afirma que é consenso utilizar a amplitude altimétrica, mas existe variação e elevado grau de subjetividade na definição da unidade espacial a ser considerada. Evans (1972) atribuiu relevância ao método baseado em quadrículas regulares, que apesar da subjetividade na definição de seu tamanho, é considerado como simples e prático de ser utilizado. Podem ser destacados os seguintes trabalhos que utilizaram malhas de quadrículas regulares: Hammond (1954, 1964), Hubp (1988), Dikau, Brabb e Mark (1991), Grohmann *et al.* (2007), Berti *et al.* (2013), entre outros.

Na década de 80, Spiridonov (1981) desenvolveu uma metodologia para a elaboração de cartas de dissecação vertical a qual utiliza os limites das bacias hidrográficas como unidade espacial de análise, abandonando o uso de quadrículas. O primeiro passo proposto pelo autor é a delimitação das bacias e sub-bacias de drenagem em uma base topográfica. A seguir, assinalam-se todos os pontos nos quais as curvas de nível interceptam o canal fluvial, e a partir de cada um desses traçam-se as linhas de maior queda da vertente, ou seja, a menor distância entre o talvegue e o divisor de água. Por fim, assinala-se em cada uma dessas linhas um ponto de cruzamento com as curvas de nível e, assim, por meio de pontos com altitude relativa similar, traçam-se isolinhas de altitude. As faixas geradas representariam as classes de dissecação vertical.

No Brasil, a metodologia de Spiridonov (1981) passou por uma adaptação proposta por Mauro *et al.* (1991). A primeira etapa foi mantida com a delimitação da bacia e sub-bacias, assim como a identificação de pontos nos quais as curvas de nível interceptam o canal fluvial. Na etapa seguinte, o autor sugere o traçado de segmentos de reta sobre as linhas de maior declividade que se prolongam até o divisor de água. Trata-se, portanto, da menor distância desde o ponto do canal de drenagem seccionado pela curva de nível até o divisor de água.

A partir do trabalho de Mauro *et al.* (1991), muitos estudos foram desenvolvidos no país utilizando esta metodologia. Dentre tais trabalhos, destaca-se o desenvolvido por Zacharias (2001) para dissecação horizontal e vertical, pois esse foi o primeiro a propor uma semiautomação da metodologia em ambiente digital por meio de uma plataforma *Computer-aided design* (CAD). O armazenamento destas informações em meio digital trouxe um grande ganho de operacionalidade, pois possibilitou aos usuários a realização de alterações dos dados em qualquer etapa do trabalho. No entanto, a metodologia continua morosa e sujeita a imprecisões relacionadas à interpretação e utilização de procedimentos manuais. Desde então, o único avanço metodológico nesta área foi o trabalho de Ferreira *et al.* (2014), que desenvolveram uma técnica automática para extração de dados de dissecação horizontal.

O objetivo deste artigo é apresentar uma técnica automática para o mapeamento da dissecação vertical do relevo com base na adaptação de Mauro *et al.* (1991) da proposta de Spiridonov (1981). A fim de avaliar os resultados, pretende-se compará-los com os dados gerados por meio da técnica semiautomática proposta por Zacharias (2001).

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Córrego do Cavalheiro localiza-se entre as coordenadas geográficas de 22°05'36" e 22°07'58" de latitude Sul e 47°39'14" e 47°41'28" de longitude Oeste, possuindo uma área de 9,9 km², 30,2km de canais de drenagem e 73 sub-bacias (Figura 1). A bacia engloba uma área de nascentes do rio Corumbataí, sendo esse de grande importância regional devido ao seu potencial hídrico para abastecimento dos municípios de Analândia, Corumbataí, Rio Claro e Piracicaba.

A área de estudo situa-se na maior unidade geológica do Estado de São Paulo – a Bacia Sedimentar do Paraná, sendo disposta na transição entre a Depressão Periférica Paulista, mais especificamente na unidade designada de Zona do Médio Tietê (ALMEIDA, 1964), e as Cuestas Areníticas-Basálticas.

As peculiaridades deste pacote vulcânico sedimentar, caracterizado pela presença de rochas basálticas mais resistentes que as sedimentares

sotopostas, “[...] permitiram o desenvolvimento da erosão diferencial, originando ampla escavação que constitui a Depressão Periférica, bem como as escarpas das linhas de Cuesta” (IPT, 1981). Ab’Saber (1969) avigora tal conjectura ao discutir a sequência de eventos associados ao processo de circundesnudação de idade pós-cretácea ocorrido nas margens da Bacia Sedimentar do Paraná. Além disso, evidencia-se a existência de estudos que atrelam a morfogênese de ambos os compartimentos à influência da morfotectônica (PENTEADO, 1968, 1974; FACINCANI, 2000).

De forma geral, os indícios da organização litoestratigráfica da referida unidade geológica em tais compartimentos geomorfológicos denotam a existência de distintas formações litológicas, depositadas desde o Mesozoico ao Cenozoico. Em relação ao Mesozoico, encontram-se as formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (SÃO PAULO, 1984). No que se refere às litologias datadas do Cenozoico, encontram-se as formações Santa Rita do Passa Quatro e Itaqueri, no entanto, é necessário destacar que não há um consenso para a datação da última, pois essa já foi considerada inicialmente como série basal

do Grupo Bauru e, atualmente, alguns autores indicam que sua formação pode ser posterior ao referido grupo (MELO, 1995).

A composição litológica e a evolução morfogenética dos compartimentos que envolvem a bacia do Córrego do Cavalheiro imprimiram a sua diversidade de feições geomorfológicas, a qual se constituiu no objeto do mapeamento deste estudo.

De acordo com Ross e Moroz (1997), a Zona do Médio Tietê da Depressão Periférica é caracterizada pelo predomínio de formas denudacionais, com modelados de topos convexos, vales com entalhamento preferencial até 20m e dimensão interfluvial que varia de 750 a 3750m. Já o trecho das Cuestas Areníticas-Basálticas, enquadrado por tais autores no Planalto Residual de São Carlos, é formado basicamente por colinas de topos convexos e tabulares, contendo vales entalhados com variação de 20 a 80m e dimensão interfluvial média de 250 a 3750m. Ressalta-se que estes atributos implicam na definição de fragilidades potenciais a deflagração de processos erosivos lineares em ambos os compartimentos (ROSS; MOROZ, 1997).

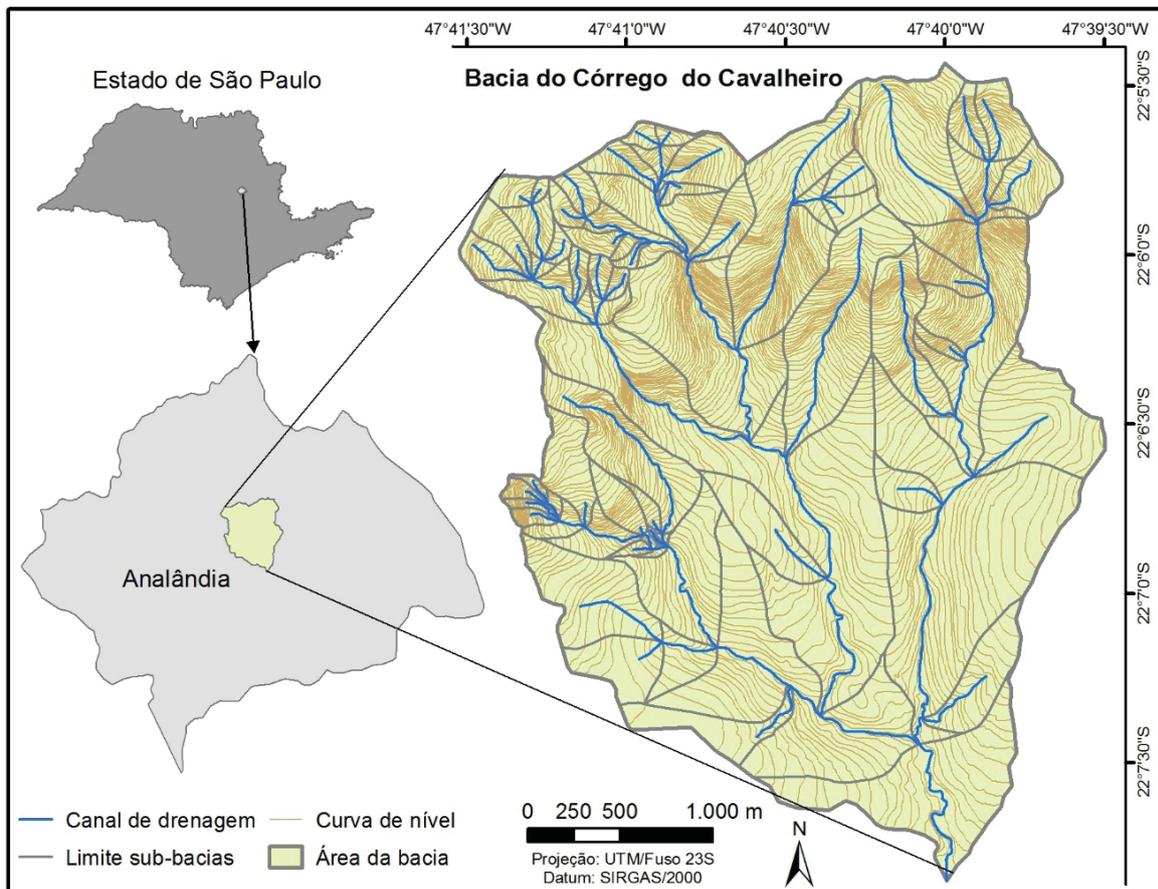


Fig. 1 - Localização da Bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia (SP). Fonte: Elaborado pelos autores.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A base cartográfica utilizada nesta pesquisa constitui-se de cartas topográficas executadas pela Secretaria de Economia e Planejamento do Governo do Estado de São Paulo, Coordenadoria de Ação Regional – Divisão de Geografia - na escala de 1:10.000. A bacia do Córrego do Cavalheiro compreende as folhas Analândia I (SF-23-Y-A-I-2-NO-F), Analândia II (SF-23-Y-A-I-2-SO-B) e Serra da Estrela (SF-23-Y-A-I-2-NO-E), datadas do ano de 1979.

Os limites das sub-bacias, identificados através da interpretação das cartas topográficas, e os seus respectivos canais de drenagem foram empregados nos procedimentos descritos a seguir para a obtenção da dissecação vertical pelo método automático e semiautomático.

3.1 Método automático

O procedimento automático proposto neste artigo é baseado em uma ferramenta específica desenvolvida a partir da linguagem de programação Python e os ArcObjects, que representam um conjunto de modelos de dados geográficos básicos, e oferecem serviços para suporte e construção de soluções na plataforma ArcGIS. A plataforma empregada foi o ArcGIS Desktop 10.2.2 (ESRI, 2014), nível de licença ArcInfo e extensões *3D Analyst* e *Spatial Analyst*. A ferramenta encontra-se disponível para download no link <http://1drv.ms/1DA98OJ>.

O objetivo do método automático é gerar polígonos que representem a dissecação vertical do relevo. Os polígonos são delimitados a partir das curvas de nível, canais de drenagem e linhas retas que conectem um ponto, definido a partir da intersecção do canal de drenagem com a curva de nível, ao ponto mais próximo da borda da sub-bacia com cota igual ou superior àquela do ponto inicial. A ferramenta representa uma automatização da adaptação de Mauro *et al.* (1991) da proposta de Spiridonov (1981). A sua interface pode ser observada na Figura 2.

Os dados espaciais de entrada na ferramenta são os polígonos das sub-bacias, as linhas dos canais de drenagem e curvas de nível, e um modelo digital de elevação (MDE) em formato raster. É importante que as linhas dos canais de drenagem estejam com os pontos finais posicionados a jusante e que o MDE tenha

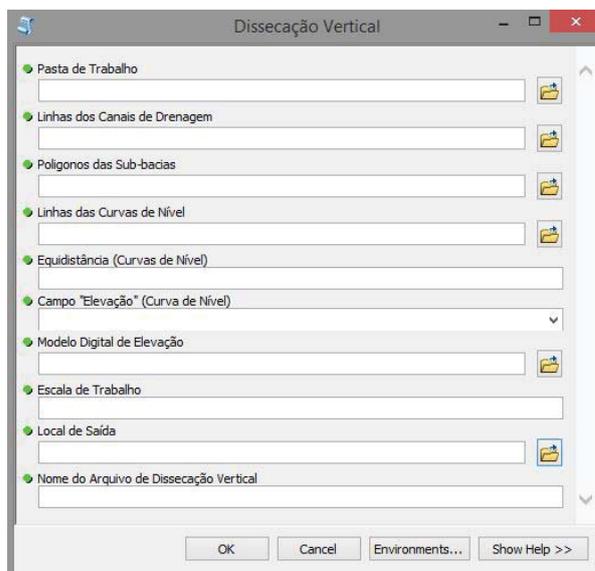


Fig. 2 - Interface da ferramenta criada para a execução da técnica digital automática de dissecação vertical.

sido preferencialmente produzido por meio da interpolação dos mesmos dados de entrada. Ademais, é necessário informar a escala dos dados de entrada, visto que parâmetros internos de processamento estão vinculados a essa informação.

Abaixo são descritos os passos realizados pela ferramenta para a obtenção de dados da dissecação vertical do relevo.

3.1.1 Passo 1

Inicialmente, todos os dados de entrada são recortados na área de cada sub-bacia. Na sequência, executam-se os Passos de 2 a 11 para cada uma das sub-bacias.

3.1.2 Passo 2

Por meio da intersecção das curvas de nível com os canais de drenagem geram-se os pontos iniciais das linhas de dissecação vertical (Figura 3A). Para cada ponto de intersecção é calculado o azimute do trecho do segmento dos canais de drenagem ao qual o ponto pertence.

3.1.3 Passo 3

Pontos equidistantes são criados sobre a borda da sub-bacia, sendo esses candidatos a pontos finais das linhas de dissecação vertical. A distância entre esses pontos é definida em função do parâmetro de escala informado pelo usuário (Figura 3B).

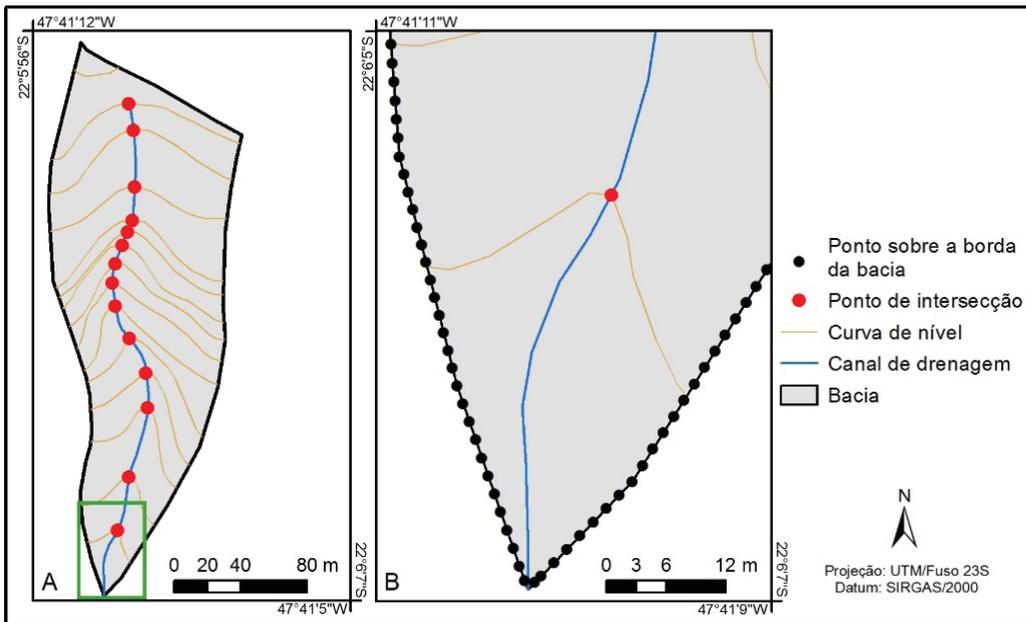


Fig. 3 - Dissecação vertical automática: A - Pontos de intersecção das curvas de nível com os canais de drenagem; B - Detalhe dos pontos criados sobre a borda da sub-bacia.

3.1.4 Passo 4

Inicia-se o processamento individual de cada ponto de intersecção criado no Passo 2 para encontrar as linhas de dissecação vertical. Para determinar a ordem de processamento dos pontos, esses são divididos em grupos. Cada intersecção do canal de drenagem com a borda da sub-bacia gera uma divisão na linha do canal de drenagem e, conseqüentemente,

delimita um novo grupo de pontos. Essa seqüência de processamento dos pontos é fundamental para garantir uma melhor relação espacial entre as linhas de dissecação que serão criadas.

A Figura 4 exemplifica essa divisão para duas sub-bacias, sendo um caso para único grupo gerado (Figura 4A), e outro exemplo em que foram gerados 3 grupos de pontos (Figura 4B).

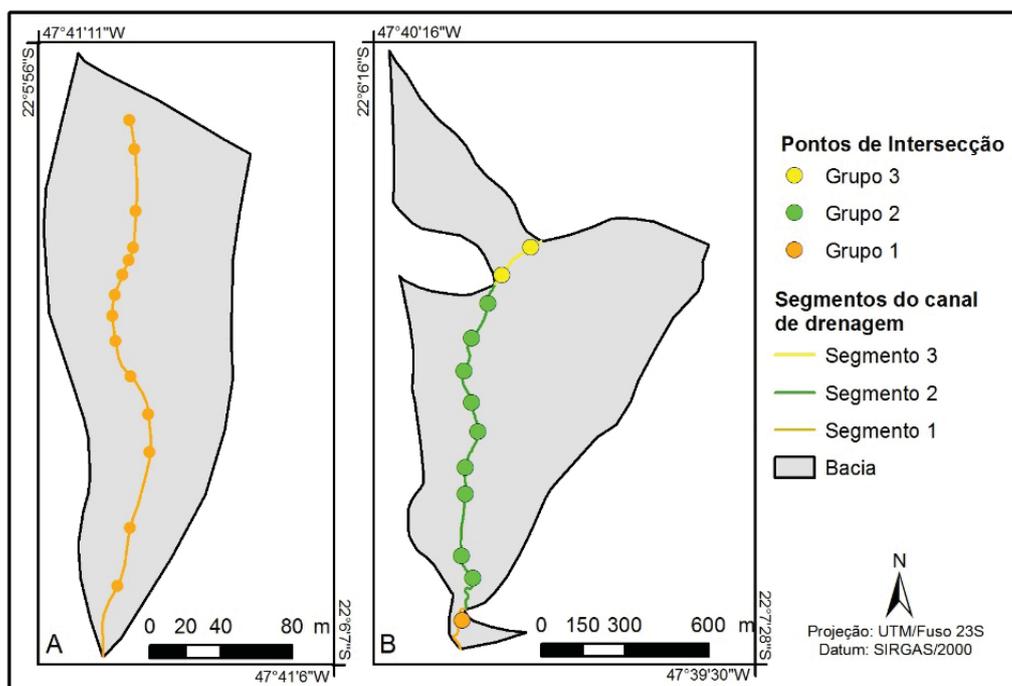


Fig. 4 - Dissecação vertical automática: A – Exemplo de bacia com um grupo de pontos; B – Exemplo de bacia com três grupos de pontos.

Cada grupo de pontos é processado das extremidades do segmento do canal de drenagem para o centro do mesmo de forma alternada, ou seja, inicia-se com o ponto de cota mais baixa do grupo, em seguida processa-se o ponto de cota mais alta e depois o segundo ponto de cota mais baixa e assim sucessivamente.

Os procedimentos para a construção e escolha das linhas de dissecação vertical de cada ponto serão descritos nos passos seguintes.

3.1.5 Passo 5

Ao considerar o ponto vermelho destacado na Figura 5A como referência, cria-se um arquivo com as linhas candidatas a reta representativa de dissecação vertical. Essas linhas ligam o ponto selecionado a todos àqueles do limite da bacia (Figura 5A). Calcula-se o azimute geográfico para cada uma das linhas.

3.1.6 Passo 6

Considerando a relação entre o azimute de cada linha candidata e a direção do segmento do canal de drenagem a qual o ponto pertence, busca-se identificar as linhas que apresentem maior paralelismo ao segmento do canal de drenagem. Essas linhas gerariam classes irreais de dissecação vertical e precisam ser excluídas. Assim, todas as linhas candidatas que formam um ângulo menor que 10° em relação ao segmento do canal de drenagem são descartadas.

3.1.7 Passo 7

Aplicam-se então os seguintes procedimentos para encontrar a melhor linha de dissecação vertical a direita e a esquerda do canal de drenagem:

- Dentre as linhas candidatas, excluem-se aquelas que:
- cruzam o canal de drenagem;
- cruzam o limite da bacia;
- cruzam as curvas de nível com cota inferior ao ponto de intersecção;
- cruzam a curva de nível com cota igual ao ponto de intersecção. Para este caso é elaborado um buffer no ponto de intersecção, o qual é utilizado para apagar um trecho da curva de mesma cota, sendo essa empregada para realizar a consulta espacial. Esse procedimento é necessário para não restringir em excesso as opções de linhas candidatas;
- interceptam linhas de dissecação vertical de outros pontos;

O exemplo da aplicação dos Passos 6 e 7 pode ser observado na Figura 5B.

3.1.8 Passo 8

Utilizando a mesma relação entre a direção do segmento do canal de drenagem e o azimute das linhas candidatas indicada no Passo 6, encontram-se as linhas que estão à direita e a esquerda do ponto sobre o canal de drenagem;

- seleciona-se a linha que apresente o menor comprimento entre o canal de drenagem e o limite da bacia a direita e a esquerda;

- por fim, são apagados trechos das linhas que tenham sobreposição com a região inferior (em relação a curva de nível) do buffer empregado em uma das etapas do Passo 7.

O exemplo da aplicação do Passo 8 pode ser observado na Figura 5C.

3.1.9 Passo 9

Repetem-se então os Passos de 5 a 8 para cada um dos pontos de intersecção restantes (Figura 6A).

3.1.10 Passo 10

As zonas de dissecação (Figura 6B) são criadas utilizando as linhas de dissecação vertical, a linha do canal de drenagem e o polígono da bacia, sendo posteriormente utilizadas para o cálculo da dissecação vertical. Os polígonos de dissecação (Figura 6C), por sua vez, são criados a partir das zonas de dissecação e curvas de nível.

3.1.11 Passo 11

Inicia-se a seleção dos polígonos de dissecação que estão contidos em uma das zonas de dissecação. Dentre os polígonos selecionados, identificam-se aqueles que contenham pelo menos um segmento do canal de drenagem em seu interior. Para esses polígonos é assinado que a dissecação vertical máxima é o valor de equidistância das curvas de nível. Na sequência, são selecionados os polígonos que compartilham borda com os polígonos já calculados. Para esses polígonos é assinado que a dissecação vertical é duas vezes a equidistância entre as curvas de nível e assim sucessivamente até calcular a dissecação para todos os polígonos. Repete-se então o Passo 11 para todas as demais zonas de dissecação

A Figura 6C apresenta os polígonos criados com indicação da dissecação vertical calculada e a Figura 6D apresenta uma possível classificação para esses polígonos com intervalo de 10m.

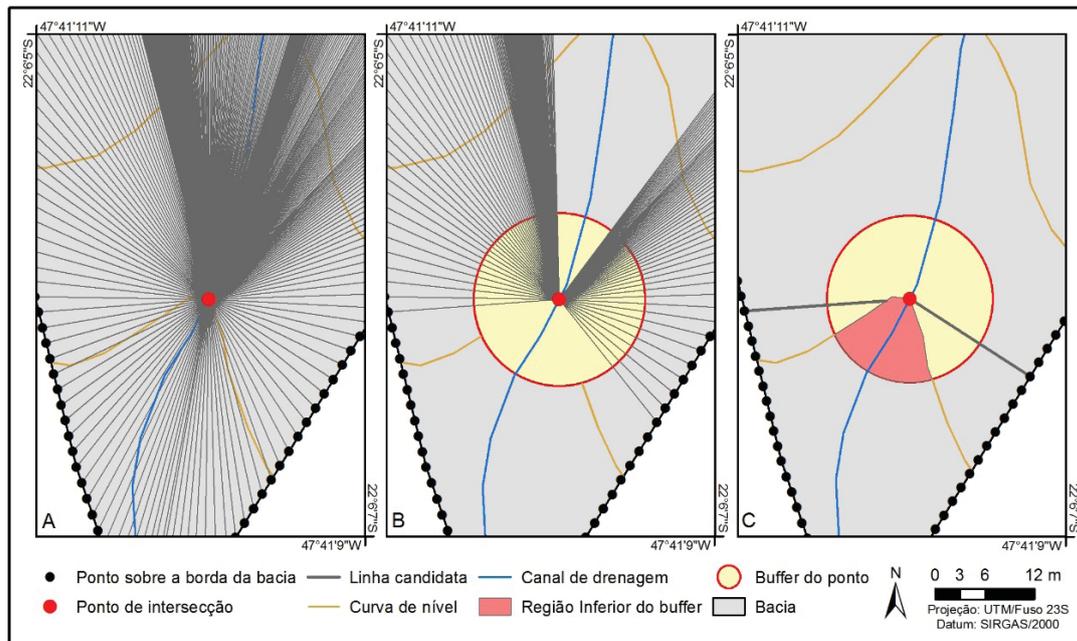


Fig. 5 - Dissecação vertical automática: A - Linhas candidatas a linha de dissecação vertical do ponto selecionado; B - Linhas candidatas selecionadas pelos critérios estabelecidos nos Passos 6 e 7; C - Linhas candidatas selecionadas pelos critérios estabelecidos no Passo 8.

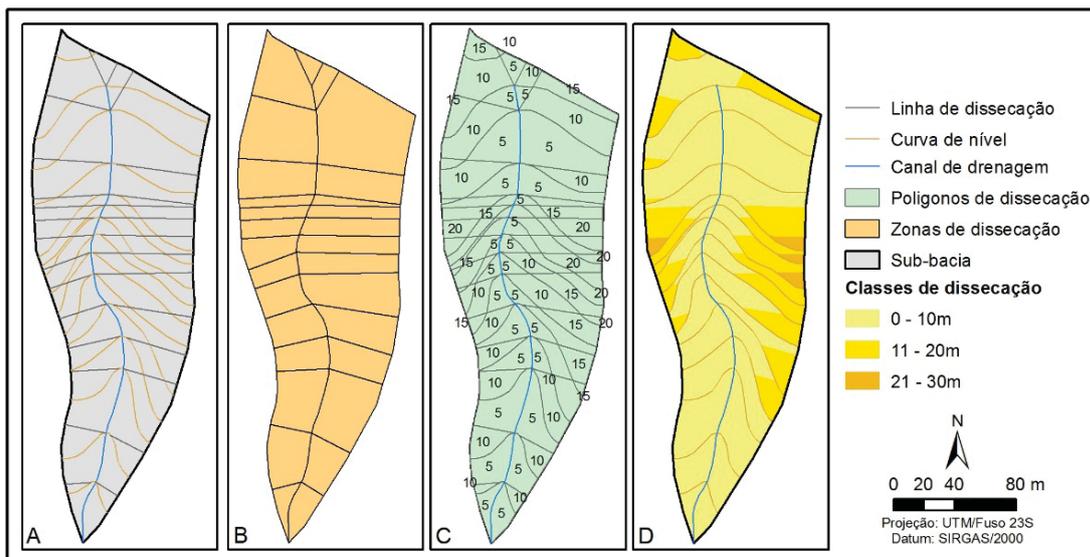


Fig. 6 - Dissecação vertical automática: A – Linhas de dissecação vertical selecionada; B – Zonas de dissecação vertical; C – Polígonos de dissecação vertical; D – Classificação dos polígonos de dissecação vertical. Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2 Método semiautomático

A proposta metodológica elaborada por Zacharias (2001) para o mapeamento semiautomático da dissecação vertical é executada por meio de comandos de precisão da ferramenta *Object Snap* da plataforma *Computer-aided design* (CAD). Esses comandos permitem a identificação dos pontos onde ocorrem intersecções entre os cursos d'água e as

curvas de nível, e a indicação do traçado de reta perpendicular, que é digitalizada posteriormente para unir tais pontos às linhas de cumeadas. De acordo com tal proposta, tais retas correspondem a menor distância entre o talvegue e o limite da bacia. Ressalta-se que, muitas vezes, o software indicava a posição da reta perpendicular em local que afetava a delimitação das classes. Nestas situações, foi necessário adotar medida corretiva, equivalente a definição visual da menor distância

entre o ponto de intersecção e o divisor d'água, mesmo que não houvesse a formação de um ângulo de 90°.

Por fim, foram delimitados polígonos correspondentes aos setores das sub-bacias, classificados de acordo com a adaptação proposta

por Mauro *et al.* (1991). A Figura 7 ilustra a construção da carta de dissecação vertical através da técnica semiautomática de Zacharias (2001), bem como a sua limitação e a medida corretiva adotada no estabelecimento das classes de dissecação vertical.

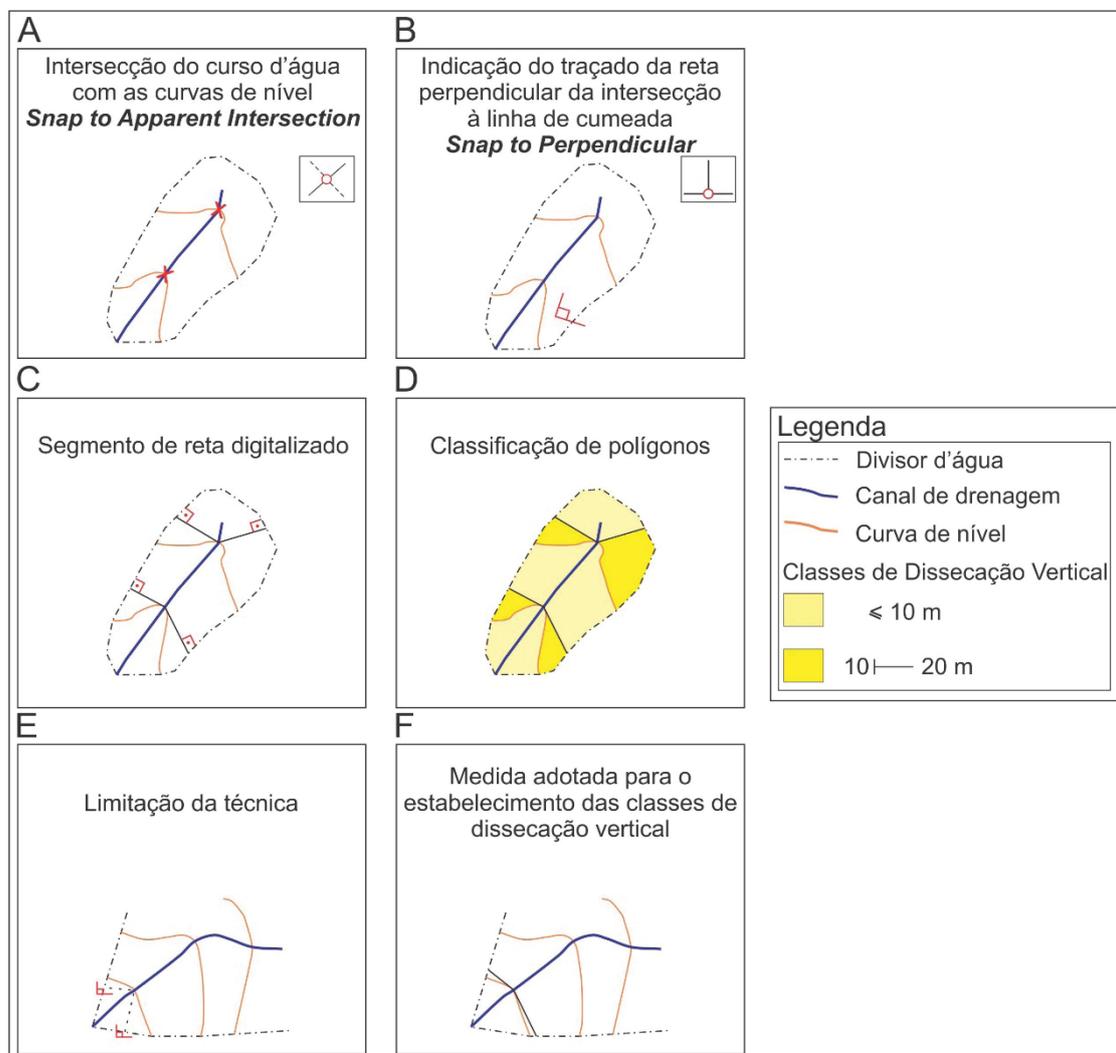


Fig. 7 - Etapas para a construção da carta de dissecação vertical através da técnica semiautomática de Zacharias (2001): A – intersecções entre os cursos d'água e B – indicação do traçado da reta perpendicular; C – segmento de reta digitalizado; D – classificação da dissecação vertical dos setores das sub-bacias; E – limitação da técnica; F – medida corretiva. Fonte: Adaptado de Zacharias (2001).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para entender melhor os resultados é necessário destacar que os métodos utilizam formas diferentes de determinar as linhas de dissecação vertical. O método semiautomático determina a linha de dissecação como sendo a linha perpendicular a um trecho do limite da bacia que, em grande parte das vezes, representa a menor distância. O método automático determina a linha de dissecação medindo a distância entre

o ponto considerado no canal de drenagem em relação a todos possíveis pontos na borda da bacia e seleciona o de menor distância. Conceitualmente então podemos afirmar que a técnica automática é mais fidedigna a proposta de Spiridonov (1981) em determinar a linha de dissecação vertical. Além disso, a técnica automática possibilita maior flexibilidade no estabelecimento das classes, visto que é possível experimentar diversos intervalos de valores. A Figura 8 ilustra a carta de dissecação vertical elaborada por meio da técnica automática.

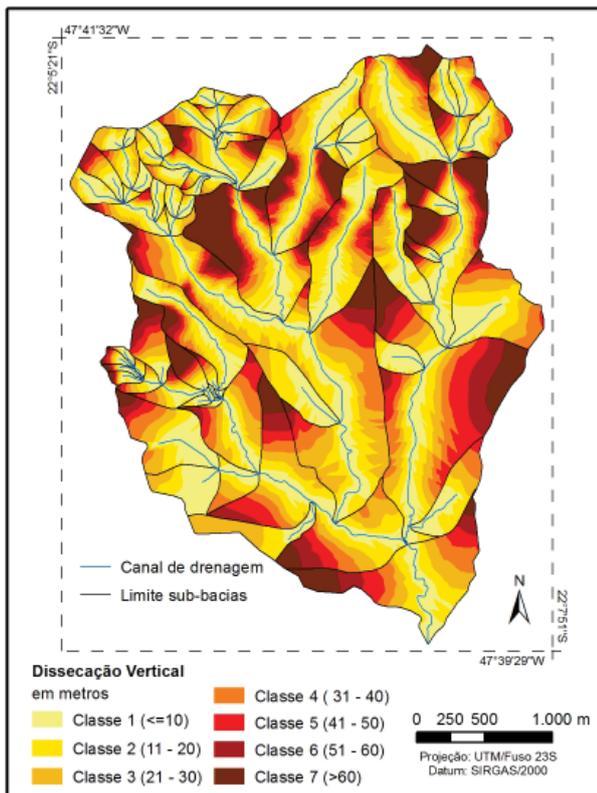


Fig. 8 - Carta de dissecação vertical elaborada pelo método automático.

Para toda a área de estudo foram encontrados 781 pontos de intersecção das curvas de nível com os canais de drenagem, de onde foram traçadas, respectivamente, 1.562 e 1.534 linhas de dissecação pelos métodos semiautomático e automático. Em 28 situações, o método automático não conseguiu traçar a linha de dissecação devido as regras de restrições impostas em sua construção, e em função do traçado do canal de drenagem não estar ajustado a máxima concavidade da curva de nível.

Cada uma das 1534 linhas automáticas foi confrontada com sua linha equivalente do método semiautomático e analisou-se a diferença no comprimento e na distância máxima entre as linhas. A diferença de comprimento foi considerada significativa quando apresentou valores acima de 2m (maior erro gráfico aceito para a escala 1:10.000), e as linhas foram consideradas concordantes quando a distância máxima entre o par de linhas era inferior a 2m. A Tabela 1 apresenta o resultado da diferença no comprimento e na distância máxima entre as linhas.

Ressalta-se que 47% dos pares de linhas apresentaram significativa diferença

no comprimento. No entanto, em 97% dessas situações a linha determinada pelo método automático exibiu um comprimento menor, o que comprova sua maior eficiência em determinar a menor distância. Destaca-se ainda que, apesar de 53% das linhas não terem apresentado diferenças significativas no comprimento, ocorreu uma concordância na distância máxima de apenas 37% entre os pares de linhas.

Tabela 1: Diferenças no comprimento e distância máxima entre as linhas de dissecação vertical estabelecidas pelos métodos automático e semiautomático

Diferença no comprimento (em número de pares de linhas)		Distância máxima (em número de pares de linhas)	
Não signifi- cativa	Significativa	Concordante	Discordante
819 (53%)	715 (47%)	572 (37%)	962 (63%)

A discordância entre as linhas de dissecação vertical é o que mais pode gerar diferenças entre os produtos cartográficos. A Figura 9 ilustra as concordâncias e discordâncias ocorridas entre as linhas e entre as classes de dissecação vertical resultantes da comparação das duas técnicas testadas. Já as figuras. 10A e 10B permitem a observação em detalhe das diferenças nas linhas de dissecação de dois trechos da área de estudo. As linhas tracejadas representam as linhas de dissecação semiautomáticas, enquanto as verdes e vermelhas retratam as linhas de dissecação automáticas, classificadas em concordante e discordante respectivamente. A distribuição espacial das classes de dissecação vertical em tais trechos, derivada de sua organização a partir da técnica semiautomática, pode ser visualizada nas figuras. 10C e 10D. Já as figuras. 10E e 10F mostram o resultado da técnica automática. A análise das figuras denota que, apesar do elevado número de linhas de dissecação discordantes, o impacto sobre a distribuição espacial das classes de dissecação é consideravelmente minimizado em razão do agrupamento realizado pelos intervalos de classes selecionados. Isso é evidenciado na Tabela 2, que apresenta a concordância por área de cada classe de dissecação. A concordância total de 85,50% das áreas, para as classes de dissecação vertical consideradas, é muito superior aos 37% das linhas concordantes.

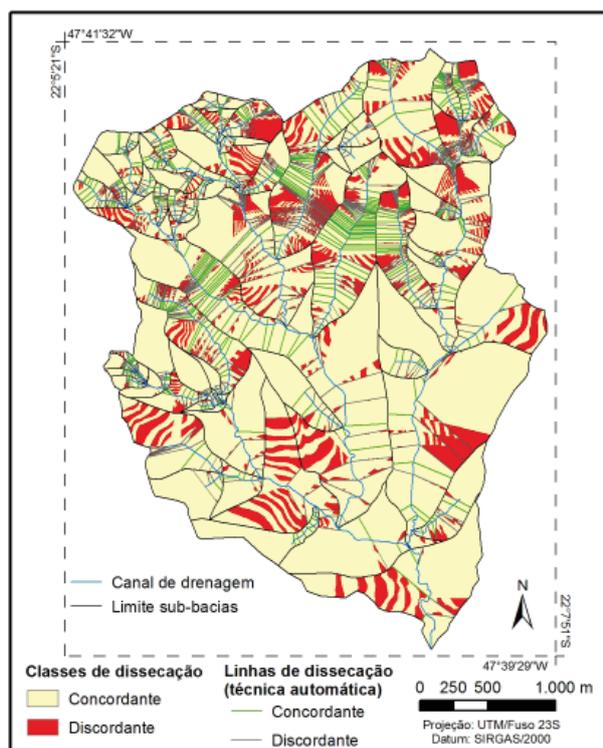


Fig. 9 - Carta de concordâncias e discordâncias ocorridas entre as linhas e entre as classes de dissecação vertical resultantes da comparação das duas técnicas testadas.

Tabela 2: Concordância por classe de dissecação vertical

Classes de dissecação	Área total em m ² (automático)	Concordância com semiautomático (%)
Classe 1	2670337	90,52
Classe 2	2139298	86,00
Classe 3	1699169	83,79
Classe 4	1109088	77,86
Classe 5	764951	74,38
Classe 6	588522	81,37
Classe 7	935549	93,94
Total	9906913	85,50

No que se refere aos procedimentos para o estabelecimento das classes de dissecação vertical, também se considera que a técnica automática apresenta vantagens em relação à proposta por Zacharias (2001). Cunha (2001) já apontava que, em situações de grandes desníveis relativos entre as linhas de cumeada e os fundos de vale, podem ser necessários agrupamentos de mais de uma equidistância em uma única classe. Contudo, este problema é complexo nas cartas elaboradas manualmente, nas quais a realização de testes é praticamente impossível devido ao

tempo necessário para a construção desse tipo de carta. Assim, com a técnica automática, tais testes tornam-se viáveis, possibilitando resultados mais eficientes.

Em relação ao tempo gasto no processo de elaboração das cartas de dissecação vertical, foram contabilizadas 80 horas de trabalho para a execução da técnica semiautomática proposta por Zacharias (2001), abrangendo toda a criação de topologias, o traçado das linhas de dissecação e polígonos de dissecação vertical. Já a técnica digital automática demandou 4 horas de trabalho para a preparação e ajustes da base de dados e, aproximadamente, 4 horas de processamento para a construção do mapa de dissecação vertical. Nota-se que houve uma redução drástica do tempo total, principalmente no tempo de trabalho do pesquisador em si. É importante destacar que esse tempo de processamento foi atingido utilizando um computador portátil com processador Intel Core I7 2.8GHz, com 8 GB de memória RAM e sistema Windows 8.

Deve-se destacar que esse tempo abarca o processamento dos pontos nos quais as curvas interceptam o rio em todas as sub-bacias que compõem a área de estudo. Esse fato representa um avanço, visto que Leite e Rosa (2012, p. 274) utilizaram medidas amostrais ao realizarem esse tipo de mapeamento no software Spring (CAMARA *et al.*, 1996). Os autores criam manualmente, sobre o canal de drenagem de cada sub-bacia, três pontos que dividem o canal em alto, médio e baixo curso. Apenas a partir desses pontos são traçadas as linhas perpendiculares de dissecação vertical, o que diverge da proposta metodológica original.

A técnica automática demonstrou-se eficiente na reprodução da metodologia de dissecação vertical adaptada por Mauro *et al.* (1991) e já aplicada na área por Pinton e Cunha (2008). No entanto, é preciso aprimorar a representatividade geomorfológica dos polígonos gerados, independentemente da técnica adotada.

Em ambas as técnicas testadas, os polígonos são limitados, em sua maioria, por curvas de nível e pelas linhas de dissecação. As curvas de nível evidenciam uma variação altimétrica, ou seja, um limite topográfico representativo do relevo local. Já as linhas de dissecação vertical representam as linhas de maior declive entre pontos dos canais

de drenagem e o limite da bacia, mas por serem retas não expressam as variações das formas das vertentes que dividem. O traçado retilíneo entre os limites da bacia e o talvegue responde a realidade de ambientes com clima glacial e periglacial, nos quais a forma de vertente é predominantemente retilínea, porém não expressa a disposição das vertentes em ambientes com clima tropical úmido, predominantes no cenário brasileiro. Em um clima quente e úmido, a convexização das vertentes é frequente e, portanto, o traçado reto proposto por Spiridonov (1981) nem sempre atende a proposta de maior declive.

Assim, a proposta de Spiridonov (1981) é um avanço ao substituir polígonos regulares, como utilizados por Evans (1972), por unidades espaciais derivadas de um critério morfométrico. O cálculo da dissecação vertical a partir de trechos da bacia hidrográfica delimitados por linhas de maior declive entre um ponto do canal de drenagem (definido por mudança altitudinal representada pela curva de nível) e o limite da bacia, constitui-se um avanço em relação aos referidos polígonos. Contudo, em ambiente quente e úmido, essa linha nem sempre é eficiente.

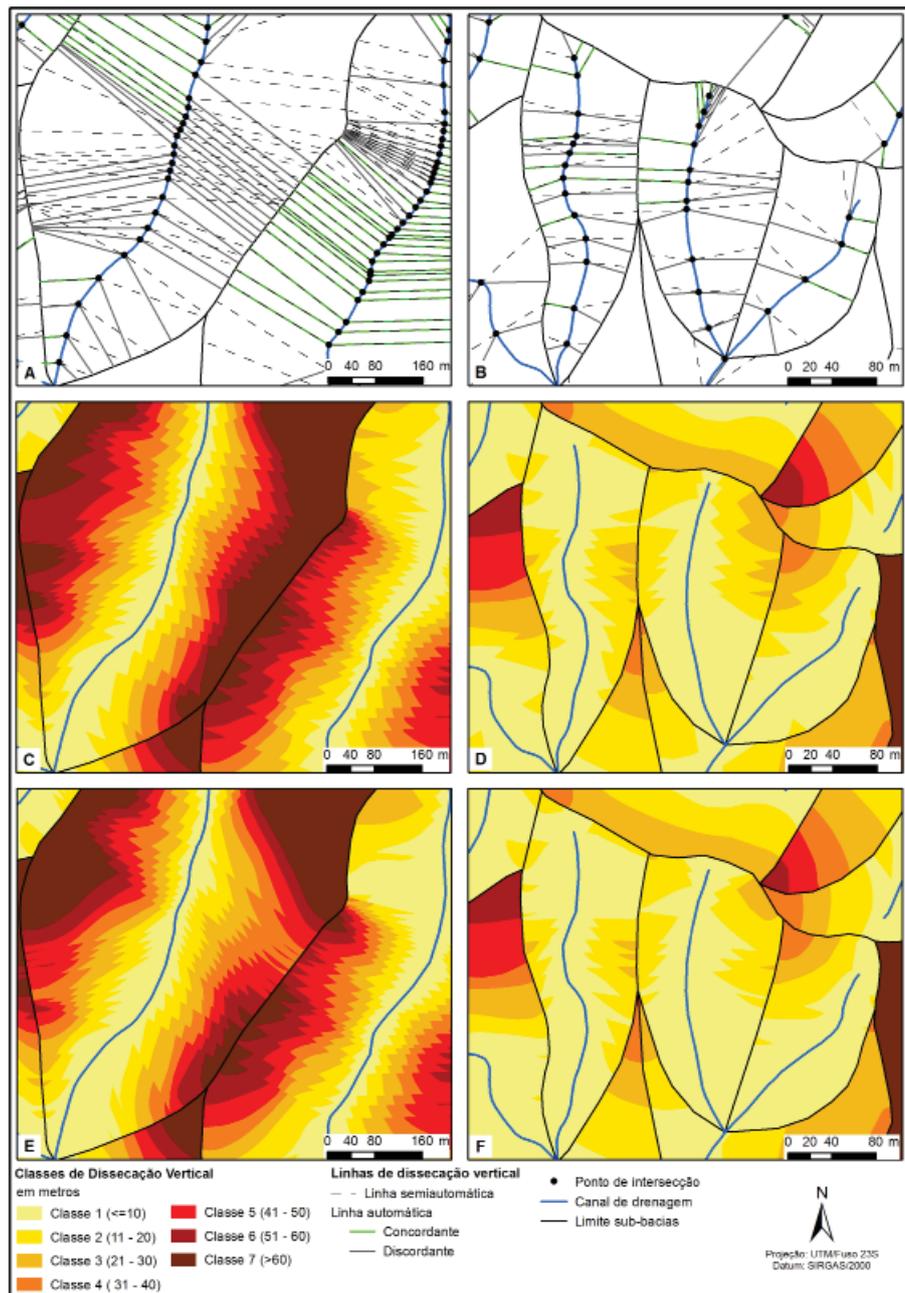


Fig. 10 - Resultado da dissecação vertical em detalhe: A e B – Linhas de dissecação vertical geradas pelo método semiautomático e automático; C e D – Classes de dissecação vertical geradas pelo método semiautomático; E e F - Classes de dissecação vertical geradas pelo método automático.

5. CONCLUSÃO

A avaliação da dissecação vertical constitui-se em ferramenta importante para a análise do relevo já que possibilita identificar os setores mais suscetíveis a ações gravitacionais e, portanto, mais frágeis aos processos denudativos. Esse fato é historicamente reconhecido pela bibliografia (HAMMOND, 1954, 1964, HUBP, 1988; EVANS, 1972), contudo, essa mesma bibliografia alerta para as dificuldades e morosidade na obtenção desse tipo de informação. Assim, os resultados apresentados possibilitam resolver tal questão a partir de ferramentas disponíveis em um sistema de informação geográfica.

A técnica automática proposta neste trabalho se mostrou vantajosa para o mapeamento da dissecação vertical perante a técnica semiautomática, viabilizando sua aplicação em grandes áreas com ganho significativo de tempo, replicabilidade e confiabilidade. Qualquer usuário obterá resultados equivalentes graças ao uso de algoritmos computacionais e regras pré-estabelecidas na ferramenta. Isso elimina a subjetividade inerente aos procedimentos manuais e semiautomáticos que podem limitar a reprodução dos resultados, comprometendo princípios básicos da ciência. Além disso, evidencia-se uma melhoria na consistência dos dados advindos deste documento cartográfico em razão da qualidade gráfica no resultado final e da maior precisão no seu processo de elaboração, especialmente pela possibilidade de realizar com facilidade correções e testes dos dados introduzidos na plataforma do software.

AGRADECIMENTOS

Às bolsas de doutorado concedidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos nº 165930/2013-6 e nº 165931/2013-2 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2012/20513-0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário. **Geomorfologia**, v. 18, p. 1-23, 1969.

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**, v. 41, p. 169-263, 1964.

BERTI, M.; CORSINI, A.; DAEHNE, A. Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides. **Geomorphology**, v. 182, p. 1-18, 2013.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20: p. 395-403, 1996.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgar Bluche, 1980. 188p.

CUNHA, C. M. L. da. **A Cartografia do Relevo no contexto da Gestão Ambiental**. 2001. 120 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

DE REU, J.; BOURGEOIS, J.; BATS, M.; ZWERTVAEGHER, A.; GELORINI, V.; DE SMEDT, P.; CHU, W.; ANTROP, M.; DE MAEYER, P.; FINKE, P.; VAN MEIRVENNE, M.; VERNIERS, J.; CROMBÉ, P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. **Geomorphology**, v. 186, p. 39-49, 2013.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. K.; PIKE, R. J. Morphometric landform analysis of New Mexico **Zeitschrift für Geomorphologie Supplements**, v. 101, p. 109-126, 1995.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. **Landform classification of New Mexico by computer**. EUA: U.S. Geological Survey, 1991. 15 p.

DINESH, A. C.; JOSEPH MARKOSE, V.; JAYAPPA, K. S. Bearing, azimuth and drainage (bAd) calculator: A new GIS supported tool for quantitative analyses of drainage networks and watershed parameters. **Computers & Geosciences**, v. 48, p. 67-72, 2012.

ESRI. **ArcGIS 10.2.2 for Desktop**. Redlands: ESRI, 2014. Cópia digital.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial Analysis in Geomorphology**. New York: Harper and Row, 1972. p.17-90.

- FACINCANI, E. M. **Morfotectônica da Depressão Periférica Paulista e Cuesta Basáltica: Regiões de São Carlos, Rio Claro e Piracicaba, SP**. 2000. 222 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.
- FERREIRA, M. V.; TINÓS, T. M.; PINTON, L. D. G.; CUNHA, C. M. L. A dissecação horizontal como parâmetro morfométrico para avaliação do relevo: proposta de técnica digital automática. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 585-600, 2014.
- GHIMIRE, M. Multivariate morphological characteristics and classification of first-order basins in the Siwaliks, Nepal. **Geomorphology**, v. 204, p. 192–207, 2014.
- GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; ALVES, F. M. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. **Computers & Geosciences**, v. 33, p. 10–19, 2007.
- HAMMOND, E. H. Small scale continental landform maps. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 44, p. 32-42, 1954.
- HAMMOND, E. H. Analysis of properties in landform geography: An application to broadscale landform mapping. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 54, p. 11-19, 1964.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, p. 275-370, 1945.
- HUBP, J. I. L. **Elementos de Geomorfologia Aplicada (metodos cartograficos)**. México: Instituto de Geografia, 1988. 128p.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo: IPT, 1981. 94p.
- JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, v. 182, p. 147-156, 2013.
- KING, C. A. M. Trend-surface analysis of central pennine erosion surfaces. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 47, p. 47-59, 1969.
- LEITE, E. F.; ROSA, R. Mapeamento geomorfológico: A carta de energia do relevo da bacia hidrográfica do Rio Formiga (TO). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 269-284, 2012.
- MAURO, C. A.; RUSSO, I. L.; BOVO, R.; TELES, A. P. S. S.; CARVALHO, M. B. S.; PICARELLI, A.; MELO, E. M. M. Contribuição ao planejamento ambiental de Cosmópolis - SP - BR. In: ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, s/n., 1991, Toluca, México. **Anais... UEAM**, 1991. p.s/p.
- MELO, M. S. **A Formação Rio Claro e depósitos Associados: Sedimentação Neocenoica na Depressão Periférica Paulista**. 1995. 144 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- PENTEADO, M. M. **Geomorfologia do Setor Centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista**. 1968. 86 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro, 1968.
- PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1974. 141p.
- PIKE, R. J. The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. **Mathematical Geology**, v. 20, p. 491-511, 1988.
- PINTON, L. de G.; CUNHA, C. M. L. da. Avaliação da Dissecação Horizontal e Vertical da Bacia do Córrego do Cavalheiro Analândia/SP: Subsídios para o Planejamento do Uso e Ocupação da Terra. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia Depto de Geografia FFLCH-USP/Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada -

IPT/FAPESP, 1997. 63p.

SÃO PAULO. **Folha Geológica de Corumbataí (Folha SF-23-Y-A-I-2)**. Formações Geológicas de Superfície. São Paulo: Instituto Geológico, 1984. Escala 1:50.000.

SPIRIDONOV, A. I. **Principios de la Metodologia de las investigaciones de Campo y el Mapeo Geomorfológico**. Havana: Universidad dI la Habana, 1981. Vol. 3, 650p.

STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V. T. (Ed.). **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964. p.439--476.

TRICART, J. **Principes et Méthodes de la Géomorphologie**. Paris: Masson, 1965. 496p.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Ed.). **Geomorfologia - Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p.72 – 104.

ZACHARIAS, A. A. **Metodologias Convencionais e Digitais para a Elaboração de Cartas Morfométricas do Relevo**. 2001. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.