

## Uso de geotecnologias para produção de carta de potencial geomorfológico ao escoamento superficial

Camila Cerdeira Dias<sup>1</sup>  
Osni José Pejon<sup>1</sup>  
Eduardo Goulart Collares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escola de Engenharia de São Carlos - USP  
Av. Trabalhador Sarcarlense, 400 - 13566-590 - São Carlos - SP, Brasil  
camilacerdeira@sc.usp.br, pejon@sc.usp.br

<sup>2</sup>Fundação de Ensino Superior de Passos – FESP/UEMG  
Rua Nebraska, 508 - 37902-108 - Passos - MG, Brasil  
eduardo.collares@fespmg.edu.br

**Abstract.** Runoff processes are very important in the hydrological cycle and have strong influence over many of the physical processes on Earth surface. The runoff is frequently estimated by means of empirical techniques that consider aspects relating to relief and composition of earth materials. This paper propose a new automated methodology for obtaining a homogeneous hydrological zoning mapping based on geomorphometric potential from the digital terrain model. GIS tools were used to perform intermediate indexes: concentration index roughness (ICR), concentration index of drainage channels (ICCD) and concentration index gradients channels (ICGC). The intersection of these three index allows to carry out the Geomorphometric Runoff Potential Map. Comparing with Runoff Potential Map performed in traditional way the proposed map showed good agreement and more homogeneous distribution of runoff classes.

**Palavras-chave:** geoprocessing, GIS, morphometry, runoff coefficient, infiltration, geoprocessamento, SIG, morfometria, geomorfometria, coeficiente de deflúvio, infiltração

### 1. Introdução

O processo de escoamento superficial exerce influência sobre diversos processos do meio físico como: transporte de sedimentos, erosão, vazão, entre outros. Pejon e Zuquette (1993) ressaltam a importância de se estudar processos de escoamento superficial e infiltração de água no terreno para obtenção de coeficientes de deflúvios mais realistas. O coeficiente de escoamento ou coeficiente de deflúvio corresponde à razão entre o volume de água do escoamento superficial e volume de água da chuva.

Para a adequada quantificação da razão entre o volume de água de escoamento superficial e o volume de água de chuva há necessidade de elaboração de uma carta que retrate o potencial de escoamento superficial das águas pluviais. Pejon e Zuquette (1993) apresentam uma metodologia para elaboração da carta de escoamento superficial baseada na atribuição de pesos aos atributos do meio físico que estão diretamente relacionados com o processo.

Tradicionalmente, para elaboração de cartas dessa natureza, utiliza-se a técnica de cruzamento com a atribuição de pesos aos variados atributos e planos de informação considerados intervenientes no processo. Os principais planos de informação considerados são: relevo, materiais inconsolidados, geologia, permeabilidade dos solos, feições favoráveis ao armazenamento superficial e densidade hidrográfica.

Para Uehara e Jorge (1995), o relevo de uma bacia hidrográfica e, principalmente, a sua declividade, exercem grande influência sobre a velocidade do escoamento superficial, o que afeta o tempo que a água da chuva leva para concentrar-se nos leitos fluviais. Tucci (2001) cita a densidade de hidrográfica, a declividade dos canais e da bacia, capacidade de armazenamento e forma das bacias como atributos do relevo intervenientes no escoamento superficial e na infiltração de água no solo.

Neste contexto, merecem destaque os atributos morfométricos e geomorfométricos de bacias que consistem em relevantes ferramentas de estudo no âmbito da identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, ou seja, que podem retratar os diferentes níveis de potencial de infiltração e escoamento superficial. Várias são as correlações entre índices morfométricos e o potencial de escoamento superficial e infiltração de água no terreno.

O índice de rugosidade consiste em um número adimensional que, para Strahler (1964), expressa aspectos de declividade e comprimento da vertente; dessa forma a rugosidade relaciona a área da superfície do terreno inclinada e a área da superfície do terreno reduzida ao plano (SAMPAIO, 2012). Patton e Baker (1976) demonstram que áreas com elevados índices de rugosidade têm potencial elevado de ocorrência de “cheias relâmpago” devido à fina textura de drenagem, com comprimento mínimo do escoamento superficial em vertentes íngremes e altos valores de gradientes dos canais.

Os atributos referentes à superfície do terreno são usualmente processados por meio de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Atualmente, podem-se encontrar diversos estudos envolvendo geomorfometria (modelagem digital do terreno), que tem sido amplamente utilizada na diferenciação de formas de relevo.

Volkmer et al (2010), Magri e Collares (2011) aplicam o estimador de densidade "*Kernel density*" para representar cartograficamente a densidade de canais de drenagem. A função *kernel* consiste em uma adaptação da função quadrática para densidades descrita por Silverman (1986) que procede a contagem de eventos pontuais e lineares isentos ou não de valores (atributos quantitativos) do fenômeno em um determinado espaço.

Sampaio (2008) propõe e aplica a técnica "estimador de densidade por *kernel*" para obter um índice que, indiretamente, retrata a concentração de rugosidades ou o entalhamento do relevo a partir da repetição de valores de declividade por unidade de área. O autor op. cit. conclui que esse índice consiste em um modelo quantitativo de comparação entre distintos ambientes morfológicos e que é uma ferramenta complementar aos demais índices de dissecação e de rugosidade.

O presente trabalho visa propor uma sistemática metodológica que lança mão de ferramentas de SIG e de índices geomorfométricos, para a produção de uma carta interpretativa que retrata regiões hidrologicamente homogêneas quanto ao potencial de escoamento superficial de águas pluviais, aqui chamada de carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.

## 2. Localização da área de estudo

Este estudo abrange as sub-bacias hidrográficas dos afluentes mineiros da porção média do Rio Grande (CBH-GD7). Esta área está localizada na porção sudoeste do estado de Minas Gerais, entre as latitudes 20°3' e 21°13' sul e longitudes 46°9' e 47°20' oeste (Figura 1) e engloba completa ou parcialmente 22 municípios, com área total de 9860km<sup>2</sup>.

No contexto geológico da área, há dois grandes compartimentos representados pela Bacia Sedimentar do Paraná e pelo Complexo Cristalino. As rochas da Bacia do Paraná pertencem às Formações Botucatu (arenitos), Serra Geral (basaltos e diabásios) e Aquidauana (arenitos e diamictitos). O Complexo Cristalino está representado, predominantemente, por rochas metamórficas como quartzito, milonito, xisto, mica-xisto, filito e gnaisses, pertencentes aos Grupos Canastra, Bambuí e Araxá, além do Complexo Barbacena.

A área possui variadas formas de relevo, apresentando desde áreas com padrões planos e suaves, até áreas escarpadas na região da Serra da Canastra. Envolve variados tipos de solos que vão de latossolos e argissolos, na maior parte da área, a nitossolos vermelhos e neossolos litólicos, presentes em regiões de relevo ondulado a montanhoso.

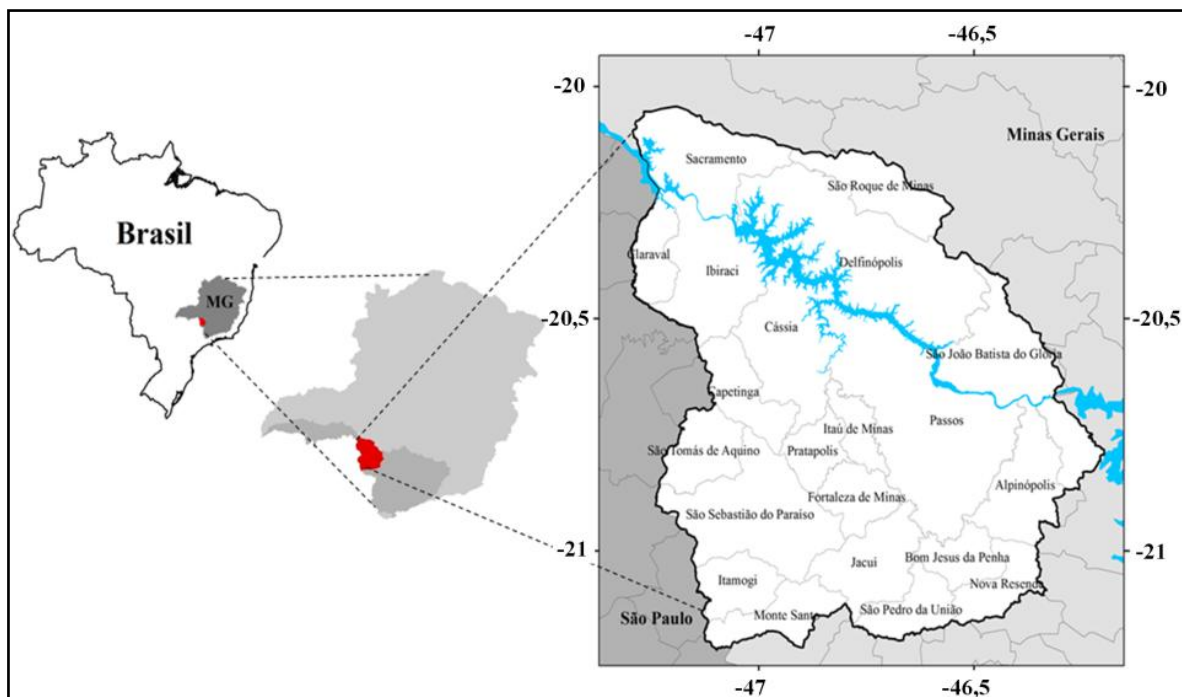


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

### 3. Material e método

Neste trabalho foram utilizados documentos cartográficos pré-existent e softwares de geoprocessamento. Os softwares utilizados foram o ArcGIS 10<sup>®</sup> e o AutoCADMap 2012<sup>®</sup>. Os documentos cartográficos utilizados foram fornecidos pelo projeto Grande Minas que, desde 2009, vem produzindo o Zoneamento Ambiental da área de estudo. Segue abaixo a relação de documentos cartográficos utilizados:

- a) Base topográfica, no formato digital vetorial, incluindo: curvas de nível, pontos cotados, rede de drenagem. A mesma foi digitalizada a partir de cartas topográficas do IBGE, na escala 1:50.000, por Magri e Collares (2011) e Gomes e Collares (2010).
- b) Mapa geológico, na escala 1:50.000, nos formatos digitais vetor e raster. Adaptado por Gomes e Collares (2010) a partir de trabalhos geológicos realizados na UNESP de Rio Claro e UERJ.
- c) Mapa pedológico, na escala 1:50.000, no formato digital raster e vetorial. Gerado e disponibilizado por Andrade (2012).

A sistemática deste trabalho envolveu avaliação de uma metodologia ágil e automatizada que, a partir de índices geomorfométricos, possibilita a produção de um documento cartográfico, que retrata a variabilidade espacial de aspectos relacionados à dinâmica de águas superficiais.

Para a caracterização desses processos de dinâmica fluvial usualmente empregam-se metodologias similares à metodologia proposta por Pejon e Zuquette (1993). Logo, por meio de métodos tradicionais, foi elaborada a carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial. O objetivo de gerar a carta foi de verificar a coerência dos resultados referentes ao potencial geomorfométrico e ajustar os pesos de cada índice e formas de classificação da carta proposta.

O fluxograma da Figura 2 resume os procedimentos metodológicos, realizados em ambiente de SIG, que envolveram este trabalho e que serão descritos nos tópicos a seguir.

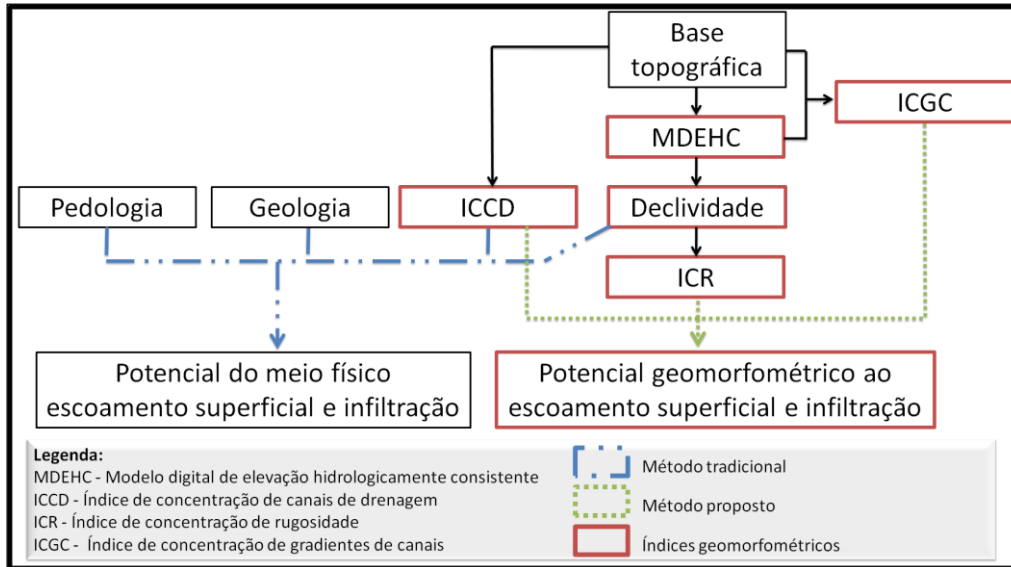


Figura 2 - Fluxograma síntese da metodologia empregada.

### 3.1. Carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial

A elaboração da carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial seguiu a linha metodológica proposta por Pejon e Zuquette (1993). A técnica em questão baseia-se no cruzamento de planos de informação relativos ao meio físico, com atribuição de pesos por meio de um processo analítico hierárquico (*AHP - Analytical Hierarchy Process*).

Os planos de informação relativos à geologia, declividade, pedologia e densidade hidrográfica (ICCD) foram reclassificados conforme a influência de seus atributos na geração de escoamento superficial. A seguir, os planos de informação foram cruzados, considerando distintos pesos em relação ao processo estudado. Na Figura 3, pode-se notar a matriz AHP de atribuição de pesos aos planos de informação cruzados para geração do produto cartográfico em questão.

		Potencial ao escoamento superficial				Peso
		Geologia	Densidade hidrográfica	Solo	Declividade	
Potencial ao escoamento superficial	Geologia	1	2/3	1/3	1/4	10,8%
	Densidade hidrográfica	1,50	1	2/3	1/2	18,7%
	Solo	3,00	1,50	1	2/3	29,2%
	Declividade	4,00	2,00	1,50	1	41,3%
<b>Razão de consistência</b>					0,536%	

Figura 3 - Matriz AHP de atribuição de pesos aos planos de informação cruzados para gerar a carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial.

A matriz obtida a partir do cruzamento desses planos consiste na representação do potencial do meio físico ao escoamento superficial da área de estudo. A carta foi dividida em 5 classes, conforme a variação de valores da população analisada. Foram utilizados 2 métodos de divisão da população, a divisão em quantis e em intervalos geométricos.

### 3.2. Carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial

Para gerar a carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial foram geradas e cruzadas as seguintes cartas intermediárias:

- Carta de índice de concentração de rugosidade,
- Carta de índice de concentração de canais de drenagem e
- Carta de índice de concentração de gradientes de canais.

Para geração de tais cartas foi utilizada a ferramenta de cálculo de densidade de eventos "*Kernel density*" da extensão "*Spatial Analyst*" do software *ArcGIS10*<sup>®</sup>. Nos testes que

envolveram a aplicação desta ferramenta foram programados raios de pesquisa que variaram entre 500 e 1500 metros.

Com objetivo de garantir a qualidade da informação nas bordas da área de estudo, foi necessário efetuar um "buffer" de 1500 metros na base topográfica. Esse procedimento deu-se pela digitalização a partir de cartas topográficas do IBGE, de curvas de nível, rede de drenagem e pontos cotados, além da base já existente.

Para a correção da base topográfica e elaboração do MDEHC, lançou-se mão de procedimentos relativos à interpolação de informações da base topográfica (curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem), identificação e correção de erros nessa base e identificação e preenchimento de depressões ao longo do modelo de elevações. Na sequência metodológica para elaboração do MDEHC, utilizaram-se de ferramentas e procedimentos preconizados por ESRI (2007).

Para confecção da carta de declividade utilizou-se a ferramenta "Slope", presente na extensão "3D Analyst" do ArcGIS10<sup>®</sup>. A imagem matricial de entrada utilizada foi o modelo digital de elevação hidrologicamente consistido, com tamanho de pixel de 10 metros. A partir da carta de declividade foi gerada uma malha regular de pontos (formato vetorial *shapefile*) com informação de declividade.

A partir do MDEHC e da rede de drenagem, foram extraídas informações relativas à amplitude altimétrica de cada canal de drenagem e comprimento de cada canal. Tais informações foram extraídas automaticamente por meio de ferramentas presentes na calculadora geográfica e na extensão "Spatial Analyst Tools" do ArcGIS10<sup>®</sup>.

Para geração das matrizes que representam distintos níveis de concentração de rugosidade, de gradientes de canais e de canais de drenagem, foi aplicada a ferramenta "Kernel density". Os arquivos de entrada selecionados para geração de tais matrizes e o campo população programado podem ser observados no Quadro 1.

Quadro 1 - Arquivos de entrada e campo população programados para geração das matrizes com os diferentes índices geomorfométricos.

Índice	Arquivo de entrada (formato vetorial <i>shapefile</i> )	Campo população
ICR	pontos com informações de declividade	declividade
ICGC	linhas que representam a rede de drenagem com informações referentes ao gradiente de cada canal de drenagem	gradiente de canais de drenagem
ICCD	linhas que representam a rede de drenagem	nenhum

O uso da ferramenta "Kernel density" para a elaboração das cartas geomorfométricas, com índices de concentração, procurou seguir recomendações relacionadas ao raio de pesquisa feitas por Sampaio (2012), Magri e Collares (2011) e Volkmer et al (2010). Após vários testes, optou-se por utilizar um raio de pesquisa de 1128 metros, que corresponde a uma área de abrangência de 4 quilômetros quadrados. O tamanho de pixel de saída programado foi de 10 metros.

As matrizes resultantes foram normalizadas para que os índices variassem em uma faixa de valores entre 1 e 100. Feito isto, procederam-se testes de cruzamento entre tais matrizes para obtenção de uma matriz que melhor representasse o potencial do escoamento superficial da água, em comparação com a carta gerada por procedimentos tradicionais.

Dessa maneira, para obtenção da carta final de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial, por meio da ferramenta "Raster Calculator", presente na extensão "Spatial Analyst Tools" do ArcGIS10<sup>®</sup>, efetuou-se a soma entre as matrizes normalizadas de ICGC, ICCD e ICR. Atribui-se peso 2 ao ICR, por representar o atributo de declividade, que tem grande influência no escoamento superficial.

Para a divisão da carta em classes de potencial de escoamento, foram testados dois métodos, divisão de classes em: quantis e intervalos geométricos.

#### 4. Resultados e Discussão

O índice de concentração de rugosidade representa o potencial de escoamento relacionado às encostas (ao relevo), ao passo que o índice de concentração de gradiente de canais expressa o potencial de escoamento da rede de drenagem. O índice de concentração de canais de drenagem mostra a quantidade de canais disponíveis para escoamento superficial e, conseqüentemente, o controle sobre a capacidade de escoamento superficial no terreno.

Na Figura 4 notam-se as cartas de potencial do meio físico e de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial. Nessa figura, são apresentadas duas formas de fatiamento da população de valores obtidos nas matrizes, segundo intervalos geométricos e quantis. Nota-se uma boa compatibilidade visual, entre ambos os documentos cartográficos.

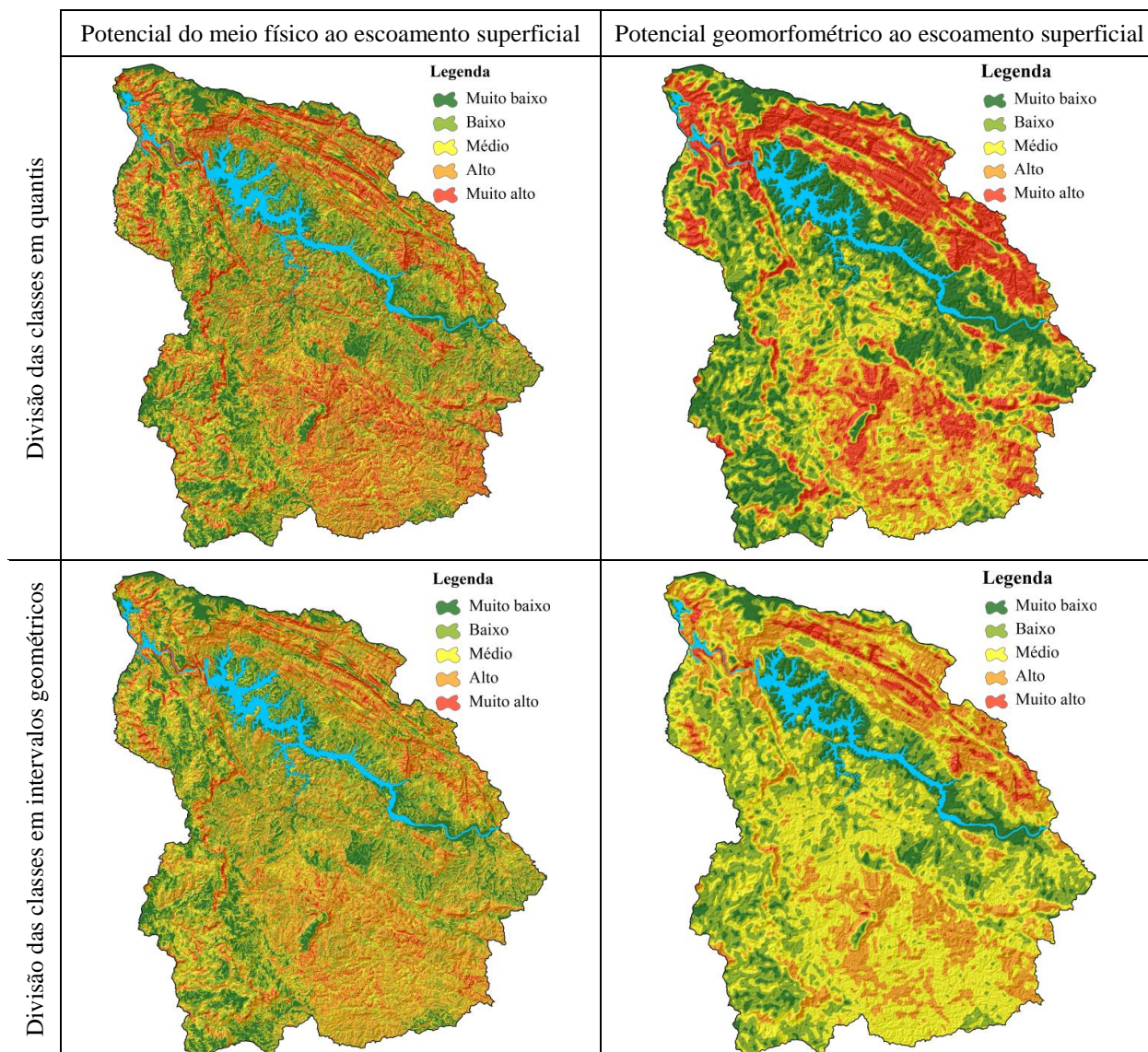


Figura 4 - Comparação entre as cartas de potencial de escoamento superficial, geradas conforme diferentes metodologias, e entre as diferentes formas de divisão das matrizes em classes segundo a distribuição da população de valores.

A carta de potencial do meio físico ao escoamento superficial gera unidades mais fragmentadas, ou seja, esta carta tem maior detalhamento relacionado aos processos de escoamento superficial. Já a carta de potencial geomorfométrico gera grupos de regiões com tipologias hidrológicas homogêneas, agrupadas segundo distintos padrões morfométricos.

Assim, a carta de potencial geomorfométrico retrata uma tendência do comportamento hidrológico da área com unidades mais regionalizadas, ou seja, com menor detalhamento em comparação a carta tomada como padrão de referência.

Na Figura 5 estão apresentados gráficos que indicam o percentual de cada classe das cartas de potencial do meio físico ao escoamento superficial que estão contidas em cada classe das cartas de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.

Na análise dos gráficos percebe-se uma boa compatibilidade numérica, entre as classes de potencial de escoamento superficial das cartas geradas pelo método tradicional em comparação a metodologia aqui proposta.

No gráfico da Figura 5 (b) nota-se que 89% da classe de muito alto potencial geomorfométrico ao escoamento é ocupada pelas classes de muito alto (45%) e alto (44%) potencial do meio físico ao escoamento. Aproximadamente 89% da classe de muito baixo potencial geomorfométrico ao escoamento é ocupada pelas classes muito baixo (63%) e baixo (26%) potencial do meio físico ao escoamento superficial. Isto demonstra que o novo método proposto promove uma regionalização dos padrões de escoamento identificando grandes áreas com potencial semelhante ao escoamento superficial.

O método de divisão da população em quantis realça as divisões em valores médios, contudo agrupa muito os valores mediamente altos a muito altos. A divisão da matriz que cria quebras de classes baseada em intervalos geométricos, tem um resultado cartograficamente mais equilibrado.

Pode-se notar uma maior compatibilidade dos mapas e dos intervalos de classes relativos à divisão da população em intervalos geométricos em relação à divisão da área em quantis.

A carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial tem a capacidade de retratar áreas com diferenças significativas quanto ao processo estudado, tanto devido a aspectos relativos às diferentes respostas hidrológicas das variadas formas de relevo, quanto àqueles relativos aos diferentes materiais terrestres (rochas e solos).

Assim a proposta metodológica aqui apresentada, consiste em uma alternativa que lança mão de geotecnologias de fácil e rápida aplicação e que permite o reconhecimento de padrões hidrológicos regionais. Onde cada célula contida na matriz de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial representa o padrão espacial da variação de tais valores.

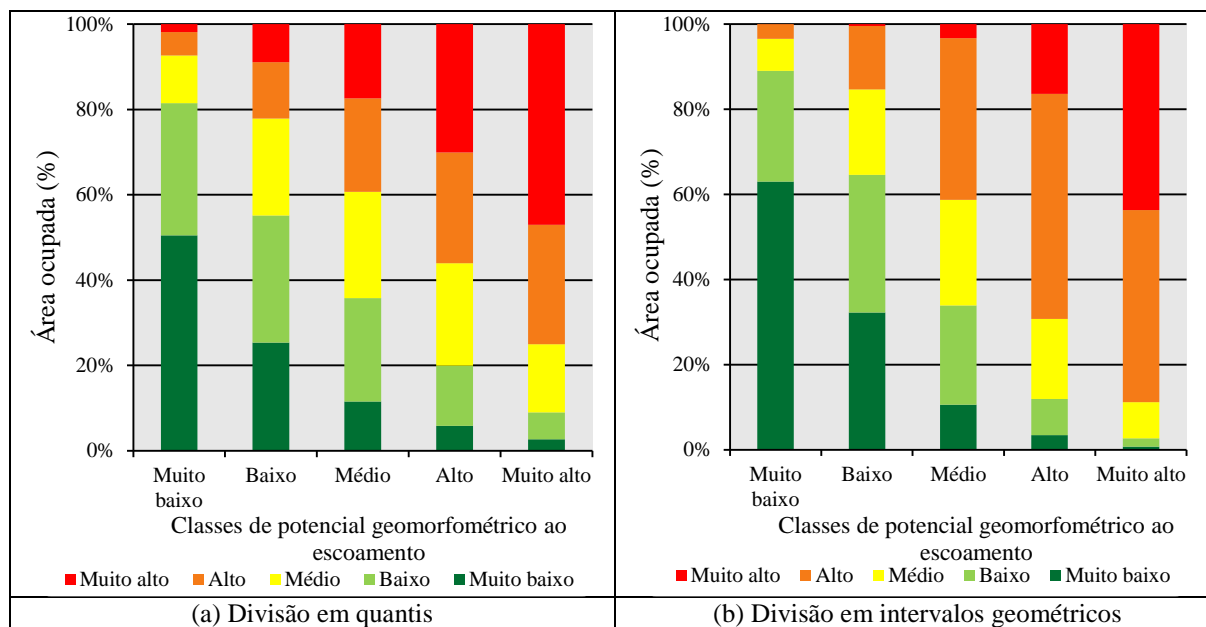


Figura 5 - Gráficos que representam o percentual de classes das cartas de potencial do meio físico ao escoamento superficial estão contidas nas diferentes classes da carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial, segundo as divisões da população de valores em quantis (a) e em intervalos geométricos (b).

### 3. Conclusões

Este trabalho objetivou propor e aplicar uma sistemática metodológica que permite, a partir de uma base topográfica bem estruturada e de ferramentas de SIG, a elaboração de um

documento cartográfico que delimita regiões com padrões hidrológicamente homogêneos, com relação ao potencial de escoamento superficial.

A partir de índices geomorfométricos considerados influentes no processo estudado, de simples e fácil aplicação em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica, pode-se gerar uma carta de potencial geomorfométrico ao escoamento superficial.

Pela comparação visual e numérica entre a carta gerada por métodos tradicionais e pela metodologia proposta, pode-se constatar uma boa compatibilidade entre as mesmas. Além disso, verificou-se que o produto cartográfico aqui proposto gera unidades (células) contendo o padrão espacial do ambiente em que estão contidas.

Logo, conclui-se a viabilidade de aplicação da metodologia aqui proposta, na detecção e/ou diferenciação de diferentes ambientes morfométricos, litológicos e pedológicos com diferentes padrões hidrológicos.

### **Agradecimentos**

Agradeço ao projeto Grande Minas pelo subsídio técnico e materiais disponibilizados, ao CNPQ e ao FHIDRO pelo suporte financeiro.

### **Referências Bibliográficas**

ANDRADE, H. **Levantamento Pedológico das Sub-Bacias Hidrográficas do Médio Rio Grande para fins do Zoneamento Ambiental**. Passos: FESP/UEMG, Junho, 2012. 100p. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

ESRI - Environmental System Research Institute. ArcGIS 10 Help: **The geographic information system (GIS) for everyone**. 2007. 400p.

GOMES, D. M.; COLLARES, E. G. **Compartimentação Territorial das Sub-Bacias Hidrográficas dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande em Macrounidades Ambientais e Unidades Territoriais Básicas-UTB'S**. Passos: Fundação de Ensino Superior de Passos - Universidade Estadual de Minas Gerais, Dezembro, 2010. 38p. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

GOMES, D. M.; COLLARES, E. G. **Levantamento Geológico das Sub-Bacias Hidrográficas dos Afluentes Mineiros do Médio Rio Grande**. Passos: Fundação de Ensino Superior de Passos - Universidade Estadual de Minas Gerais, Fevereiro, 2010. 21p. (Relatório Técnico-Científico – Projeto Grande Minas: União pelas Águas).

UEHARA, K.; JORGE, N.F. Águas de Superfície In: OLIVEIRA, A.M.S e BRITO, S.N.A. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p.101-109.

MAGRI, R. A. F. ; COLLARES, E. G. **A Elaboração de uma Carta de Potencial ao Escoamento Superficial para fins do Zoneamento Ambiental das Sub-Bacias Hidrográficas do Médio Rio Grande**. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011, São Paulo. Anais... CBGE São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011. CD-ROM

Patton, P.C.; Baker, V.R. **Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls**. Water Resources Research, 12(5), 1976, p.941-952.

PEJON, O. J. ; ZUQUETTE, Lázaro Valentin . Carta do Potencial de Escoamento Superficial da Folha de Piracicaba-SP. In: **Geociências** (São Paulo), SÃO PAULO-SP, v. 12, n. 2, p. 515-529, 1993.

Sampaio, T.V.N. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem - uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente** - ES. 2008. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

Sampaio, T. V. M. Índice de Concentração da Rugosidade (ICR): uma proposta para o mapeamento morfométrico via emprego de geotecnologias. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, SBGFA. **Anais ....** Viçosa, MG, 2009. On-line: Acesso em: 02.abril. 2012. Disponível em:

<[http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos\\_completos/eixo1/094.pdf](http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo1/094.pdf)> Silverman, B. W. **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. New York: Chapman and Hall, 1986.

STRAHLER, A.N. 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Network. In: CHOW, V.T. (ed.). **Handbook of Applied Hydrology**. McGraw-Hill. p. 40-74.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001  
Volkmer, S. et. al. Geomorfologia da quadrícula de Ponta Grossa, PR - uma ênfase aos recursos geotecnológicos utilizados. In: **Boletim de Geografia**, 2010, v. 28, n. 2. DOI: 10.4025/BOLGEOGR.V28I2.10614. On-line: Acesso em: 05.abril.2012, Disponível em:< <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/10614/6454>>