

Análise morfométrica das sub-bacias da bacia hidrográfica do Taquari-Antas/RS, Brasil.

Fabiana Rauber Sirangelo¹
Laurindo Antonio Guasselli²
Guilherme Garcia de Oliveira³

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS - CEPSRM
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia - Porto Alegre - RS

¹fabisirangelo@hotmail.com; ²laurindo.guasselli@ufrgs.br; ³g.g.oliveira10@gmail.com

Abstract. The fluvial geomorphology comes as science about the issues surrounding drainages and their relationship with the modeling the ground. As a general systems theory describes the changes that occur, due this correlation suggests the importance of understanding the different degrees of the terrain's characteristics generate on the runoff characteristics. This study seeks, therefore, to subdivide the watershed of Taquari-Antas and quantify the different morphometric indices in order to meet heterogeneous patterns inside a single watershed, which may explain the differences in runoff identified there. SRTM and morphometric indices presents the literature data were processed and used in ArcGIS. Through the extraction and calculation of the morphometric variables of each of the thirteen sub-basins classified the results and their spatial distribution were evaluated.

Palavras-chave: modelo digital de elevação, SRTM, morfometria; digital elevation model, SRTM, morphometry.

1. Introdução

Os estudos relacionados aos corpos fluviais por meio de parâmetros quantitativos permitem o esclarecimento de questões de gênese e dinâmica da paisagem, tendo em vista que a rede de drenagem assume papel de destaque na compartimentação do relevo. A morfometria geomorfológica permite a caracterização de uma região por meio de uma análise quantitativa do relevo, onde se observa a configuração espacial do conjunto de drenagens e vertentes. Com o avanço das plataformas de SIG as análises morfométricas, anteriormente elaboradas de forma manual, ganharam tempo e aplicabilidade em função da agilidade do processo e da precisão dos resultados obtidos.

Marchi et al. (2010) defendem que esforços maiores devem ser dedicados para identificar as características morfológicas específicas que afetam a suscetibilidade à eventos de inundação e movimentos de massa; sendo as variáveis morfométricas uma ferramenta poderosa na modelagem de sistemas fluviais. A identificação de padrões de escoamento associados à formas de relevo facilita a compreensão da gênese e da dinâmica destes eventos, conseqüentemente facilitando a identificação de áreas de alerta, possibilitando uma redução de danos humanos e materiais desencadeados por estes.

De acordo com Sausen & Narvaes (2013) a maioria dos órgãos e instituições envolvidas com desastres naturais, tem observado que o dano causado pelos eventos extremos muitas vezes poderia ser prevenido, reduzido ou minimizado, se a população em geral, os tomadores de decisão, os formadores de políticas e de opinião, bem como os educadores tivessem a correta noção do que são estes eventos.

Segundo Villela e Mattos (1975) conhecer as características físicas das bacias hidrográficas, como a área de drenagem, a forma da bacia, o sistema de drenagem e as características do relevo, são de grande utilidade, pois permite determinar a variação espacial dos elementos do regime hidrológico.

Christofoletti (1969) salienta que estudos envolvendo análise da rede hidrográfica podem levar à compreensão e à elucidação de numerosas questões geomorfológicas, pois os cursos d'água constituem o processo morfogenético dos mais ativos na escultura da paisagem. Faz uma síntese geral dos variados aspectos de análise morfométrica, reunindo índices e parâmetros importantes para a realização de um estudo analítico das bacias hidrográficas.

Ainda de acordo com Christofolletti (1969) foi Robert E. Horton o pioneiro nos estudos relativos à interpretação quantitativa das bacias hidrográficas, dando partida a uma nova fase da morfometria através da proposição de inúmeros aspectos de abordagem analítica para os cursos d'água. A geomorfologia fluvial estuda os processos e as formas relacionadas com o escoamento dos rios. Todos os acontecimentos que ocorrem na bacia de drenagem (condições climáticas, cobertura vegetal, litologia...) repercutem, direta ou indiretamente nos rios.

De acordo com a corrente geomorfológica de noção geral dos sistemas, um sistema pode ser definido como o conjunto dos elementos, e das relações entre si e os seus atributos (Christofolletti, 1974). Inicialmente introduzida por Strahler (1950; 1952) e posteriormente aplicada vastamente por Hack e Chorley, entre outros.

A geomorfologia fluvial e o estudo das variáveis morfométricas do relevo, quando combinadas, pode-se dizer que existe um universo, onde se identificam os sistemas antecedentes e os subsequentes; entretanto através do mecanismo de retroalimentação os sistemas subsequentes voltam a exercer influência sobre os antecedentes, numa perfeita interação do universo. Neste caso exemplificado ao ponto que as formas das encostas e sua declividade, orientação e aspecto influenciam no modo como o escoamento superficial vai ocorrer em dado local. Enquanto que este excedente hídrico acaba também por moldar constantemente as características das encostas, modificando as características morfométricas do terreno ao longo do tempo.

A teoria geral dos sistemas defende que esta relação entre forma das encostas e eventos extremos ocorre em duas escalas diferentes, portanto, em dois tamanhos (Christofolletti, 1974), portanto em um espaço-fase bidimensional. A teoria sugere que exista uma correlação entre as variáveis, mesmo que em escalas distintas. Onde a dinâmica do rio acaba por alterar a dinâmica da bacia hidrográfica, e vice-versa. O valor obtido na correlação indica a força, enquanto que o sinal, positivo ou negativo, assinala a direção na qual ocorre o relacionamento.

Quando classificados os sistemas em geomorfologia esta relação apresenta-se como um sistema de retroalimentação, onde as características morfométricas do terreno desencadeiam determinada resposta no escoamento hídrico, que acaba por alterar as formas de declividade e vertente, novamente remodelando a morfometria do terreno.

O objetivo deste trabalho é identificar padrões morfométricos nas sub-bacias da bacia hidrográfica do Taquari-Antas como subsídio para a identificação de áreas suscetíveis a eventos de inundações e enxurradas e/ou movimentos de massa.

Entende-se que o desenvolvimento deste trabalho contribui significativamente no que tange ao planejamento e entendimento da ocorrência destes eventos visando à redução dos prejuízos causados pelos mesmos e podendo servir de base para políticas públicas e trabalhos futuros, sendo importante também para a definição de prioridades e de tomadas de decisão em relação à prevenção destes desastres.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Taquari-Antas situa-se na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo 98 municípios inseridos total ou parcialmente, em uma área de 26.276km². Arrecada 20% do PIB estadual e representa 16% da população total do estado. Esta é uma região com alto índice de industrialização, áreas intensamente urbanizadas e altos índices de ocorrência de eventos de inundação. Possui, em termos hidrológicos, destaque em função de ser a bacia de maior importância na contribuição do rio Jacuí, maior formador do lago Guaíba.

2.2. Materiais e Métodos

Através da extensão do software ArcGis, aplicativo ArcMap, barra de ferramentas *Hidrology* foram feitos processamentos de preenchimento da superfície raster (*fill*) para remoção de pequenas imperfeições, direções de fluxo (*flow direction*) e fluxo acumulado (*flow accumulation*) considerando o mosaico de imagens SRTM para o Rio Grande do Sul.

As direções de fluxo utilizaram o método proposto por Jenson & Domingues (1988), que utiliza a lógica da maior declividade, dando uma direção de fluxo para cada pixel do modelo (janela 3x3). Posteriormente, foi gerada uma grade com áreas acumuladas de drenagem, onde cada pixel recebe um valor correspondente à soma das áreas dos pixels que deságuam nele.

Para a delimitação da rede de drenagem vários valores de mínimo celular de contribuição de fluxo para a definição de uma célula de drenagem. A operação Condicional, com "value < 123", seleciona apenas os pixels que apresentam fluxo acumulado compatível a 10km² de área drenada. Este limiar foi determinado em função do grid de da escala de resolução das imagens SRTM (90m) visando um resultado das drenagens mais próximo possível do real. Já para a geração automática das bacias foi utilizado, na operação condicional, o limiar de 100.000 gerando 13 sub-bacias com pelo menos um rio de quarta ordem.

A finalização ocorre através do comando *Watershed* permite a delimitação da bacia, seguido do comando *Raster to Features* para a transformação em polígono.

A hidrografia mapeada e a drenagem numérica, bem como o limite da bacia foram representadas no formato vetorial, e utilizadas para a determinação de diversos parâmetros. A análise morfométrica da bacia inicia-se pela ordenação dos canais fluviais, cujas medições necessárias são efetuadas ao longo das linhas de escoamento. A partir de então se processam os aspectos lineares, areais e hipsométricos (Christofolletti, 1981).

Grandezas que variam continuamente no espaço podem ser representadas graficamente através de um Modelo Numérico de Terreno (MNT). Araújo et al. (2009) apontam que as novas tecnologias e produtos orbitais, como por exemplo as imagens de Radar SRTM, possibilitam um levantamento mais rápido e detalhado de bacias hidrográficas.

Christofolletti (1980) trabalha com a ideia de que "as técnicas estatísticas possuem importância em muitos estágios da pesquisa, fornecendo as bases para a amostrarem, a fim de analisarem a significância dos dados e estabelecer as correlações. É sintomático, também, que a análise e a experimentação dos estudos geomorfológicos se façam aplicando princípios e conceitos admitidos em outras ciências, fazendo com que ela se integre definitivamente no movimento científico interdisciplinar da nossa época".

Os modelos digitais de elevação são malhas de pontos georreferenciados onde cada pixel apresenta a informação altimétrica de onde ele está localizado, ou seja, além das coordenadas X e Y tradicionais associadas à localização geográfica do ponto, apresenta uma variável Z correspondente ao dado de elevação. Valeriano (2008) aponta que toda a aquisição do SRTM foi planejada para oferecer suporte a mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000.

A análise morfométrica de bacias é definida pelo IBGE (2009) como o conjunto de procedimentos metodológicos que buscam a investigação e a compreensão dos componentes naturais de uma bacia hidrográfica. Os estudos relacionados aos corpos fluviais através de parâmetros quantitativos levam ao esclarecimento de questões de gênese e dinâmica da paisagem, tendo em vista que a rede de drenagem assume papel de destaque na compartimentação do relevo.

A geomorfologia fluvial engloba o estudo destes corpos d'água e das bacias hidrográficas. A caracterização morfométrica destas consiste na descrição de fatores topográficos e geomorfológicos na geração de escoamentos e na determinação de coeficientes definidores de forma, drenagem, declividade da bacia, entre outros.

2.3 Variáveis Morfométricas

Relação de Bifurcação: Proposto por Horton (1945), é a relação entre o número total de canais de certa ordem e o número total de canais de ordem imediatamente superior, de acordo com a equação:

$$Rb = \frac{Nu}{Nu'} \quad (\text{Eq. 1})$$

Índice de Circularidade: Proposto por Miller (1953) e citado por Strahler (1958) - apresenta a relação entre a área total da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro. O valor máximo encontrado é 1,0, quando o perímetro da bacia corresponder ao perímetro do círculo. A equação utilizada é apresentada a seguir:

$$C = \frac{A}{Ac} \quad (\text{Eq. 2})$$

Fator de Forma: Este índice apresenta a relação entre a área da bacia e o quadrado de seu comprimento axial. Mede-se o comprimento axial da bacia (L) quando se segue o curso d'água mais longo desde a foz até a cabeceira mais distante, de acordo com a equação a seguir:

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Densidade Hidrográfica: definida por Horton (1945) com a denominação de frequência de rios. É a relação existente entre o número de rios ou cursos d'água e a área da bacia hidrográfica.

$$Dh = \frac{N}{A} \quad (\text{Eq. 4})$$

Densidade de Drenagem: definida por Horton (1945) como o índice que relaciona o comprimento total dos canais com a área da bacia hidrográfica, sendo eles intermitentes ou perenes. A finalidade deste índice é de comparar o comprimento dos canais drenados em uma área padrão, por exemplo o km

$$Dd = \frac{Et}{A} \quad (\text{Eq. 5})$$

Razão de relevo: a razão de relevo (Rr) foi inicialmente apresentada por Schumm (1956), considerando o relacionamento existente entre a amplitude altimétrica máxima (Hm) de uma bacia e a maior extensão da referida bacia (L), paralelamente à linha principal de drenagem.

$$Rr = \frac{Hm}{Lh} \quad (\text{Eq. 6})$$

Declividade Média: para o cálculo da declividade média é feito um somatório de número de ocorrências de pixels em cada classe de declividade. Na sequência é calculada a declividade média dos pixels para cada classe. A terceira etapa consiste em multiplicar o número de pixels de cada classe pela média deles, obtendo-se assim o valor médio da declividade de todos os pixels. Para a fusão de todas as classes e obtenção do parâmetro em

relação a toda bacia hidrográfica é feita uma divisão da somatória das médias e dividido pela somatória dos pixels existentes, conforme a equação apresentada a seguir:

$$D_m = \frac{\Sigma \text{Média da Declividade}}{\Sigma \text{Média de Ocorrências}} \quad (\text{Eq. 7})$$

3. Resultados e Discussão

Os resultados estão apresentados na Tabela 1 e Figura 2 de acordo com a apresentação da subdivisão da Figura 1, onde cada bacia está etiquetada com o respectivo número de referência para análise.

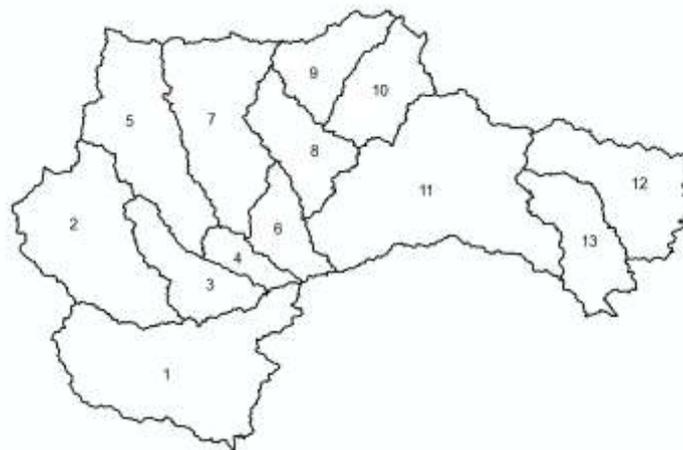


Figura 1 – Gabarito de espacialização das treze sub-bacias analisadas.

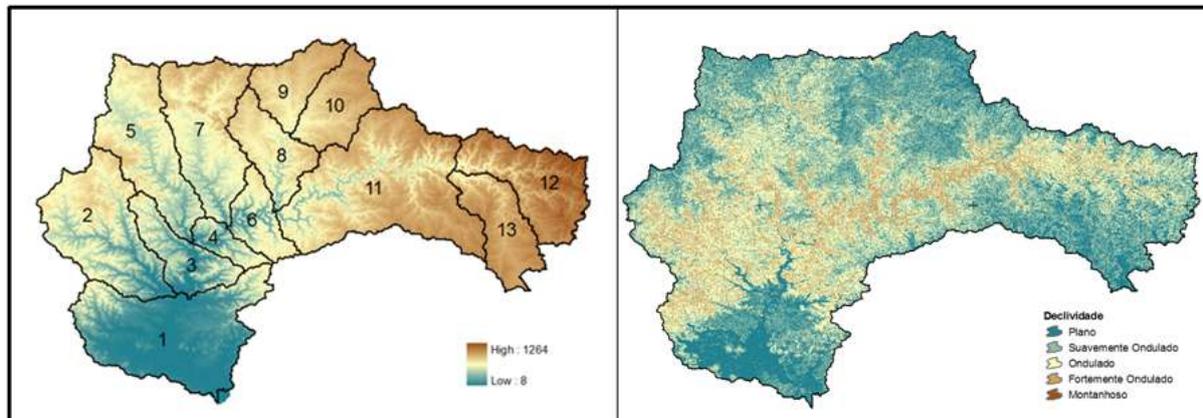


Figura 2 – Espacialização das altimetrias e declividades da bacia hidrográfica do Taquari-Antas.

Tabela 1- Resultados por índice morfométrico:

Sub-Bacia	Área (km ²)	Perímetro(km)	Amplitude Altimétrica (m)	Extensão Total(km)	Comprimento Axial (km)
1	3.825	400,4	724	3.083	83,38
2	2.829	312,9	792	2.106	48,14
3	1.198	215,5	745	868	41,26
4	489	129,1	688	359	18,28
5	2.477	319,4	774	1.872	52,58
6	874	173,9	696	627	24,24
7	2.556	309,1	914	1.932	47,47
8	1.292	224,4	739	950	32,34

9	1.136	194,1	551	877	52,00
10	1.331	208,7	559	1.027	35,53
11	4.775	434,0	916	3.523	96,31
12	2.045	280,1	729	1.234	41,69
13	1.442	251,0	524	1.114	27,00

<i>Sub-Bacia</i>	<i>Rb</i>	<i>Ic</i>	<i>Kf</i>	<i>Dh</i>	<i>Dd</i>	<i>Rr</i>	<i>Dm</i>
1	3,77	0,299	0,55	0,384	806	8,6	6,12
2	4,09	0,361	1,22	0,348	744	16,4	12,25
3	3,55	0,324	0,70	0,342	724	18,0	12,79
4	3,67	0,369	1,46	0,324	733	37,63	12,87
5	5,37	0,305	0,89	0,355	755	14,72	9,49
6	3,51	0,363	1,48	0,320	717	28,71	12,30
7	4,08	0,336	1,13	0,353	755	19,25	8,87
8	3,96	0,322	1,23	0,355	735	22,85	8,99
9	3,41	0,379	0,42	0,353	772	10,59	4,58
10	4,42	0,384	1,05	0,367	771	15,73	4,62
11	4,28	0,318	0,51	0,351	737	9,51	9,26
12	4,83	0,327	1,17	0,326	603	17,48	8,79
13	4,68	0,287	1,97	0,371	773	19,40	5,77

Rb - relação de bifurcação; Ic - índice de circularidade; Kf - fator de forma; Dh - densidade hidrográfica; Dd - densidade de drenagem; Rr - razão de relevo; Dm - declividade média.

Grandes variações dos valores de relação de bifurcação sugerem se tratar de bacias não equilibradas. Quanto maior a Rb média maior é o grau de ramificação da rede de drenagem de uma bacia e, portanto, maior a tendência para picos de cheia. Para cada uma das bacias foi obtido o índice de bifurcação entre cada uma das ordens da hierarquia fluvial, e logo calculada a média destes valores.

O índice de circularidade tem a finalidade de comparar a forma da bacia em relação à de um círculo, considerado como a expansão areal melhor relacionada com o escoamento fluvial (Christofolletti, 1970). Em princípio podemos considerar que quanto maior for o referido índice, a concentração das águas carregadas pelos afluentes será mais rápida, e as cheias têm a possibilidade de serem mais brutais e diferenciadas. Salienta-se que bacias com forma circular, apresentam maiores possibilidades de chuvas intensas ocorrerem simultaneamente em toda a sua extensão, concentrando grande volume de água no tributário principal.

Uma bacia com fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com maior fator de forma. Isso se deve ao fato de que em uma bacia estreita e longa, com fator de forma baixo, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão.

A finalidade da densidade hidrográfica é comparar a frequência ou a quantidade de cursos d'água existentes em uma área de tamanho padrão, por exemplo, o km².

A densidade de drenagem é o índice de onde é possível conhecer o potencial da bacia em relação ao seu escoamento superficial, o que leva ao conhecimento da intensidade dos processos erosivos de esculturação dos canais.

A razão de relevo, podendo também ser considerada a média da declividade do rio principal, o valor esperado para bacias com suscetibilidade aos eventos de inundação e enxurrada deve apontar valores positivos.

Machado (2010) descreve a declividade média como o parâmetro morfométrico mais importante no diagnóstico físico e na gestão dos recursos hídricos. A partir da declividade média da bacia é possível avaliar a suscetibilidade promovida pelo escoamento hídrico

superficial. Machado (2010) descreve a declividade média como o parâmetro morfométrico mais importante no diagnóstico físico e na gestão dos recursos hídricos. A partir da declividade média da bacia é possível avaliar a suscetibilidade promovida pelo escoamento hídrico superficial. Abaixo estão espacializados os diferentes índices na Figura 3.

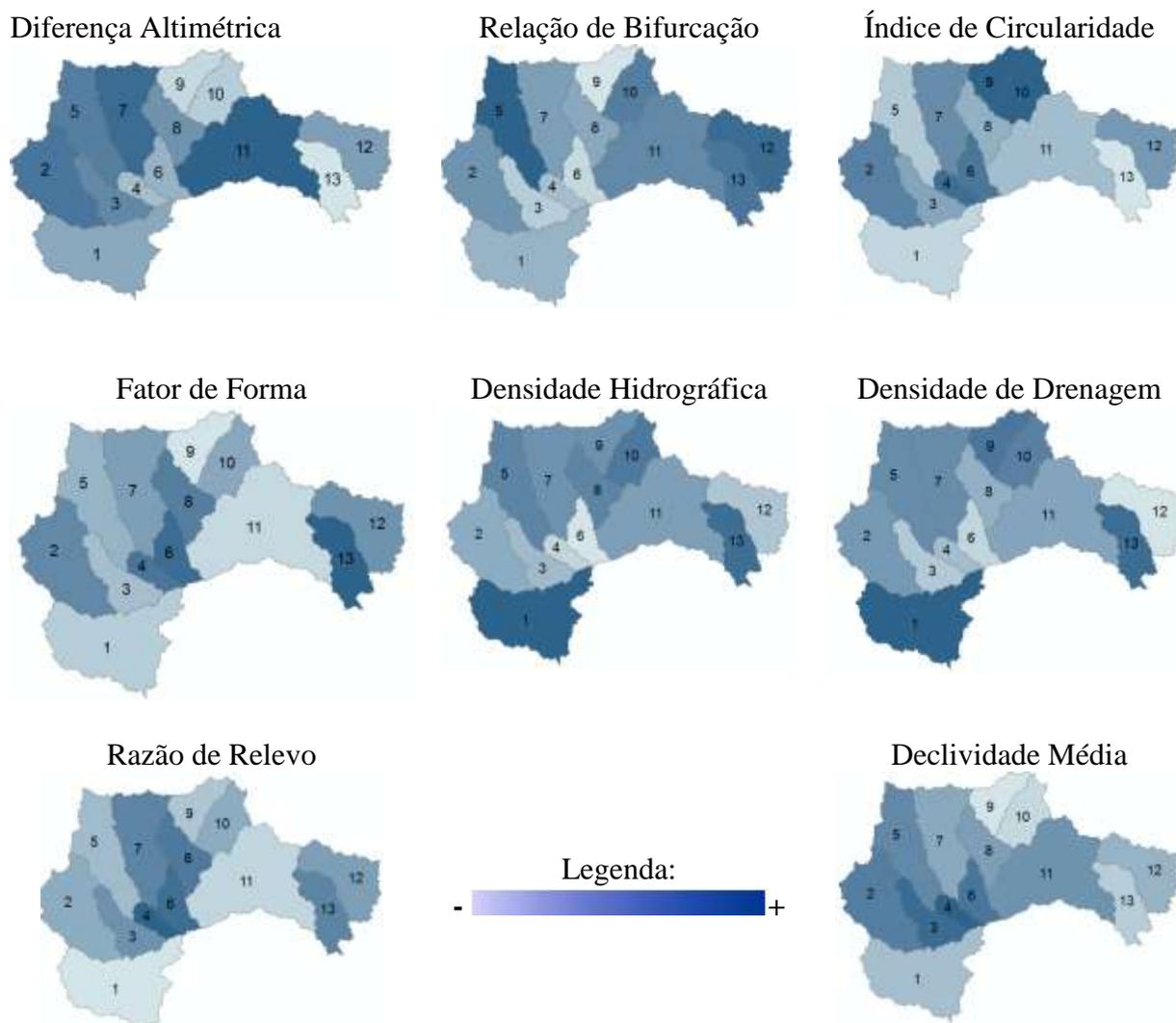


Figura 3 - Espacialização das variáveis morfométricas.

4. Conclusões

Na tentativa de identificar diferentes tendências de escoamento em função das diferentes morfometrias inseridas dentro da heterogênea bacia esta metodologia de subclassificação permite visualizar onde cada uma das variáveis ganha ou perde importância no que tange a localização geográfica na bacia, permitindo assim um aprofundamento na tentativa de identificar limiares e fatores que interferem na geração de eventos extremos como inundações e movimentos de massa na bacia como um todo.

Compreender as diferenças e heterogeneidades das sub-bacias componentes da Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas mostra-se de fundamental importância para a continuidade dos estudos no que tange suscetibilidade e risco nestas áreas.

Referências Bibliográficas

- Araújo, E.P.De; Teles, M.G.L.; Lago, W.J. S. Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25 – 30 abril 2009, Anais... INPE, v. 1, p. 4631 – 4638. 2009.
- Christofoletti, A. **Análise morfométrica de bacias hidrográficas no Planalto de Poços de Caldas**. 375pg. Tese (Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1970.
- Christofoletti, A. **Análise morfométrica de bacias hidrográficas**. *Notícia Geomorfológica*, v. 9, n.18, p. 35-64, 1969.
- Christofoletti, A. **Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos processos de planejamento**. In: Guerra & Cunha (Orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 1ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. p. 415-440. 1994.
- Christofoletti A. **Geomorfologia Fluvial**. v1. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- Horton, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. *Geological Society of America Bulletin*, v.56, n.3, p. 275-370, 1945.
- IBGE - Manual técnico de Geomorfologia / IBGE, Coordenação de Recursos naturais e Estudos Ambientais. - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009.
- Jenson, S.K.; & Domingue, J.O. **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- Machado P. J. O. (Org.) **Diagnóstico físico-ambiental da bacia hidrográfica do córrego São Pedro: um exercício acadêmico de gestão dos recursos hídricos**. Ubá: Ed.Geographica, consultoria, estudos e projetos ambientais Ltda. 2010.
- Marchi, L.; Borga, M.; Preciso, E.; Gaume, E. Characterization of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology* 394. Pg 118-133. 2010.
- Miller, J.P. **High mountain streams; effects of geology of channel characteristics and bed material: Memoir - New Mexico**. Bureau of Mines and Mineral Resources, 53p. 1958.
- Sausen, T. M. & Narvaes, I.S. **Desastres naturais e geotecnologias: inundação** - Caderno didático nº7. INPE, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. São José dos Campos, 2013.
- Schumm, S.A. **Disparity between present rates of denudation and orogeny**, US Geological Survey Professional Paper 454, 13. 1963.
- Sschumm, S.A. **Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy**. *Geological Society of America Bulletin*, n. 67, p. 597- 646, 1956.
- Strahler, A.N. **Geologia Física**. Barcelona: Omega, 1992.
- Strahler, A. N. **Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography**. *Geological Society of America Bulletin*, v. 63, p. 1117-1142, 1952.
- Valeriano, M. M. **Dados topográficos**. In: Teresa G. Florenzano. (Org.). *Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais*. Cap. 3, p. 72-104. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008.
- Villela, S. M.; Mattos, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.