

Caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras: proposição do indicador da declividade média dos rios e do coeficiente de suscetibilidade de enchentes

Physical characterization of fourteen Brazilian hydrographic basins: proposition of the indicator of the average slope of the rivers and the coefficient of susceptibility to floods

Robison Negri^{1,2} , Heinz Fill²

RESUMO

Os parâmetros morfométricos são informações de grande relevância para a caracterização física das bacias hidrográficas. O presente estudo caracterizou fisicamente 14 bacias sul-brasileiras, segundo 10 parâmetros morfométricos relacionados a ordem, forma, características do sistema de drenagem e declividade das bacias, além de ter desenvolvido uma análise de suas correlações. A metodologia consistiu no tratamento do modelo digital de elevação, disponibilizado pelo projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2008), com resolução espacial de 30 metros, complementado com informações do SIG Google Earth. Como resultados, além da caracterização e classificação das bacias, puderam-se propor dois novos parâmetros morfométricos. O primeiro, denominado indicador da declividade média dos rios, demonstrou bom desempenho para representar simultaneamente a declividade da bacia e o coeficiente de sinuosidade dos rios, equivalendo de maneira sintética à declividade média de todos os rios da bacia. O segundo foi o coeficiente de suscetibilidade de enchentes, que representa o conjunto de todas as características espaciais da bacia e de seus rios. Os resultados levam a crer que este último seja um ótimo indicador para análise do risco de cheias em bacias de pequeno e médio portes. Foram propostos também critérios de classificação para os parâmetros comprimento de escoamento superficial, coeficiente de rugosidade, declividade axial e indicador da declividade média dos rios e coeficiente de suscetibilidade de enchentes.

Palavras-chave: morfometria; bacia hidrográfica; enchente.

ABSTRACT

The morphometric parameters are highly relevant information for the physical characterization of watersheds. The present study physically characterized 14 southern Brazilian basins, according to 10 morphometric parameters related to the order, shape, characteristics of the drainage system, and slope of the basins, in addition to developing an analysis of their correlations. The methodology consisted of treating the Digital Elevation Model (DEM), provided by the INPE TOPODATA project (2008), with a spatial resolution of 30 meters, complemented with information from the GIS Google Earth. As a result, in addition to the characterization and classification of basins, two new morphometric parameters can be proposed. The first one, called indicator of the average slope of the rivers, demonstrated good performance to simultaneously represent the slope of the basin and the sinuosity coefficient of the rivers, synthetically representing the average slope of all the rivers of the basin. The second was the flood susceptibility coefficient, which represents the set of all spatial characteristics of the basin and its rivers. Results suggest that the latter is an excellent indicator for analyzing the risk of flooding in small- and medium-sized basins. Classification criteria were also proposed for the parameters runoff length, roughness coefficient, axial slope and average slope indicator of rivers, and flood susceptibility coefficient.

Keywords: morphometry; hydrographic basin; flood.

¹Centro Universitário Católica de Santa Catarina - Jaraguá do Sul (SC), Brasil.

²Universidade Federal do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

*Autor correspondente: robisonnegri@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 05/10/2022 - **Aceito:** 26/04/2023.

INTRODUÇÃO

As características do escoamento de uma bacia hidrográfica são controladas por sua estrutura geomorfológica (EZE; JOEL, 2010), que pode ser representada por um conjunto de fatores morfométricos. Segundo Strahler (1964), os fatores morfométricos fornecem uma descrição quantitativa da geometria da bacia. O seu conhecimento auxilia significativamente no entendimento do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, fornecendo informações sobre sua formação e desenvolvimento (BISHT *et al.*, 2018; DAR; CHANDRA; ROMSHOO, 2013; IFABIYI, 2004; JAIN; SINHA, 2003; OKOKO; OLUJINMI, 2003; PARETA; PARETA, 2012; ROMSHOO; BHAT; RASHID, 2012; SONI, 2017; VANDANA, 2013). A adequada gestão da bacia hidrográfica também depende do conhecimento de suas características físicas, facilitando a compreensão de questões ligadas à sua dinâmica ambiental (RAWAT; MISHRA, 2016).

Várias pesquisas e estudos têm sido realizados com o objetivo de aprimorar as técnicas e ferramentas de caracterização morfométrica ou, simplesmente, fornecer indicadores que podem ser aplicados em estudos de regionalização (MAGESH; CHANDRASEKAR, 2012; MAGESH; CHANDRASEKAR; KALIRAJ, 2012).

Entre as principais características físicas das bacias hidrográficas, podem-se destacar como mais influentes no comportamento hidrológico: a forma, o relevo, a área, a geologia, a rede de drenagem, o solo e o tipo de cobertura vegetal (SANTOS; HERNANDEZ, 2013; SANTOS *et al.*, 2018).

A obtenção dos parâmetros morfométricos, geralmente, baseia-se no levantamento de dados fisiográficos, que, por definição, são características físicas mensuráveis das bacias hidrográficas (SANTOS *et al.*, 2018). Esses dados, por sua vez, podem ser divididos em três categorias dimensionais: lineares (uma dimensão), planas (duas dimensões) e espaciais (três dimensões) (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2015). Portanto, a análise morfométrica envolve a execução de medições lineares, de áreas e de gradientes, com o objetivo de obter a descrição quantitativa do sistema de drenagem e adjacências (BISHT *et al.*, 2018; NAUTIYAL, 1994; SONI; TRIPATHI; MAURYA, 2013; SONI, 2017; STRAHLER, 1964; TRIPATHI; SONI; MAURYA, 2013).

Para esse feito, são utilizadas as informações geoespaciais da bacia hidrográfica, que podem ser obtidas por intermédio de mapas topográficos ou imagens de satélite. Os esforços conceituais iniciais apresentavam como limitação a disponibilidade de dados, sendo os estudos geralmente associados a cartas com baixa resolução e com longos períodos entre suas atualizações. Com a modernização dos métodos de aquisição de dados, passando pelas técnicas topográficas terrestres, métodos de aquisição aéreos e via satélite, e com o desenvolvimento da tecnologia da informação, os estudos fisiográficos têm se tornado mais rápidos e assertivos. O desenvolvimento do sensoriamento remoto (SR), do sistema de informações geográficas (SIG) e do sistema de posicionamento global (GPS) tem auxiliado significativamente a ciência hidrológica, possibilitando maior disponibilidade de informações geográficas, bem como maior velocidade no processamento (HAMDAN; KHOZYEM, 2018).

Tais dados e ferramentas têm sido usados na análise, manipulação e extração de informações geoespaciais das bacias hidrográficas, favorecendo o desenvolvimento do conhecimento. Podem-se citar como exemplos: Agarwal (1998), Al Saud (2010), Al-Ghamdi *et al.* (2012), Basihy *et al.* (2017), Bisht *et al.* (2018), Chavan e Gadge (2013), Chopra, Dhiman e Sharma (2005), Dawod *et al.* (2011), Geena e Ballukraya (2011), Kouli *et al.* (2007), Kumar *et al.* (2000), Moussa (2003), Nag (1998), Narendra e Nageswara (2006), Obi Reddy, Maji e Gajbhiye (2002), Soni, Tripathi e Maurya (2013), Soni (2017), Tripathi, Soni e Maurya (2013) e Vittala,

Govindaiah e Honne Gowda (2004). Segundo Hamdan e Khozyem (2018), o SR e o SIG têm se apresentado como ferramentas adequadas e eficientes para a descrição quantitativa das características morfométricas das bacias hidrográficas, além de possibilitarem baixo custo operacional (GROHMANN; RICCOMINI; ALVES, 2007; RAWAT; MISHRA, 2016; RAWAT; MISHRA; TRIPATHI, 2012).

Nesse contexto, o modelo digital de elevação (MDE) é a base central dos estudos de caracterização física das bacias, permitindo o armazenamento das informações geoespaciais em formato de grade e garantindo a automação do processo de análise das informações geográficas (SAHOO; JAIN, 2018). O MDE tem sua matriz espacial baseada em uma resolução gráfica e analítica preestabelecida, que é função, entre outros fatores, da tecnologia de aquisição dos dados.

Atualmente, a nova geração de fotossensores pode proporcionar a aquisição de dados com resoluções espaciais menores que 2 metros, conforme Bajracharya e Jain (2020). Tal evolução tem o potencial de transformar a análise e modelagem dos processos hidrológicos, principalmente no delineamento das redes de canais (SAHOO; JAIN, 2018) e de zonas úmidas (WU; LANE, 2017), auxiliando na compreensão dos processos de geração de escoamento (DEGETTO; GREGORETTI; BERNARD, 2015) e na sua modelagem analítica, conforme citam Biron *et al.* (2013), Liu e Zhang (2011), Rigon *et al.* (2016) e Yang *et al.* (2014).

Em que pesem os avanços tecnológicos da área, a maior parte dos estudos realizados nos últimos dez anos foi baseada em dados geoespaciais com resoluções da ordem de 30 metros. Favoravelmente a isso, segundo Bajracharya e Jain (2020) e Sahoo e Jain (2018), os modelos hidrológicos têm pouca sensibilidade à resolução do MDE, e resoluções diferentes fornecem resultados sem diferença estatisticamente significativa quando aplicadas em análises morfométricas. Outro aspecto relevante a ser considerado é que o aumento da resolução da base de dados geoespaciais acarreta aumento significativo da necessidade de armazenamento e processamento. Portanto, a relação custo-benefício do aumento da resolução do MDE ainda é discutível (BAJRACHARYA; JAIN, 2020).

As imagens de satélite e fotografias aéreas também são fontes importantes de informação, auxiliando na análise das características e geometria dos canais, rugosidades e uso da bacia. Sua aplicação pode se dar pelas análises visual, gráfica ou fotométrica (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2015; KALIRAJ; MEENAKSHI; MALAR, 2012; MESA, 2006).

Os primeiros estudos morfométricos datam da década de 1940, e sua evolução tem se pautado na proposição de novos métodos que procuraram relacionar o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas com suas características físicas. Também merecem igual destaque os esforços científicos e técnicos despendidos na definição dos parâmetros característicos das bacias hidrográficas, com notável interesse para a engenharia e sociedade em geral.

Dessa forma, o presente trabalho, além de contribuir com a caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras, com foco na Região Sul do Brasil, também apresenta uma análise de correlação entre os parâmetros morfométricos estudados, com o intuito de colaborar com a classificação da potencialidade de ocorrência de eventos extremos de vazões máximas nas bacias hidrográficas, propondo um método indicativo da susceptibilidade de ocorrência de cheias nas bacias hidrográficas, com base em suas características físicas.

METODOLOGIA

Foram selecionadas 14 bacias hidrográficas, com área predominantemente de uso rural, localizadas no sul do Brasil, com disponibilidade de dados *raster* e

variabilidade de características morfométricas. A localização das bacias hidrográficas selecionadas é apresentada no Quadro 1, sendo o referencial geográfico a estação fluviométrica existente em sua exutória.

Inicialmente, procedeu-se ao tratamento dos dados tipo *raster* em *software* de geoprocessamento, utilizando para a delimitação das sub-bacias a rotina “Archydro”, e para a obtenção das declividades, a ferramenta “Slope”, do próprio *software*. O MDE foi disponibilizado pelo projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2008), que realizou sucessivos refinamentos e correção de falhas dos dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), fornecidos pelo U.S. Geological Survey. A resolução da matriz de dados geoespaciais empregada foi de 30 metros. Algumas informações complementares como comprimento axial da bacia, desnível do rio de maior ordem e desnível máximo da bacia foram obtidas do MDE do SIG Google Earth.

Os cursos d’água foram classificados segundo a metodologia de Horton (1945), modificada por Strahler (1952; 1957; 1964). De forma sucinta, o método consiste em atribuir um número inteiro, de ordem, para cada trecho de curso d’água delimitado entre uma nascente e uma bifurcação ou entre duas bifurcações consecutivas. Os canais representados pelos segmentos que iniciam sua trajetória de escoamento de uma nascente são definidos como de primeira ordem. Os demais segmentos formados pela junção de dois trechos do curso d’água com a mesma ordem (ω) passam a ser classificados pelo primeiro número inteiro imediatamente superior ao dos trechos confluentes ($\omega + 1$). Quando segmentos do curso d’água de ordens diferentes se unem, o segmento formado a jusante corresponde ao de maior ordem entre eles. Por fim, a ordem da bacia (Ω) é dada pelo rio de maior ordem.

A Figura 1 ilustra os resultados gráficos obtidos para a estação Parque Tingui.

Pelas informações geoespaciais obtidas para as bacias hidrográficas, foram estimados os parâmetros enunciados no Quadro 2, propostos por Horton (1933; 1945), Miller (1953), Schumm (1956) e Strahler (1952; 1964; 1968) e utilizados por Kaliraj, Chandrasekar e Magesh (2015).

Todas as bacias foram classificadas considerando-se os critérios apresentados nos Quadros 3 e 4.

Na sequência, realizou-se uma análise de correlação entre os fatores morfométricos, com o intuito de identificar seus padrões de relação, com especial atenção ao parâmetro denominado coeficiente de rugosidade da bacia, pois possibilita a representação sintética da geometria espacial tridimensional da bacia hidrográfica. O método utilizado para tanto foi o do coeficiente de Spearman, que conforme Bauer (2007) é indicado para amostra cuja hipótese de normalidade bivariada não é confirmada, exigindo somente que as variáveis sejam medidas em escala ordinal. Para classificar os resultados, utilizaram-se os intervalos:

- $0 \leq \rho \leq 0,30$: correlação fraca;
- $0,30 < \rho \leq 0,50$: correlação moderada;
- $0,50 < \rho \leq 1$: correlação forte.

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando $\alpha = 5\%$. O teste de Shapiro-Wilk é, aparentemente, o melhor teste de aderência à normalidade, segundo Mesquita, Castelo Branco e Soares (2013). Shapiro e Wilk (1965) desenvolveram esse teste e mostraram que ele é eficiente para diferentes distribuições e tamanhos de amostras, quando comparado aos resultados de outros testes.

Por fim, com base nos resultados da análise de correlação, apresentou-se a proposição de dois novos indicadores representativos das características físicas das bacias, denominados indicador da declividade média dos rios e coeficiente de susceptibilidade de enchentes, obtidos pela adaptação conceitual dos parâmetros bibliográficos exibidos no Quadro 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme o Quadro 3, as bacias estudadas têm áreas de drenagem de aproximadamente 4 a 850 km² e ordens segundo a classificação de Strahler (1964) de

Quadro 1 - Bacias analisadas e sua localização.

Nome da bacia - código da estação	Nome do rio e localização
UFSC	Rio do Meio - Florianópolis (SC)
Piteu - 58217500	Ribeirão Palmital - Cachoeira Paulista (SP)
Itariri - 81580000	Rio do Azeite - Itariri (SP)
Vargem Grande - 65006055	Rio Palmital - Pinhais (PR)
Parque Tingui - 65019640	Rio Barigui - Curitiba (PR)
CGH Caju - 73331850	Rio Xanxerê - Xanxerê (SC)
Salto das Flores - 74400000	Rio das Flores - Paraíso (SC)
Mirim Doce - 83040000	Rio Taió - Mirim Doce (SC)
PCH José Barasul - 75188000	Rio Conceição - Ijuí (RS)
Guataparã Baixo - 74300000	Rio das Antas - Anchieta (SC)
PCH Fazenda Velha - 60710800	Rio Ariranha - Jataí (GO)
PCH Angelina - 84022000	Rio Tijucas - Angelina (SC)
Itapocu - 82350000	Rio Itoupava - Jaraguá do Sul (SC)
Ermo - 84949800	Rio Itoupava - Ermo (SC)

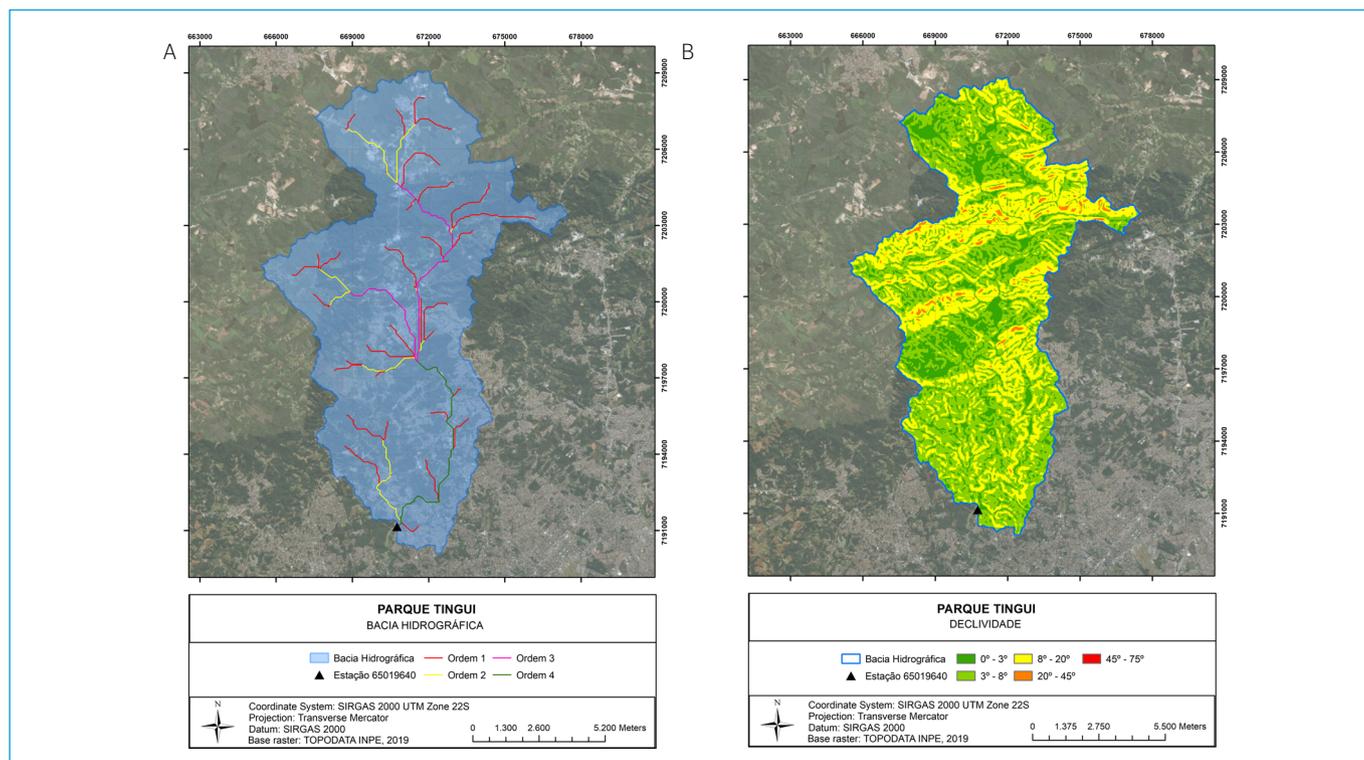


Figura 1 - Processamento das informações geoespaciais das bacias.

Quadro 2 - Resumo dos parâmetros morfométricos.

Nome / Equação	Descrição
Densidade de drenagem $D_D = \frac{\sum L_C}{A}$	É a razão entre o comprimento total dos canais ($\sum L_C$) e a área da bacia hidrográfica (A). Vilella e Mattos (1975) afirmam que os valores esperados variam de 0,5 km/km ² para bacias de drenagem pobre a 3,5 km/km ² ou mais para bacias excepcionalmente bem drenadas. Esse parâmetro está diretamente ligado à topografia e reflete a relação entre a forma da bacia e os processos de infiltração e do tempo de resposta à precipitação (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2015). Quanto menor a densidade de drenagem da bacia, mais alta é a taxa de infiltração, o que, por sua vez, aumenta a recarga das águas subterrâneas (KRISHNAMURTHY <i>et al.</i> , 2000). O inverso é válido no que tange à resposta de escoamento direto.
Densidade hidrográfica $D_H = \frac{N}{A}$	Representa a razão entre o número de canais (N) por unidade de área da bacia hidrográfica (A), segundo Christofletti (1974). Tem relação com a capacidade de ramificação dos cursos d'água.
Densidade de confluência $D_C = \frac{N_C}{A}$	É a razão entre o número de confluências ou bifurcações (N_C) e a área da bacia hidrográfica (A). Baixas densidades de confluências indicam bacias aluviais, enquanto valores altos de densidade significam estruturas de colinas (HORTON, 1933). Também existe relação direta entre a densidade de drenagem e a densidade de confluência (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2015).
Coefficiente de compacidade $K_C = \frac{P_B}{P_C}$	Consiste na relação entre o perímetro da bacia (P_B) e o perímetro de um círculo ($P_C = 2\sqrt{\pi A}$) da mesma área que a bacia hidrográfica. Conforme Carvalho e Silva (2006), seu valor é sempre maior que 1, e, quanto menor seu valor, menor é o tempo de concentração.
Fator de forma $K_F = \frac{L}{L_A}$	É a razão entre a largura média da bacia ($L = \frac{A}{L}$) e o comprimento do eixo da bacia ou comprimento axial (L) (da foz ao ponto mais longínquo da área). Carvalho e Silva (2006) destacam que, quanto menor for seu valor, menos suscetível a enchentes será a bacia.
Comprimento de escoamento superficial $L_G = \frac{1}{2D_D}$	É definido como a distância de escoamento superficial da água até atingir determinado canal (HORTON, 1945). Pode ser estimado como a metade do inverso da densidade de drenagem (D_D). Quanto menor for o comprimento de escoamento superficial, menor o tempo de concentração da bacia hidrográfica (IFABIYI, 2004).
Declividade da bacia $D_B = \frac{\sum D_P}{n}$	É a média aritmética das declividades entre cada <i>pixel</i> ($D_P = \frac{\Delta z}{L_P}$) do modelo digital de elevação, sendo estimada pela razão entre o desnível dos <i>pixels</i> adjacentes (Δz) e a sua resolução espacial (L_P). Essa característica representa a média da inclinação da superfície de drenagem da bacia até sua exutória. A declividade da bacia é um dos aspectos eficazes para avaliar as enchentes, e a velocidade do escoamento superficial aumenta à medida que a declividade aumenta (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2015).
Declividade axial $D_A = \frac{\Delta z}{L}$	Consiste na relação entre a diferença máxima de altitude da bacia (Δz) e o comprimento do eixo da bacia ou comprimento axial (L) (da foz ao ponto mais longínquo da área).
Coefficiente de sinuosidade dos cursos d'água $K_S = \frac{L_R}{L_T}$	É a relação entre o comprimento do rio principal (L_R) e o comprimento do talvegue do rio principal (L_T) medido em linha reta da nascente até a exutória. Tem relação com o controle de velocidade na bacia e com o tempo de concentração. Leopold e Wolman (1957) recomendam que bacias com valor K_S menor que 1,5 sejam consideradas de baixa sinuosidade e acima desse valor de alta sinuosidade.
Coefficiente de rugosidade da bacia hidrográfica $K_R = D_D \cdot \Delta z$	É o produto da diferença máxima de altitude da bacia (Δz) pela sua densidade de drenagem (D_D), tendo relação com a declividade média dos cursos d'água. Os valores de rugosidade elevados indicam bacias de declive mais íngremes, enquanto os valores de rugosidade baixos indicam bacias menos íngremes e menos influenciadas pelas estruturas geológicas (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2015).

Quadro 3 - Dados fisiográficos e morfométricos das bacias estudadas.

Parâmetros e unidades	UFSC	Piteu	Itairiri	Vargem Grande	Parque Tingui	CGH Caju	Salto das Flores	Mirim Doce	PCH José Barasuiol	PCH Fazenda Velha	Itapocu	PCH Angelina	Guataparã Baixo	Ermo
Características fisiográficas														
Área de bacia	A	3911	72,89	8805	10715	112,73	255,51	280,87	505,30	560,92	762,20	784,30	813,17	855,78
Perímetro	P _B	50,58	66,29	80,04	861	73,26	152,94	141,12	156,84	209,52	201,96	411,87	195,48	256,56
Comprimento dos rios	L _R	34,59	52,14	73,38	87,84	77,49	189,00	206,84	373,83	371,87	415,49	556,88	600,18	679,66
Comprimento axial	L	13,90	9,15	20,14	18,39	16,46	43,70	31,29	31,30	36,99	40,57	37,83	40,87	43,35
Número de confluências	N _C	40	16	29	37	33	79	78	158	55	112	215	238	225
Números de canais	N	56	14	33	51	41	100	105	209	210	153	279	304	300
Desnível máximo	Δ _Z	381	410	215	101	393	352	580	125	65	831	862	188	1210
Talvegue do rio de ordem Ω	L _T	0,30	9,84	11,91	6,80	7,67	15,90	24,30	7,98	7,75	15,75	3,52	14,76	4,88
Comprimento do rio de ordem Ω	L _M	0,30	10,74	15,54	9,49	8,57	28,71	30,35	14,23	9,04	27,34	5,78	36,69	8,98
Maior ordem	Ω	4	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6
Parâmetros morfométricos														
Densidade de drenagem	D _B	3,65	0,88	0,83	0,82	0,69	0,74	0,74	0,74	0,66	0,55	0,71	0,74	0,79
Densidade hidrográfica	D _H	12,99	0,36	0,37	0,48	0,36	0,39	0,37	0,41	0,37	0,20	0,36	0,37	0,35
Densidade da confluência	D _C	9,28	0,23	0,33	0,35	0,29	0,31	0,28	0,31	0,10	0,15	0,27	0,29	0,26
Coefficiente de compacidade	K _C	216	2,26	2,39	2,33	1,93	2,68	2,36	1,95	2,48	2,05	412	1,92	2,46
Fator de forma	K _F	0,46	0,20	0,22	0,32	0,42	0,13	0,29	0,52	0,41	0,46	0,55	0,49	0,46
Comprimento de escoamento superficial	L _C	0,14	0,57	0,60	0,61	0,72	0,68	0,68	0,68	0,76	0,91	0,70	0,68	0,63
Declividade da bacia	D _B	23,6	18,0	8,0	12,8	13,5	13,2	24,7	7,0	3,8	24,0	24,7	21,1	32,9
Declividade axial	D _A	12,5	2,9	1,1	0,5	2,4	0,8	1,9	0,4	0,2	2,0	2,3	0,5	2,8
Coefficiente de sinuosidade	K _S	103	109	130	140	112	1,81	1,25	1,78	1,17	1,74	1,64	2,49	1,84
Coefficiente de rugosidade	K _R	1392	363	179	83	270	260	427	92	43	453	612	139	961
Aplicação dos métodos propostos nas bacias hidrográficas														
Parâmetros e unidades	UFSC	Piteu	Itairiri	Vargem Grande	Parque Tingui	CGH Caju	Salto das Flores	Mirim Doce	PCH José Barasuiol	PCH Fazenda Velha	Itapocu	PCH Angelina	Guataparã Baixo	Ermo
Indicador da declividade média dos rios	D _R	12,5	2,7	0,8	0,4	2,1	0,4	1,5	0,2	0,2	1,2	1,4	0,2	1,5
Coefficiente de susceptibilidade de enchente	K _{SE}	456	2,6	0,9	0,5	1,7	0,6	1,4	0,3	0,1	1,1	0,3	1,6	2,2

Quadro 4 – Classificação morfométrica das bacias estudadas.

Parâmetros e critério	UFSC	Piteu	Itariri	Vargem Grande	Parque Tingui	CGH Cajú	Salto das Flores	Mirim Doce	PCH José Barasul	PCH Fazenda Velha	Itapocu	PCH Angelina	Guataparã Baixo	Ermo
D_0	Muito alta	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
D_H	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
D_C	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
K_C	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
K_F	Baixo	Baixo	Alta	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo
L_0	Muito bem drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada	Mediamente drenada
D_B	Fortemente ondulado	Ondulado	Fortemente ondulado	Ondulado	Ondulado	Ondulado	Ondulado	Fortemente ondulado	Suavemente ondulado	Suavemente ondulado	Fortemente ondulado	Fortemente ondulado	Fortemente ondulado	Fortemente ondulado
D_A	Montanhoso	Moderadamente inclinado	Montanhoso	Inclinado	Suavemente inclinado	Moderadamente inclinado	Suavemente inclinado	Inclinado	Plano	Plano	Moderadamente inclinado	Moderadamente inclinado	Suavemente inclinado	Moderadamente inclinado
K_S	Retilíneo	Retilíneo	Retilíneo	Sinusoidal média	Sinusoidal média	Retilíneo	Sinusoidal média	Sinusoidal média	Sinusoidal média	Retilíneo	Sinusoidal média	Sinusoidal média	Sinusoidal elevada	Sinusoidal média
K_R	Muito suscetível	Regular	Regular	Pouco suscetível	Pouco suscetível	Pouco suscetível	Pouco suscetível	Regular	Pouco suscetível	Pouco suscetível	Regular	Regular	Pouco suscetível	Suscetível
D_R	Fortemente inclinado	Moderadamente inclinado	Fortemente inclinado	Suavemente inclinado	Pouco inclinado	Inclinado	Pouco inclinado	Inclinado	Pouco inclinado	Pouco inclinado	Inclinado	Inclinado	Pouco inclinado	Inclinado
K_{SE}	Muito alto	Alta	Alta	Baixo	Baixo	Regular	Baixo	Regular	Baixo	Baixo	Regular	Baixo	Regular	Alto

3 a 6, sendo consideradas de pequeno a médio porte. No Quadro 4 são apresentadas as classificações de cada bacia hidrográfica, de acordo com os critérios de classificação existentes ou propostos neste estudo.

A densidade de drenagem variou entre 0,5 e 0,9 km/km², sendo as bacias consideradas de drenagem regular, segundo Beltrame (1994). Excetua-se à bacia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que apresentou densidade de drenagem muito alta, o que pode potencializar a chance de ocorrência de picos de cheia e a redução do tempo de concentração. Comportamento semelhante foi observado para a densidade hidrográfica, de modo que, segundo a escala proposta por Lollo (1995), todas as bacias são enquadradas como de baixa densidade hidrográfica, com exceção da bacia da UFSC, classificada como de alta densidade hidrográfica. Naturalmente, isso confirma a expectativa de ocorrência de eventos de enchente extremos na bacia da UFSC.

Verificou-se também significativa diferença entre os resultados da densidade de confluência para a bacia da UFSC em relação às demais. Observou-se que o número de confluência por área de drenagem é maior quanto mais bem drenada é a bacia hidrográfica, o que é justificado pela maior fragmentação da área de drenagem dos diversos cursos d'água, dessa forma auxiliando o processo de escoamento das águas superficiais na bacia.

Pode-se constatar, na Figura 2, forte correlação positiva entre os parâmetros densidade de drenagem (D_p), densidade hidrográfica (D_H) e densidade de confluência (D_c), haja vista que representam as mesmas características fisiográficas da bacia. Com base nisso e não existindo uma escala referencial de classificação para a densidade de confluência, adotou-se a mesma escala de classificação utilizada para a densidade hidrográfica, proposta por Lollo (1995).

Analisando a forma das bacias hidrográficas, pode-se encontrar homogeneidade no fator de compacidade (K_c) das bacias estudadas, excetuando-se a PCH Angelina, que apresentou coeficiente de compacidade duas vezes maior que as demais. Segundo os critérios de Gravélius, nenhuma bacia apresenta risco de ocorrências de enxurradas repentinas, pois as distribuições espaciais de suas áreas de drenagem são pouco concentradas. Para Singh, Cui e Byrd (2014), bacias com geometria irregular permitem maior distribuição do deflúvio, resultando no aumento do tempo de concentração, o que sugere menor concentração das vazões de escoamento superficial direto. Portanto, esse índice

auxilia na descrição da relação espaço-tempo do escoamento superficial direto da bacia, sendo relevante na descrição do processo hidráulico o escoamento superficial da bacia hidrográfica.

O fator de forma conceitualmente tem relação direta com a ocorrência de chuvas intensas em toda a extensão da bacia, sendo esse fenômeno menos provável quanto mais alongadas forem as bacias hidrográficas (LORENZON; DIAS; TONELLO, 2015). Os resultados encontrados para o fator de forma (K_p) indicam que todas as bacias estudadas possuem predominância de formato alongado, sendo as bacias com maior susceptibilidade de enchentes, segundo esse critério, Itariri, PCH José Barasuol e PCH Angelina. O coeficiente de forma, apesar de também apresentar correlação moderada com os demais parâmetros, mostrou-se mais significativo que o coeficiente de compacidade, para descrição física da bacia.

O comprimento de escoamento superficial (L_c) tem relação direta com o tempo de concentração da bacia hidrográfica, podendo, quando associado à velocidade média do escoamento superficial direto, auxiliar em sua estimativa. O comprimento de escoamento superficial apresentou correlação inversa forte com a densidade de drenagem e densidade de confluência e moderada com a densidade hidrográfica. Apresentou também correlação positiva moderada com o coeficiente de forma. Portanto, tem bom potencial para representar sinteticamente as características planas e de capacidade de drenagem da bacia hidrográfica. Para sua classificação, apresenta-se uma proposta no Quadro 4, elaborada com base na compacidade da bacia.

Com base no princípio de que o escoamento superficial se processa de duas formas bem distintas (nas superfícies ou vertentes da bacia e nos cursos d'água), há a necessidade de se conhecer o comportamento médio da declividade para ambas as trajetórias hidráulicas. A declividade da bacia pode ser facilmente estimada pelos processos de tratamento dos dados geoespaciais, por meio de rotinas já difundidas na maioria dos *softwares* de GIS. Logo, conforme o critério da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 1979), as bacias foram classificadas desde suavemente a fortemente onduladas, havendo a predominância de bacias com relevo ondulado a fortemente ondulado. A declividade da bacia (D_b) apresentou correlação positiva forte e moderada com declividade axial, coeficiente rugosidade da bacia e fator de forma, e correlação inversa também forte e moderada com a densidade hidrográfica e densidade de confluência.

A estimativa da declividade média dos rios pelo MDE, nos *softwares* GIS, ainda apresenta certa dificuldade operacional, sendo necessárias várias rotinas, que resultam em estimativas com alto grau de incerteza. Logo, sua estimativa geralmente é baseada em métodos de medição gráfica manual, que, além de demandar esforço operacional elevado, representam fontes de erros e incertezas, principalmente relacionadas à reprodutibilidade do processo.

Com o intuito de corroborar nesse sentido, propôs-se a utilização de um indicador indireto para caracterização da declividade média global dos rios da bacia. Combinando os parâmetros morfométricos declividade axial (D_A) e coeficiente de sinuosidade (K_S), conforme a Equação 1, obteve-se o *indicador da declividade média dos rios* (D_R), posteriormente classificado pelos critérios exibidos no Quadro 4.

$$D_R = \frac{D_A}{K_S} \quad (1)$$

Onde:

D_R : indicador da declividade média dos rios (%);

D_A : declividade axial (%);

K_S : coeficiente de sinuosidade (adimensional).

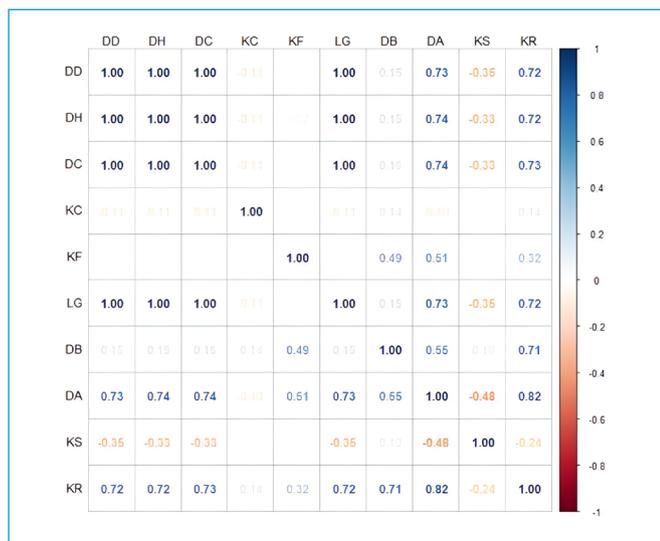


Figura 2 - Coeficiente de correção de Spearman.

A declividade axial da bacia pode ser enunciada como a relação entre a diferença de altitude da bacia e o comprimento do seu eixo predominante, sendo fortemente correlacionada com os parâmetros geométricos tridimensionais e com a declividade da bacia. Também se identificou que a declividade axial apresentou valores na ordem de 20% da declividade das bacias estudadas. A declividade axial (D_A) teve correlação negativa forte com o coeficiente sinuosidade dos cursos d'água e moderada com a densidade hidrográfica. Ainda, apresentou correlação positiva forte com o coeficiente de rugosidade da bacia.

Conforme Souza et al. (2017), o coeficiente de sinuosidade (K_s) varia entre 1 e 2, sendo 1 o indicativo de canais retilíneos, ao passo que valores próximos a 2 indicam sinuosidade elevada dos canais. As bacias hidrográficas UFSC e Piteu são as que apresentaram maior retilineidade nos canais, enquanto as bacias com cursos d'água mais sinuosos foram Salto das Flores, PCH José Barasuol, Itapocu, PCH Angelina e Ermo. A bacia hidrográfica Guataparã Baixo  a de maior sinuosidade.

O coeficiente de correlao entre a declividade axial (D_A) e o indicador da declividade dos rios (D_R) foi de $\rho = 0,96$, corroborando com a hipótese de que a declividade axial associada ao coeficiente de sinuosidade pode representar satisfatoriamente a declividade média global dos rios da bacia hidrográfica.

Os resultados aplicados às bacias estudadas estão no Quadro 4. Dessa forma, podem-se classificar as bacias da UFSC e Itariri como fortemente inclinadas, sendo elas de baixa sinuosidade e alta declividade. Por outro lado, as bacias do Parque Tingui, Salto das Flores, PCH José Barasuol, PCH Fazenda Velha e Guataparã Baixo possuem cursos d'água bastante sinuosos e declividade axial baixa, sendo classificadas como pouco inclinadas. As demais bacias apresentam declividade média dos cursos d'água na casa de 2%. De maneira sntica, percebe-se que a relao espaço-tempo do escoamento direto na bacia pode ser descrita por quatro características principais, descritas no Quadro 5, e a juno das três primeiras características possibilita descrever indiretamente a forma tridimensional da bacia.

Portanto, o coeficiente de rugosidade da bacia  um parâmetro de representao tridimensional da bacia hidrográfica, permitindo associar várias informaçoes que regem o comportamento do escoamento direto. Conforme a Figura 2, este apresentou correlao moderada e forte com vários parâmetros, exceto com densidade de drenagem, densidade de confluência, coeficiente de compacidade, comprimento do escoamento superficial e coeficiente de sinuosidade. Cabe ressaltar que a associao do coeficiente de sinuosidade com a

declividade axial, conforme a Equao 1, apresenta correlao composta forte com o coeficiente de rugosidade da bacia ($\rho = 0,83$).

De modo geral, quanto maior o coeficiente de rugosidade da bacia, maior  sua declividade e melhor  sua condio de drenagem. Também  mais suscetível a eventos simultâneos de precipitao na bacia, ou seja, maior  o potencial para eventos extremos de vazão máxima. Nessa lógica, cruzando-se os crterios de classificao dos parâmetros, puderam-se propor os intervalos de classificao apontados no Quadro 4. Portanto, a bacia da UFSC  considerada muito suscetível, e a bacia Ermo, suscetível a eventos de enchente. As demais bacias são consideradas regulares e pouco suscetíveis a esse tipo de eventos.

Avaliando a formulao do coeficiente de rugosidade da bacia, pôde-se propor o refinamento de sua representao, pela substituio do parâmetro de desnível altimétrico máximo pela declividade axial da bacia. Na Figura 3, verifica-se a existência de relao geométrica entre a declividade axial e o coeficiente de rugosidade da bacia, com $R^2 = 0,80$, ajustado a um modelo de regressão não linear.

Com base nesse comportamento, foi possível propor o coeficiente de susceptibilidade de enchentes, estimado pela Equao 2, com a classificao apresentada no Quadro 4, refinando dessa forma a descrio da geometria tridimensional da bacia.

$$K_{SE} = D_D \cdot D_A = \frac{\sum L_C}{A} \cdot \frac{\Delta Z}{L} \cdot 100 \tag{2}$$

Em que:

K_{SE} : coeficiente de susceptibilidade de enchentes (%.km/km²);

D_D : densidade de drenagem (km/km²);

D_A : declividade axial (%);

A: rea de drenagem (km²);

$\sum L_C$: comprimento dos rios da bacia (km);

L: comprimento axial (m);

ΔZ : desnível altimétrico máximo (m).

O coeficiente proposto tem relao com a forma da bacia (A e L), fornecendo um indicativo da sinuosidade de seus cursos d'água, compacidade e potencial drenante da bacia ($\sum L_C$, L e A), bem como de sua declividade (ΔZ , L).

Quadro 5 - Grandezas fundamentais do escoamento direto.

Grandezas	Descrio
Declividade	A declividade tanto dos rios como da própria bacia influencia o comportamento do escoamento superficial direto.
Distância a ser percorrida pelo escoamento	A distância percorrida pelo escoamento nas vertentes e nos rios está relacionada  compacidade e  forma da bacia.
Forma da bacia	Indica a probabilidade de ocorrência de eventos de precipitao simultâneos na bacia, mas também denota sua compacidade.
Resistência ao escoamento	A rugosidade das vertentes e dos canais (rios) pode ser relacionada ao uso do solo. Naturalmente, essa característica influencia a velocidade e a magnitude do escoamento direto.

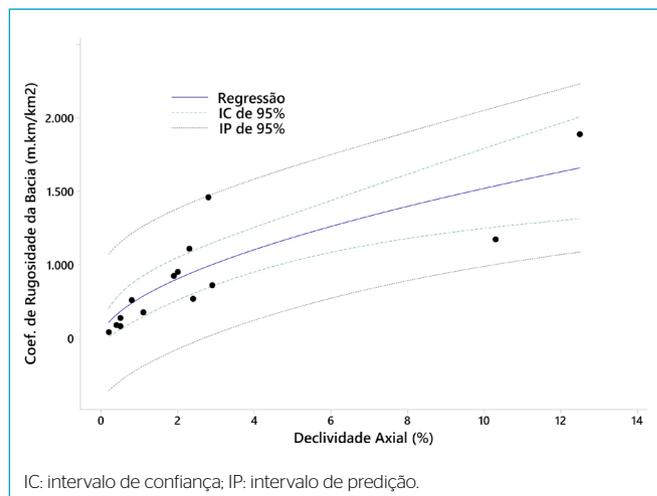


Figura 3 - Relao entre declividade axial e coeficiente de rugosidade.

Convém ressaltar a importância do comprimento axial no método proposto, sendo o parâmetro de escala. Analisando os resultados da análise de correlação da Figura 2, fica claro que o coeficiente de susceptibilidade de enchentes representa satisfatoriamente as características físicas da bacia, pois não apresenta correlação somente com dois parâmetros (coeficiente de forma e densidade de confluência).

Fisicamente o coeficiente de susceptibilidade representa também a magnitude do tempo de concentração da bacia. Quanto maior o coeficiente, menor o tempo de concentração esperado para bacias com características físicas semelhantes. Analisando os resultados obtidos pela aplicação do método proposto, de acordo com o Quadro 4, constatou-se coerência com os demais parâmetros morfométricos, no entanto com um grau de refinamento na classificação de risco. Verificou-se que a bacia da UFSC ainda é considerada de risco muito alto à ocorrência de enchentes. Por outro lado, uma análise mais refinada da condição de declividade das bacias leva a classificar três bacias com risco alto, especificamente as bacias Piteu, Itariri e Ermo. Também, incluíram-se as bacias Vargem Grande, CGH Caju, Mirim Doce e Guataparã Baixo na lista de risco regular.

Na prática, os resultados expressam uma previsão do comportamento do hidrograma de cheias (sua forma e escala), e a frequência da ocorrência de eventos extremos é função do comportamento probabilístico dos eventos hidrológicos de precipitação.

CONCLUSÃO

Em que pese a complexidade dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas, a previsão do comportamento do escoamento direto passa entre outros fatores pela caracterização geométrica das bacias. A interação entre suas diversas características físicas e destas com o escoamento superficial direto é tema de diversos estudos, com abordagens distintas.

Todavia, percebe-se que as incertezas associadas aos processos de estimação dos parâmetros dos modelos podem ser muito relevantes para a qualidade dos resultados. Com base nisso, entende-se que a busca por métodos mais parcimoniosos, com menos e mais representativos parâmetros de entrada, pode possibilitar, para fins práticos de aplicação, resultados satisfatórios e com maior aplicabilidade.

No que tange às bacias estudadas, puderam-se identificar as variações mais significativas no que diz respeito à forma e às condições de drenagem para a bacia da UFSC; esta, do ponto de vista morfométrico, é a mais suscetível à ocorrência de enchentes. Também merecem destaque as bacias Itariri, Piteu e Ermo, que apresentam risco elevado, relacionado à sua declividade e à estrutura dendrítica

de seu sistema de drenagem. Portanto, pôde-se identificar relação significativa entre os fatores morfológicos das bacias e seu possível comportamento diante da ocorrência de vazões extremas.

Na análise de correlação entre os fatores morfométricos, foi possível identificar forte relação entre o fator de forma e os parâmetros relacionados às características da rede de drenagem da bacia (densidade de drenagem, densidade hidrográfica, densidade de confluência e comprimento de escoamento superficial). Por causa das possibilidades apresentadas pelos *softwares* de geoprocessamento, entende-se como mais favorável a aplicação do parâmetro da densidade de drenagem, para representar essa classe de características bidimensionais.

O coeficiente de compacidade não apresentou correlação significativa com nenhum dos parâmetros morfométricos estudados, sendo pouco representativo para descrever as características físicas da bacia hidrográfica.

Avaliando o comportamento dos parâmetros morfométricos na dimensão altimétrica, pôde-se perceber que a declividade axial apresenta relação com os parâmetros da forma tridimensional e da rede de canais da bacia.

O coeficiente de sinuosidade dos cursos d'água da bacia apresentou baixa correlação com os demais parâmetros, no entanto, quando associado à declividade axial, passa a apresentar correlação significativa com a declividade média dos cursos d'água. A declividade axial isoladamente apresentou boa correlação com a declividade média da bacia. Neste trabalho foi possível propor critérios para classificá-la, adaptados em função do método Embrapa (1979).

De todos os parâmetros morfométricos estudados, pode-se destacar como o mais representativo das características físicas das bacias o coeficiente de rugosidade da bacia desde a sua correlação com todos os demais parâmetros, exceto os dos coeficientes de sinuosidade e de compacidade. Com base nisso, foi possível propor um método de classificação.

De modo complementar, o presente estudo apresenta uma contribuição ao método do coeficiente de rugosidade da bacia, incorporando a declividade axial na sua formulação. Como resultados, conseguiu-se propor um indicador que representa indiretamente a forma e a declividade da bacia, bem como a sinuosidade dos cursos d'água. Os resultados encontrados para as bacias estudadas foram satisfatórios, podendo auxiliar em metodologias de classificação de riscos de desastres.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Negri, R.: Conceituação, Curadoria de Dados, Metodologia, Escrita — Primeira Redação. Fill, H.: Validação, Escrita — Revisão.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, C.S. Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district, U. P. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 26, n. 4, p. 169-175, 1998. <https://doi.org/10.1007/BF02990795>
- AL-GHAMDI, K.A.; ELZAHARY, R.A.; MIRZA, M.N.; DAWOD, G.M. Impacts of urban growth on flood hazards in Makkah City, Saudi Arabia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, v. 4, n. 2, p. 23-34, 2012. <https://doi.org/10.5897/IJWREE11128>
- AL SAUD, M. Assessment of flood hazard of Jeddah area 2009. Saudi Arabia. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 2, n. 9, p. 839-847, 2010. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.29099>
- BAJRACHARYA, P.; JAIN, S. Estimation of watershed width function: a statistical approach using LiDAR data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 34, n. 10, p. 1997-2011, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01846-5>

- BASIHY, G.; MASOUD, M.; BAJABAA, S.; ZAIDY, S. *Hydrologic atlas for of Makkah Al-Mokramah region*. Jeddah: Water Research Center, King Abdulaziz University, 2017.
- BAUER, L. *Estimação do Coeficiente de Correlação de Spearman Ponderado*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2007.
- BELTRAME, A.V. *Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação*. Florianópolis: UFSC, 1994. 112 p.
- BIRON, P.M.; CHONÉ, G.; BUFFIN-BÉLANGER, T.; DEMERS, S.; OLSEN, T. Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, n. 15, p. 1808-1821, 2013. <https://doi.org/10.1002/esp.3425>
- BISHT, S.; CHAUDHRY, S.; SHARMA, S.; SONI, S. Assessment of flash flood hazard zonation through geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 12, p. 35-47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.09.001>
- CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. *Hidrologia*. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006.
- CHAVAN, V.T.; GADGE, P.S. Morphometric analysis of Junana Mini Watershed Nandgoan (Kh.), Dist. Amravati, Maharashtra using GIS. *International Journal of Science, Environment and Technology*, v. 2, n. 5, p. 1072-1079, 2013.
- CHOPRA, R.; DHIMAN, R.D.; SHARMA, P.K. Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 33, n. 4, p. 531-539, 2005. <https://doi.org/10.1007/BF02990738>
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blucher e EDUSP, 1974.
- DAR, R.A.; CHANDRA, R.; ROMSHOO, S.A. Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India. *Journal of Mountain Science*, v. 10, n. 1, p. 731-741, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2494->
- DAWOD, G.M.; MIRZA, M.N.; KHALID, A.; AL-GHAMDI, K.A. GIS-based spatial mapping of flash flood hazard in Makkah City, Saudi Arabia. *Journal of Geographic Information Systems*, v. 3, n. 3, p. 217-223, 2011. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.33019>
- DEGETTO, M.; GREGORETTI, C.; BERNARD, M. Comparative analysis of differences between using LiDAR and contour-based DEMs for hydrological modeling of runoff generating debris flows in the Dolomites. *Frontiers in Earth Science*, v. 3, n. 21, 2015. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00021>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Súmula da 10*. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979.
- EZE, E. B.; JOEL, E. Parâmetros morfométricos da bacia do rio Calabar: implicações para os processos hidrológicos. *Journal of Geography and Geology*, v. 2, n. 1, p. 19-26, 2010.
- GEENA, G.B.; BALLUKRAYA, P.N. Morphometric analysis of Korattalayar River Basin, Tamil Nadu, India: a GIS approach. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, v. 2, n. 2, p. 383-391, 2011.
- 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, n. 1, p. 10-19, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.002>
- HAMDAN, A.; KHOZYEM, H. Análise morfométrica, estatística e de risco usando dados ASTER e técnica GIS da bacia hidrográfica WADI El-Mathula, Qena, Egito. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 11, n. 22, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4068-3>
- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56<275:EDOSAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56<275:EDOSAT>2.0.CO;2)
- HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 14, n. 1, p. 446-460, 1933. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- IFABIYI, I.P. A reduced rank model of drainage basin response to runoff in Upper Kaduna catchment of Northern Nigeria. *Geo-Studies Forum*, v. 2, n. 1, p. 109-117, 2004.
- JAIN, V.; SINHA, R. Derivation of Unit Hydrograph From GIUH Analysis For A Himalayan River. *Water Resources Management*, v. 17, n. 5, p. 355-375, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1025884903120>
- KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N.S. Morphometric analysis of the River Thamirabarani sub-basin in Kanyakumari District, South west coast of Tamil Nadu, India, using remote sensing and GIS. *Environmental Earth Science*, v. 73, p. 7375-7401, 2015. <https://doi.org/10.1007/x12665-014-3914-1>
- KALIRAJ, S.; MEENAKSHI, S.M.; MALAR, V.K. Application of Remote sensing in Forest cover change detection using Geo statistical change detection matrices – A case study in Devampatti RF, Tamil Nadu. *Nature Environment & Pollution Technology*, v. 11, n. 2, p. 261-269, 2012.
- KOULI, M.; VALLIANATOS, F.; SOUPIO, P.; ALEXAKIS, D. GIS-based morphometric analysis of major watersheds, Western Crete, Greece. *Journal of Environmental Hydrology*, v. 15, n. 1, p. 1-17, 2007.
- KRISHNAMURTHY, J.; MANI, A.; JAYARAMAN, V.; MANIVEL, M. Groundwater resources development in hard rock terrain—an approach using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 2, n. 3-4, p. 204-215, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85015-1](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85015-1)
- KUMAR, R.; KUMAR, S.; LOHNI, A.K.; NEEMA, R.K.; SINGH, A.D. Evaluation of geomorphological characteristics of a catchment using GIS. *GIS India*, v. 9, p. 13-17, 2000.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G. River channel patterns: braided, meandering, and straight. *US Geological Survey Professional Paper 282-B*, 1957.
- LIU, X.; ZHANG, Z. Drainage network extraction using LiDAR derived DEM in volcanic plains. *Area*, v. 43, n. 1, p. 42-52, 2011.
- LOLLO, J.A. *O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração do mapeamento geotécnico: sistematização e aplicação na quadrícula de Campinas*. 1995. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

- LORENZON, A.S.; DIAS, H.C.; TONELLO, K.C. Escoamento superficial da água da chuva em um fragmento florestal de Mata Atlântica, Viçosa-MG. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 5, n. 1, p. 50-58, 2015. <https://doi.org/10.21206/rbas.v5i1.316>
- MAGESH, N.S.; CHANDRASEKAR, N. Avaliação morfométrica baseada em modelo GIS da sub-bacia de Tamiraparani, distrito de Tirunelveli, Tamil Nadu, Índia. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 7, p. 131-141, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0742-z>
- MAGESH, N.S.; CHANDRASEKAR, N.; KALIRAJ, S. Uma ferramenta de extração automatizada baseada em GIS para a análise de morfometria de bacia. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, v. 2, n. 1, p. 32-35, 2012.
- MESA, L.M. Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucuman, Argentina). *Environmental Geology*, v. 50, n. 8, p. 1235-1242, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0297-y>
- MESQUITA, M.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. *Transportes*, v. 21, n. 1, p. 59-66, 2013. <https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.566>
- MILLER, V.C. *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics on the Clinch Mountain area*. Virginia and Tennessee, project NR, vol Tech Rep 3. Nova York: Columbia University, Department of Geology, 1953.
- MOUSSA, R. On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 1, p. 33-58, 2003. <https://doi.org/10.1002/hyp.1114>
- NAG, S.K. Morphometric analysis using remote sensing techniques in the Chaka subbasin Purulia district West Bengal. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 26, n. 1-2, p. 69-76, 1998. <https://doi.org/10.1007/BF03007341>
- NARENDRA, K.; NAGESWARA, R.K. Morphometry of the Meghadrigedda watershed, Visakhapatnam district, Andhra Pradesh using GIS and Resourcesat data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 34, n. 2, p. 101-110, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02991815>
- NAUTIYAL, M.D. Morphometric analysis of a drainage basin, district Dehradun, Uttar Pradesh. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 22, n. 4, p. 251-261, 1994. <https://doi.org/10.1007/BF03026526>
- OBI REDDY, G.P.; MAJI, A.K.; GAJBHIYE, K.S. GIS for morphometric analysis of drainage basins. *GIS India*, v. 11, p. 9-14, 2002.
- OKOKO, E.E.; OLUJJINMI, J.A.B. The role of geomorphic features in urban flooding: the case of Ala River in Akure, Nigeria. *International Journal of Environmental Issues*, v. 1, n. 1, p. 192-201, 2003.
- PARETA, K.; PARETA, U. Quantitative geomorphological analysis of a watershed of a Ravi River Basin, H.P. India. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, v. 1, n. 1, p. 41-56, 2012.
- RAWAT, K.S.; MISHRA, A.K. Evaluation of relief aspects morphometric parameters derived from different sources of DEMs and its effects over time of concentration of runoff (TC). *Earth Science Informatics*, v. 9, n. 4, p. 409-424, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0261-7>
- RAWAT, K.S.; MISHRA, A.K.; TRIPATHI, V.K. Hydro-morphometrical analyses of sub-himalyan region in relation to small hydro-electric power. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 6, n. 8, p. 2889-2899, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0586-6>
- RIGON, R.; BANCHERI, M.; FORMETTA, G.; DE LAVENNE, A. The geomorphological unit hydrograph from a historical-critical perspective. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 41, n. 1, p. 27-37, 2016. <https://doi.org/10.1002/esp.3855>
- ROMSHOO, S.A.; BHAT, S.A.; RASHID, I. Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin. *Journal of Earth System Science*, v. 121, n. 3, p. 659-686, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0192-8>
- SAHOO, R.; JAIN, V. Sensitivity of drainage morphometry based hydrological response (GIUH) of a river basin to the spatial resolution of DEM data. *Computers & Geoscience*, v. 111, n. 268, p. 78-86, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.001>
- SANTOS, G.O.; HERNANDEZ, F.B.T. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê, Ilha Solteira, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 60-68, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100009>
- SANTOS, G.O.; SILVA, A.A.; BRAZ, A.R.C.; CARNEIRO, F.M. Morphometric characterization of hydrographic bodies inserted in the Municipality of Rio Verde, Goiás, as a tool for urban and agricultural planning. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 22, n. 17, p. e17, 2018.
- SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.O.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.O.CO;2)
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika Trust*, v. 52, n. 3-4, p. 591-609, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- SINGH, V.P.; CUI, H.; BYRD, A. Sediment Graphs Based on Entropy Theory. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 20, n. 6, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001068](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001068)
- SONI, S. Assessment of morphometric characteristics of Chakrar Watershed in Madhya Pradesh, India using geospatial technique. *Applied Water Science*, v. 7, n. 5, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>
- SONI, S.K.; TRIPATHI, S.; MAURYA, A.K. GIS based morphometric characterization of mini-watershed—Rachhar Nala of Anuppur District Madhya Pradesh. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Research*, v. 3, n. 3, p. 32-38, 2013.
- SOUZA, C.F.; PERTILLE, C.T.; CORRÊA, B.J.S.; VIEIRA, F.S. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Ivaí-Paraná. *Geoambiente Online*, n. 29, p. 93-110, 2017. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i29.50602>
- STRAHLER, A.N. Dynamics basis of geomorphology. *GSA Bulletin*, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.O.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.O.CO;2)
- STRAHLER, A.N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957. <https://doi.org/10.1029/TRO38i006p00913>
- STRAHLER, A.N. Quantitative geomorphology. In: FAIRBRIDGE, R.W. (org.). *The encyclopedia of geomorphology*. Nova York: Reinhold Book Corp, 1968.

STRAHLER, A.N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V.T. (org.). *Handbook of applied hydrology*. Nova York: McGraw Hill Book Company, 1964. p. 4-11.

TRIPATHI, S.; SONI, S.K.; MAURYA, A.K. Morphometric characterization and prioritization of sub-watershed of Seoni River in Madhya Pradesh through remote sensing and GIS technique. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience*, v. 2, n. 3, p. 46-54, 2013.

VANDANA, M. Morphometric analysis and watershed prioritization: a case study of Kabani River Basin, Wayanad District, Kerala, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, v. 42, n. 2, p. 211-222, 2013.

VILELLA, S.M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1975.

VITTALA, S.S.; GOVINDAIAH, S.; HONNE GOWDA, H. Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada Area of Tumkur District, South India using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 32, n. 4, p. 351-362, 2004. <https://doi.org/10.1007/BF03030860>

WU, Q.; LANE, C.R. Delineating wetland catchments and modeling hydrologic connectivity using LiDAR data and aerial imagery. *Hydrological and Earth System Sciences*, v. 21, n. 7, p. 3579-3595, 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3579-2017>

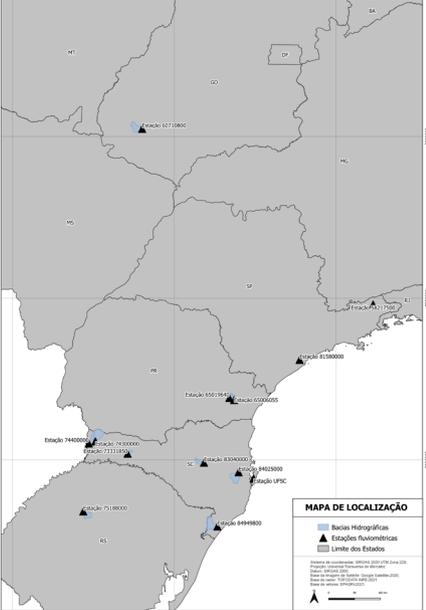
YANG, P.; AMES, D.P.; FONSECA, A.; ANDERSON, D.; SHRESTHA, R.; GLENN, N.F.; CAO, Y. What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results? *Environmental Modelling and Software*, v. 58, p. 48-57, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.005>

Errata

No manuscrito “Caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras: proposição do indicador da declividade média dos rios e do coeficiente de suscetibilidade de enchentes”, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220194>, publicado no periódico Eng Sanit Ambient., 2023, v. 28, e2022194

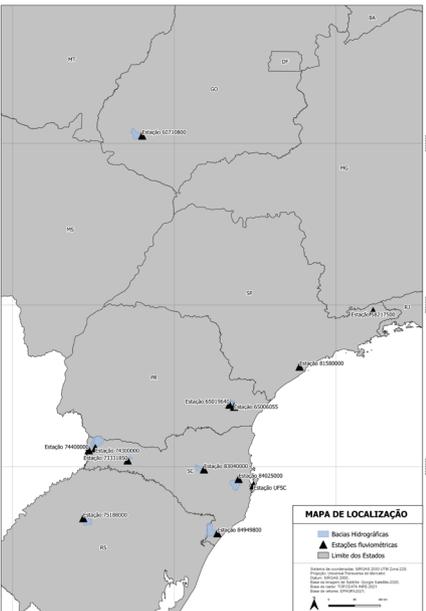
Onde se lê:

Quadro 1 - Bacias analisadas e sua localização.

	Nome da bacia - código da estação	Nome do rio e localização
	UFSC	Rio do Meio - Florianópolis (SC)
	Piteu - 58217500	Ribeirão Palmital - Cachoeira Paulista (SP)
	Itariri - 81580000	Rio do Azeite - Itariri (SP)
	Vargem Grande - 65006055	Rio Palmital - Pinhais (PR)
	Parque Tingui - 65019640	Rio Barigui - Curitiba (PR)
	CGH Caju - 73331850	Rio Xanxerê - Xanxerê (SC)
	Salto das Flores - 74400000	Rio das Flores - Paraíso (SC)
	Mirim Doce - 83040000	Rio Taió - Mirim Doce (SC)
	PCH José Barasuol - 75188000	Rio Conceição - Ijuí (RS)
	Guataparã Baixo - 74300000	Rio das Antas - Anchieta (SC)
	PCH Fazenda Velha - 60710800	Rio Ariranha - Jataí (GO)
	PCH Angelina - 84022000	Rio Tijucas - Angelina (SC)
	Itapocu - 82350000	Rio Itoupava - Jaraguá do Sul (SC)
	Ermo - 84949800	Rio Itoupava - Ermo (SC)

Lê-se:

Quadro 1 - Bacias analisadas e sua localização.

	Nome da bacia - código da estação	Nome do rio e localização
	UFSC	Rio do Meio - Florianópolis (SC)
	Piteu - 58217500	Ribeirão Palmital - Cachoeira Paulista (SP)
	Itariri - 81580000	Rio do Azeite - Itariri (SP)
	Vargem Grande - 65006055	Rio Palmital - Pinhais (PR)
	Parque Tingui - 65019640	Rio Barigui - Curitiba (PR)
	CGH Caju - 73331850	Rio Xanxerê - Xanxerê (SC)
	Salto das Flores - 74400000	Rio das Flores - Paraíso (SC)
	Mirim Doce - 83040000	Rio Taió - Mirim Doce (SC)
	PCH José Barasuol - 75188000	Rio Conceição - Ijuí (RS)
	Guataparã Baixo - 74300000	Rio das Antas - Anchieta (SC)
	PCH Fazenda Velha - 60710800	Rio Ariranha - Jataí (GO)
	PCH Angelina - 84022000	Rio Tijucas - Angelina (SC)
	Itapocu - 82350000	Rio Itoupava - Jaraguá do Sul (SC)
	Ermo - 84949800	Rio Itoupava - Ermo (SC)