



Subsídios dos indicadores morfométricos na gestão territorial

Subsidies of morphometric indicators in territorial management

L. T. Arantes^{1*}; D. C. C. Silva²; R. W. Lourenço²

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 18087-180, Sorocaba-SP, Brasil

²Departamentode Engenharia Ambiental, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 18087-180, Sorocaba-SP

*letondato@gmail.com

(Recebido em 27 de outubro de 2021; aceito em 20 de novembro de 2022)

O estudo acerca da morfometria de bacias hidrográficas fornece informações importantes para o entendimento da dinâmica ambiental e dados que corroboram com o monitoramento e gestão territorial. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo a obtenção e espacialização de cinco parâmetros morfométricos e de conflito de uso do solo visando obter um índice que forneça subsídios que contribuam para o ordenamento territorial. Para tanto, utilizou-se técnicas de geoprocessamento para a elaboração de um índice morfométrico geral para as sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabaçu, por meio da integração de dos parâmetros morfométricos. Como resultados, destaca-se que a área de estudo apresenta características físicas que corroboram para o desencadeamento de processos erosivos e inundação, podendo ser intensificados caso tenham uma ocupação do solo de forma desordenada. De tal modo, a análise morfométrica e do uso e aptidão do solo, mostraram-se fundamentais para o fornecimento de informações para uma melhor gestão ambiental e zoneamento da BHRS por meio de sub-bacias hidrográficas, visando o desenvolvimento sustentável desta região.

Palavras-chave: geoprocessamento, morfometria, zoneamento.

The study on the morphometry of hydrographic basins provides important information for understanding the environmental dynamics and data that corroborate the monitoring and territorial management. In this sense, this work aimed to obtain and spatialize five morphometric parameters and land use conflict, generating an index that provides subsidies that contribute to land use planning. Therefore, geoprocessing techniques are used to reduce a general morphometric index for the Sorocabaçu River sub-basins, through the integration of morphometric parameters. As a result, it is highlighted that an area of study has physical characteristics that contribute to the triggering of erosive processes and flooding, which can be intensified if they have a disorderly occupation of the soil. In such a way, a morphometric analysis and of the use and aptitude of the soil, fundamental determinants for the information of a better environmental management and zoning of the BHRS through hydrographic sub-basins, the development, and the sustainable development of this region.

Keyword: geoprocessing, morphometry, zoning.

1. INTRODUÇÃO

O padrão de uso e cobertura do território é resultado de fatores naturais e socioeconômicos, bem como dependem da sua utilização pelo ser humano no tempo e espaço. Contudo, o mal planejamento da terra é caracterizado como uma das principais causas do aumento da degradação ambiental [1], uma vez que a discrepância entre os usos adequados e reais da terra podem acarretar uma multiplicidade de impactos ambientais [2, 3].

Comumente as bacias hidrográficas têm sido utilizadas como unidades físicas, sociais, econômicas e políticas para o planejamento territorial e o estabelecimento de atividades de gerenciamento ambiental [4-6], uma vez que elas possuem um caráter integrador. Nesse sentido, o planejamento do território por meio do uso e ocupação do solo, em conjunto com a avaliação morfométrica [7] tem-se mostrado eficientes para fins de melhor planejamento e gestão dos recursos ambientais [8] em bacias hidrográficas, corroborando para atingir objetivos socioeconômicos e ecológicos.

A análise morfométrica e de ocupação do uso do solo tem sido muito utilizado em diversos campos, como no planejamento ambiental [9], no fornecimento de subsídios para o zoneamento

territorial [10], risco erosão do solo [11] caracterização de bacias hidrográficas [12] dentre muitas outras aplicações.

Recentemente, pesquisas mostraram que as técnicas de geoprocessamento, como é o caso dos sistemas de informação geográfica em conjunto com o sensoriamento remoto tem sido fundamentais para a gestão do território e análises de cunho ambiental [13, 14] em função da sua rapidez na geração de produtos cartográficos e menor custo atrelado, possibilitando o seu uso para a caracterização morfométrica e mapeamento do uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas [15-17].

Com base no exposto, o presente estudo tem como objetivo realizar a caracterização morfométrica das sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabuçu, tendo como intuito avaliar como as características físicas podem contribuir para o estabelecimento de um indicador morfométrico para auxiliar na gestão territorial da bacia hidrográfica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu (BHRS) que compõe à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos rios Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI- 10). A BHRS está localizada na região sudeste do Estado de São Paulo, com uma área de aproximadamente 202 km², ocupando cerca de 19% da extensão territorial do município de Ibiúna (Figura 1).

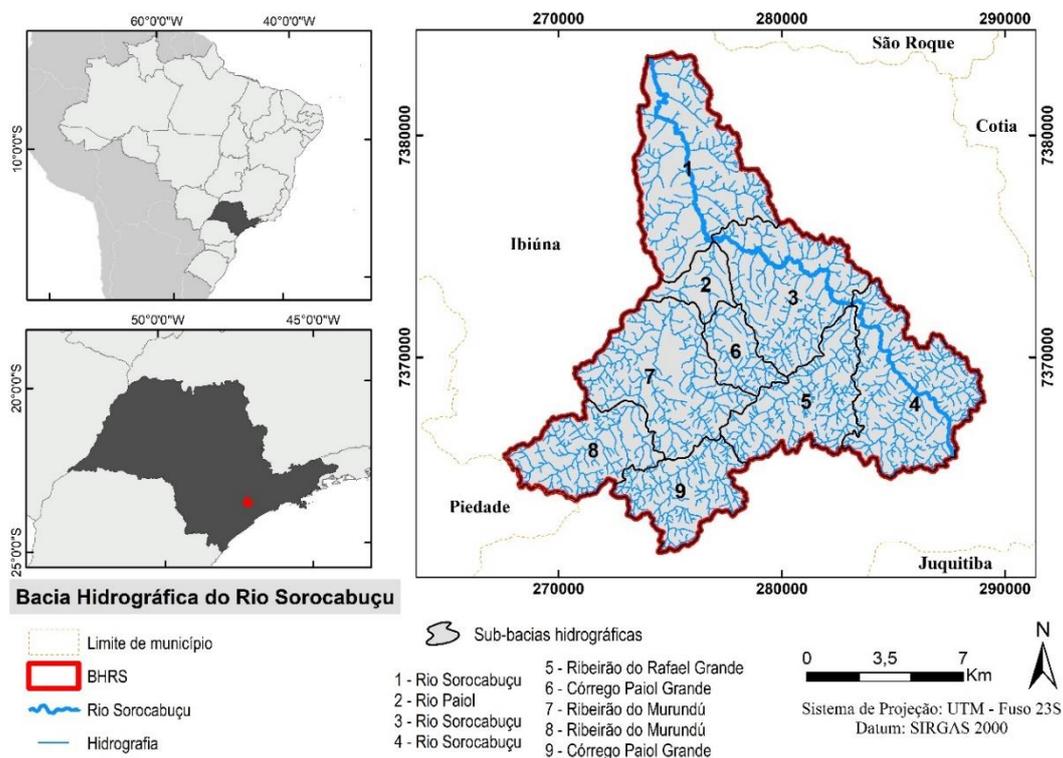


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu, São Paulo.

O Rio Sorocabuçu em conjunto com o Rio Sorocamirim dá origem ao Rio Sorocaba, caracterizado como o principal corpo hídrico formador da Represa de Itupararanga. Conforme apresentado por Simonetti et al. (2019) [18], o reservatório é o principal responsável pelo fornecimento de água na região de Ibiúna e dos municípios ao seu entorno e pela geração de energia.

A região a qual a BHRS está inserida pertence ao bioma da Mata Atlântica, com presença de Floresta Ombrófila Densa [19], ainda, o clima predominante segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwb, isto é, caracterizado pelos verões chuvosos e inverno com estiagem [18]. A pedologia na BHRS é predominantemente marcada pelo Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Melânico, correspondendo respectivamente a 89% e 10% da área de bacia hidrográfica [20].

2.2 Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas

A caracterização morfométrica de bacia hidrográficas tem sido muito utilizada na compreensão dos fenômenos naturais e ações antrópicas [21], sendo uma ferramenta importante e complementar para auxiliar os formuladores de políticas e órgãos gestores, para a gestão do uso da terra [7].

Portanto, uma série de parâmetros morfométricos para a caracterização das sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabaçu foram computadas em um ambiente SIG. No presente estudo, foram analisados os parâmetros mais frequentemente utilizados nas análises morfométricas de bacias hidrográficas [22] sendo: o coeficiente de compactidade (Kc), o fator de forma (Kf), o índice de circularidade (IC), a declividade e a densidade da drenagem (Dd). Além desses, foram calculados atributos, tais como: a área das sub-bacias (A), o perímetro (P), declividade e uso e cobertura do solo. Todo o processamento foi realizado por meio do *software* ArcGIS 10.6, utilizando a metodologia empregue por Silva et al. (2016) [23] para a obtenção dos indicadores morfométricos.

2.2.1 Declividade da BHRS

A determinação da declividade da bacia hidrográfica teve como base dados do Modelo Digital de Elevação (MDE). Para tal, foi delimitado o modelo digital de elevação elaborado a partir de curvas de nível e pontos cotados, sendo estes dados provenientes da vetorização da carta topográfica do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), na escala de 1:10.000. As curvas de nível e os pontos cotados foram interpoladas por meio do método de triangulação de Delaunay, denominado TIN (*Triangular Irregular Network*), obtendo uma grade triangular com as informações da elevação em diferentes localidades.

Com esse procedimento, foi possível a obtenção da declividade em porcentagem, por meio da função *Slope* do módulo *Spatial Analyst Tools* disponível no *software* ArcMap na versão 10. 6. Para a elaboração desse importante índice morfométrico foram adotadas as classes de declividade definidas conforme a classificação realizada por Gomes (2000) [24], as quais foram estabelecidas em função das características do terreno, conforme é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Definição das classes de declividade em porcentagem variando em função das características do local.

Classes (%)	Características
0 - 2	Terrenos planos ou quase planos, onde o escoamento superficial é muito lento ou lento
2 - 5	Terrenos com declividades suaves, nos quais, na maior parte do solo, o escoamento superficial é lento ou médio
5 - 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio e rápido
10 - 15	Terrenos muito inclinados, ou colinosos, onde o escoamento superficial é rápido.
15 - 20	Terrenos inclinados onde o escoamento superficial é rápido
20 - 25	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido
25 - 50	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido
> 50	Terrenos fortemente inclinados a muito íngremes, com escoamento superficial muito rápido e com desenvolvimento de solo raso a muito raso

A declividade possui relação com a velocidade do escoamento superficial, portanto, exercendo influência no tempo que a água da chuva leva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem da bacia hidrográfica, sendo a susceptibilidade a erosão dos solos, infiltração da água e picos de enchentes dependentes da declividade média da sub-bacia, no qual irá determinar maior ou menor velocidade de escoamento da água superficial, associada a outros atributos como o tipo de uso e cobertura da terra [25, 26].

2.2.3 Coeficiente de compacidade

O coeficiente de compacidade (Kc) relaciona o perímetro da bacia hidrográfica e circunferência de um círculo de área igual à da bacia, a qual é definida pela Equação 01. Segundo Villela e Mattos (1975) [25] esse coeficiente é dado por um número adimensional que varia em função da forma da bacia hidrográfica, independente do seu perímetro. Quanto mais alongada for a bacia, maior será o valor de Kc e menor é a susceptibilidade a enchentes, contudo, quanto mais circular for a bacia hidrográfica, mais próximo de 1 será o valor de Kc , conseqüente, mais susceptível a enchentes.

$$Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Sendo:

P é o perímetro da sub-bacia hidrográfica (m);

A é a área de drenagem da sub-bacia hidrográfica (m²).

O Coeficiente de compacidade foi adaptado conforme no trabalho desenvolvido por Silva et al. (2016) [23]. Para tal, o valor de Kc foi escalonado e classificados para que os valores variassem de 0 a 1 (Equação 2), no qual maiores valores igual a 1 diz respeito as bacias hidrográficas que estão menos sujeitas a enchentes, enquanto, áreas que estão mais sujeitas a ocorrência de enchentes apresenta valor igual a 0.

Conforme é apresentado por Silva et al. (2021) [12], o coeficiente de capacidade pode assumir os seguintes valores: 1,00 - 1,25 para bacias com alta propensão a enchentes, 1,25 - 1,50 para bacias com tendência mediana a enchente e, por fim, Kc maior que 1, 50 referem-se a bacia não sujeita a enchente.

$$Kcadp = \begin{cases} 0 & \text{para } Kc \leq 1,25 \\ 4 \times Kc - 5 & \text{para } 1,25 < Kc < 1,50 \\ 1 & \text{para } Kc \geq 1,50 \end{cases} \quad (2)$$

Sendo:

$Kcadp$ é o indicador do coeficiente de compacidade adaptado para variar de 0 a 1;

Kc é o coeficiente de compacidade.

2.2.4 Fator Forma

O fator de forma (Kf) relaciona a forma da bacia a de um retângulo, correspondendo à razão entre largura média e o comprimento axial da bacia hidrográfica. Esse parâmetro indica maior ou menor tendência de enchentes, no qual uma bacia com Kf baixo será menos propensa a ocorrência de enchentes quando comparado a outra bacia do mesmo tamanho, que assume um valor de Kf maior (Equação 3).

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

Sendo:

A é a área de drenagem da sub-bacia hidrográfica (m²);

L é o comprimento axial da sub-Bacia hidrográfica que corresponde à distância do exutório ao ponto mais longínquo do divisor topográfico (m).

Segundo Miller (1953) [27] o fator de forma pode assumir os seguintes valores: 1,00 – 0,75 refere-se a bacia sujeita a enchentes, já bacia com valores de 0,75 - 0,50 apresenta uma tendência mediana a ocorrência de enchentes, e por fim, Kf maior que 0,50 não está sujeita a enchentes. Assim, os valores de Kf foram escalonados e classificados em um intervalo de 0 a 1 segundo a Equação 4, sendo o valor 1 referente as bacias hidrográficas que apresentam uma tendência a conservação e 0 para as bacias hidrográficas com susceptibilidade a grandes enchentes.

$$Kfadp = \begin{cases} 0 & \text{para } Kf > 0,75 \\ -4 \times Kf + 3 & \text{para } 0,75 < Kf < 0,50 \\ 1 & \text{para } Kf \leq 0,50 \end{cases} \quad (4)$$

Sendo:

Kfadp é o índice do fator de forma adaptado para variar de 0 a 1;

Kf é o índice de forma.

2.2.5 Índice de circularidade

O Índice de circularidade (Ic) proposto por Miller (1953) [27] refere-se a um parâmetro que indica a forma da bacia hidrográfica, no qual à medida que o valor se aproxima de 1,0 maior a circularidade, logo, mais propensa a enchentes. Para o cálculo desse índice para cada sub-bacia hidrográfica do Rio Sorocabuçu utilizou-se a Equação 5.

$$Ic = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{p^2} \quad (5)$$

Sendo:

A é a área de drenagem da sub-bacia hidrográfica (m²);

P é o perímetro da sub-bacia hidrográfica (m).

Finalmente, o Ic foi adaptado de modo que os valores resultantes estivessem no intervalo de 0 a 1, portanto, o Índice de Circularidade Adaptado (Icadp) foi calculado conforme a Equação 6, sendo o valor igual a 1 referente a uma situação desejável e o valor igual a 0 uma situação ruim.

$$Icadp = 1 - Ic \quad (6)$$

Sendo:

Icadp é o índice de circularidade adaptado para variar de 0 a 1;

Ic é o índice de circularidade.

2.2.6 Densidade da Drenagem

A Densidade da Drenagem (Dd) proposta por Horton (1932) [28] aponta com qual velocidade a água deixa a bacia hidrográfica, isto é, permite determinar qual o grau de eficiência do sistema de drenagem da bacia. A Dd expressa a relação entre o somatório do comprimento de todos os canais da rede de drenagem (canais perenes, temporários ou intermitentes) e a área total da bacia hidrográfica (Equação 7).

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (7)$$

Sendo:

A é a área de drenagem da sub-bacia hidrográfica (km²);

Lt é o comprimento total dos cursos de água fluviais da sub-bacia hidrográfica (km).

A Dd pode ser classificada em três classes de interpretação conforme o Quadro 2, segundo Lima (2008) [29].

Quadro 2: Classes de interpretação para os valores de densidade da drenagem.

Classes de valores (km ²)	Densidade da Drenagem
< 0,5	Baixa
0,5 a 3,5	Média
>3,5	Alta

Por meio dessa classificação, os valores resultantes do cálculo da Dd foram classificados conforme a Equação (8), sendo valores próximos a 0 referem se a uma condição indesejável e os valores próximos a 1 representam uma condição desejável

$$Ddap = \begin{cases} 0 & \text{para } Dd \leq 0,5 \\ \frac{1}{3} \times Dd - \frac{1}{6} & \text{para } 0,5 < Dd < 3,50 \\ 1 & \text{para } Dd \geq 3,50 \end{cases} \quad (8)$$

Sendo:

Ddap é o indicador da densidade de drenagem adaptada da sub-Bacia Hidrográfica;

Dd é a densidade de drenagem da sub-bacia hidrográfica (km/km²).

Este índice assume grande importância para estudos acerca de bacias hidrográfica, já que reflete a influência de alguns parâmetros como o tipo de relevo, vegetação, tipo de solo, dentre outros fatores, no sistema de drenagem da bacia, exercendo influência no tempo para a saída do escoamento superficial da bacia [29].

2.2.7 Coeficiente de Rugosidade

O coeficiente de rugosidade é um parâmetro ambiental que direciona o uso potencial da terra em termos de capacidade do solo, o qual pode ser classificado em quatro classes distintas. Tal é determinado multiplicando-se a declividade média encontrada em cada pixel da sub-bacia hidrográfica pelo valor numérico da densidade da drenagem (Dd), como pode ser visto na Equação 9.

$$RN = D * Dd \quad (9)$$

Onde:

D é a declividade (%) encontrada em cada ponto (pixel) da sub-Bacia Hidrográfica;

Dd é a densidade de drenagem da sub-Bacia Hidrográfica (km/km²).

Na Tabela 1, apresenta-se a classificação do indicativo de uso potencial do solo segundo Miller (1953) [27].

Tabela 1: Avaliação das classes de aptidão do uso das terras.

Classificação segundo o RN	Indicativo de uso potencial do solo
Aptidão A	Agricultura
Aptidão B	Pecuária
Aptidão C	Pecuária/Floresta
Aptidão D	Floresta

Em seguida, para a classificação das classes de aptidão de uso das terras das sub-bacias hidrográficas, tomaram-se por base os valores do coeficiente de rugosidade encontrados, calculando o intervalo de classe, isto é, a diferença entre os maiores e menores valores do RN dividido por quatro (referente às quatro classes de uso potencial) (Equação 10).

$$IC = \frac{(RN_{maior} - RN_{menor})}{4} \quad (10)$$

Onde:

RN_{maior} refere-se ao maior valor de RN da sub-bacia hidrográfica;

RN_{menor} refere-se ao menor valor de RN da sub-bacia hidrográfica.

Para determinar os limites de cada classe de aptidão, considerou-se como limite inferior da primeira classe (Aptidão A) o menor valor do RN resultante e como limite superior, somou-se a este o valor do intervalo de classe. De tal modo, para a determinação das áreas de conflito de uso do solo, a capacidade do solo e dos usos reais foram classificadas com base no número do RN.

Por meio da determinação das classes foi elaborado o mapa do uso potencial do solo. Logo, foi determinado o conflito de uso das terras, a partir da identificação das áreas que apresentavam conformidade ou desconformidade com a aptidão do uso do solo resultante para a área de estudo.

No que diz respeito as classes, para esse estudo foram consideradas as seguintes classes: a classe A refere-se a cultura temporária e permanente, a pastagem e campo constituíram a classe B, a classe C foi constituída por pastagem, campo, reflorestamento e mata, por fim, a classe D foi constituída por mata e reflorestamento. Já as demais classes não foram consideradas para o estabelecimento das áreas de conflito.

2.3 Índice de análise morfométrica e aptidão do uso do solo e cobertura vegetal

Para a elaboração do índice final, denominado Índice de Análise Morfométrica e Ocupação (IMUS), foi utilizada a Equação (11) proposta por Zhang et al. (2014) [30], o qual é calculada a partir de uma média aritmética simples dos cinco indicadores morfométricos e de aptidão do uso e cobertura do solo para cada sub-bacia hidrográfica.

$$IMUS = \frac{(\sum_{i=1}^{i=5} vi)}{5} \quad (11)$$

Onde:

Vi refere-se aos indicadores morfométricos sub-bacia hidrográfica e de ocupação do uso do solo;

IMUS refere-se ao índice de análise morfométrica e ocupação.

2.4 Uso do solo e cobertura vegetal

O mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu foi gerado com base na imagem de satélite do CBERS 4A (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) e sensor WPM (Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura), disponibilizada no catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Por meio da imagem foi efetivada a fusão da imagem pancromática (resolução espacial de 2 m) com a imagem multiespectral (resolução espacial de 8m), resultando em uma imagem multiespectral colorida com 2m de resolução especial, aumentando assim o número de detalhes passíveis de serem observados na imagem. Uma vez que a fusão de imagens é utilizada, principalmente, com o intuito de melhorar o nível de interpretação dos dados de entrada [31].

De posse da imagem, para o mapeamento do uso solo e cobertura vegetal foi utilizado o método de classificação por interpretação visual presente no *software* ArcGIS 10.6 [32], justamente por tratar-se de um método que permite extrair alterações dinâmicas do uso e cobertura vegetal do solo, assim, tornando o processo de interpretação de imagens mais confiável, conforme é prestando por [30, 33].

Um dos primeiros passos no processo de interpretação visual de imagens é o estabelecimento de alguns elementos básicos de análise e interpretação, que visam tornar o processo de extração de informações de objetos, área ou fenômenos menos subjetivos. Esses elementos são: tonalidade/cor, textura, forma, padrão, tamanho, localização espacial, sombra e tamanho. De tal

modo, a identificação dos objetos (classes) presentes na imagem do CBERS 4A para a BHRS baseou-se na análise desses elementos.

As classes temáticas adotadas para o mapeamento foram definidas e adaptadas conforme os níveis I e II disponível no Manual Técnico de Uso da Terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [19], resultando em um total de 10 classes sendo denominadas como: Campo, Corpo d'água, Cultura Permanente (plantas perenes), Cultura Temporária (curta ou média duração), Mata, Mineração, Pastagem, Reflorestamento, Área de Várzea e, por fim, Área Urbanizada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conhecimento acerca do uso da terra, juntamente com a caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica, fornecem informações relevantes referentes às suas características, contribuindo com o planejamento adequado da exploração antropogênica e gestão do território [7].

A distribuição quantitativa da área territorial ocupada por cada unidade de classe é apresentada na Figura 2, já na Figura 3 tem-se a espacialização das classes de uso e cobertura vegetal da BHRS.

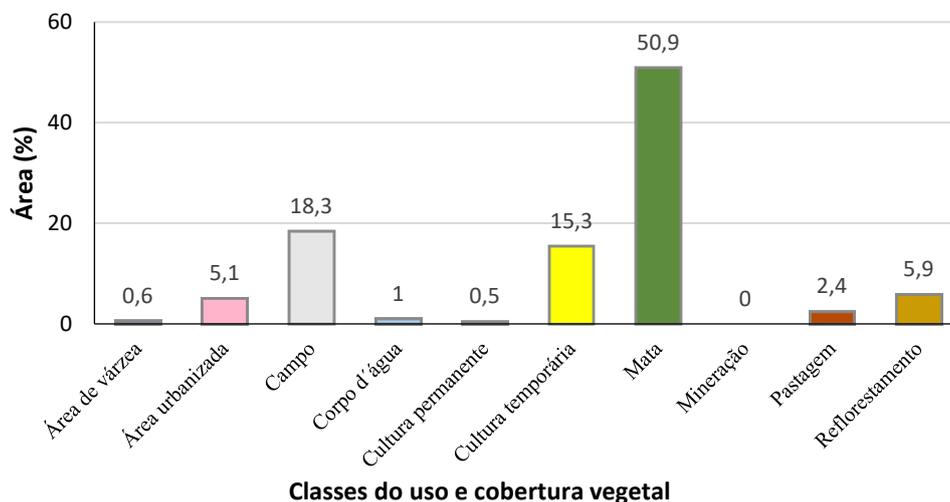


Figura 2: Quantitativo das classes de uso do solo e cobertura vegetal da BHRS.

Por meio do mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal, nota-se que a classe mais expressiva é representada pela mata, correspondendo a aproximadamente 51% da área de estudo, localizada em sua maior parte na área leste e oeste, indicando que a bacia hidrográfica está bem preservada. A alta porcentagem de mata presente na BHRS, pode ser justificada por tratar-se de áreas que apresentam características físicas, como é o caso da declividade, que não favorece a incorporação das atividades agrícolas, deste modo, contribuindo para a não supressão de vegetação.

Entretanto, as classes antrópicas agrícolas (cultura temporária, cultura permanente e pastagem) correspondem a 18,0 % da área da BHRS, nas quais estão localizadas em áreas com menores declividades. A classe campo, a qual é representada por áreas degradadas com ausência de vegetação e/ou presença de estrato herbáceo, abrange cerca de 18% da área da bacia. Por fim, área urbanizada abrange cerca de 5,1% da área estudo, prevalecem na porção norte da bacia hidrográfica, a qual integra parte do município de Ibiúna (Figura 3).

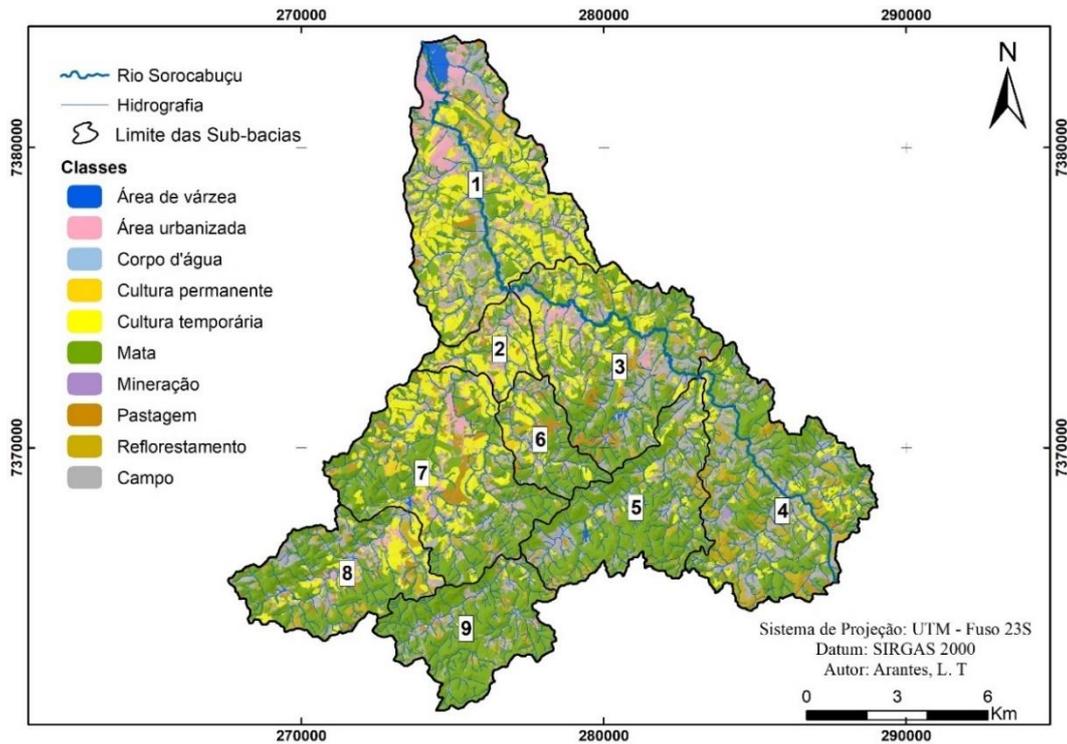


Figura 3: Mapa de uso do solo e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu.

A Tabela 2 apresenta as classes de uso do solo e cobertura vegetal presente nas 9 sub-bacias hidrográficas, possibilitando identificar quais são as atividades predominantes e associar aos indicadores morfométricos da área de estudo como no caso do coeficiente de rugosidade que trata da aptidão do uso do solo.

Tabela 2: Quantitativo das classes do uso do solo e cobertura vegetal por sub-bacia.

Classes	Área (%) em função da ocupação do solo nas sub-bacias hidrográficas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Área de várzea	2,62	-	0,21	0,00	0,40	-	0,13	0,21	0,00
Área urbanizada	11,28	10,5	4,73	1,74	1,06	4,64	5,32	4,15	2,25
Campo	23,38	14,9	22,46	22,69	16,78	13,69	10,84	17,43	9,85
Corpo d'água	1,42	1,4	0,86	0,98	0,75	0,60	0,81	1,36	0,77
Cultura permanente	1,11	-	0,21	0,09	-	1,55	1,00	-	-
Cultura temporária	27,97	39,2	16,02	6,54	9,43	14,29	20,88	12,65	0,83
Mata	28,11	29,6	46,95	51,68	65,20	57,38	53,50	53,33	82,21
Mineração	-	-	-	0,40	-	-	-	-	-
Pastagem	1,47	3,5	4,20	1,01	0,40	5,00	4,00	2,99	0,95
Reflorestamento	2,64	0,9	4,37	14,86	5,99	2,86	3,52	7,87	3,14
Área Total (km ²)	37,40	6,58	29,03	32,70	22,70	8,40	30,99	19,05	16,86

Analisando a Tabela 2, constata-se que as sub-bacias hidrográficas com maior percentual de atividades antrópicas referem-se a sub-bacia 1 e sub-bacia 2. Deste modo, ambas apresentam os menores percentuais da classe de mata quando comparada as demais sub-bacias, com 28,11% e 29,6% de seus territórios ocupados por mata, esse baixo valor pode ser justificado por tais apresentarem a maior parte de suas áreas destinadas a atividade agrícola e por abrigar parte da área urbana do município de Ibiúna.

As demais sub-bacias apresentam melhores condições de preservação, visto que elas possuem valores acima de 46% da área total constituída por matas, visto que a maioria das sub-bacias estão localizadas mais ao centro e sul da BHRS, reduzindo assim uso do solo destinado a cultura temporária e área urbanizada. No que diz respeito a classe de área urbanizada, a sub-bacia 1 localizada ao norte da bacia hidrográfica, é a que apresenta maior porcentagem (4,22%), por abranger parte da área urbana no município de Ibiúna.

A Figura 4 apresenta as respectivas áreas de cada classe de declividade e a Figura 5 a distribuição espacial da declividade na BHRS. Por meio dos dados obtidos observa-se que a declividade variou de 0% a >50%, com predominância de áreas com relevo fortemente inclinado, correspondendo a 27.1% da área total da bacia hidrográfica, seguido, em ordem decrescente, da classe de relevo inclinados, apresentando em menor quantidade terrenos levemente inclinados. A porção sul apresenta maiores valores de declividade, enquanto a região localizada mais ao norte possui menores valores de declividade. Ainda, locais com a presença de corpos d'água também são caracterizados menores declives.

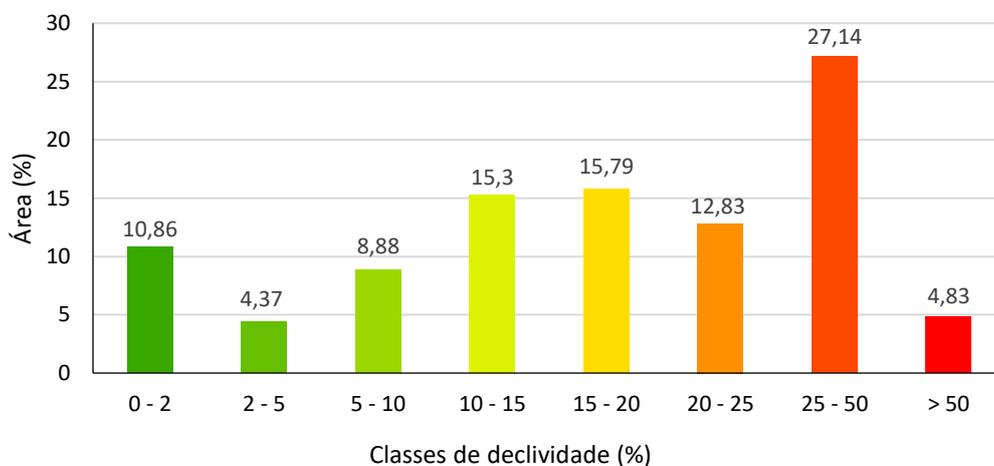


Figura 4: Quantificação das áreas de relevo segundo os percentuais de declividade.

A declividade do terreno exerce influência direta sobre os processos que condicionam a velocidade de transformação da energia potencial das águas pluviais em energia cinética, conseqüentemente, na intensidade dos processos erosivos, influenciando também na propensão e magnitude de inundações [25]. Nesse sentido, as regiões que apresentam maiores valores de declividade como é o caso da porção Sul da BHRS (Figura 5) pode acarretar uma maior susceptibilidade a ocorrência de processos erosivos, visto que terrenos com uma topografia mais íngreme podem resultar em um escoamento superficial rápido. No caso das áreas com declives mais suaves, localizadas em sua maior parte ao norte da bacia hidrográfica, favorecem atividades pecuárias e o cultivo agrícola respectivamente. Além disso, a baixa declividade implica em menor probabilidade de ocorrências de processos erosivos, maior infiltração de águas pluviais e ocorrência de inundações [34].

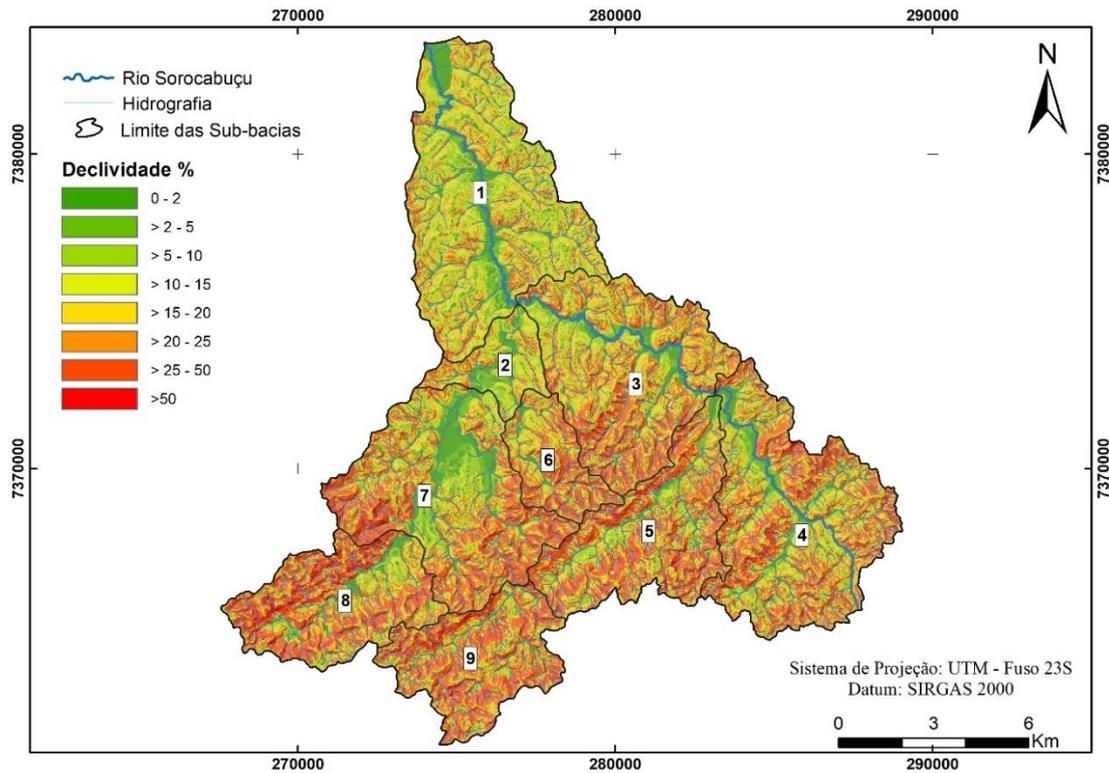


Figura 5: Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu.

A seguir é mostrado na Figura 6 os quantitativos das respectivas declividades médias para cada sub-bacia hidrográfica.

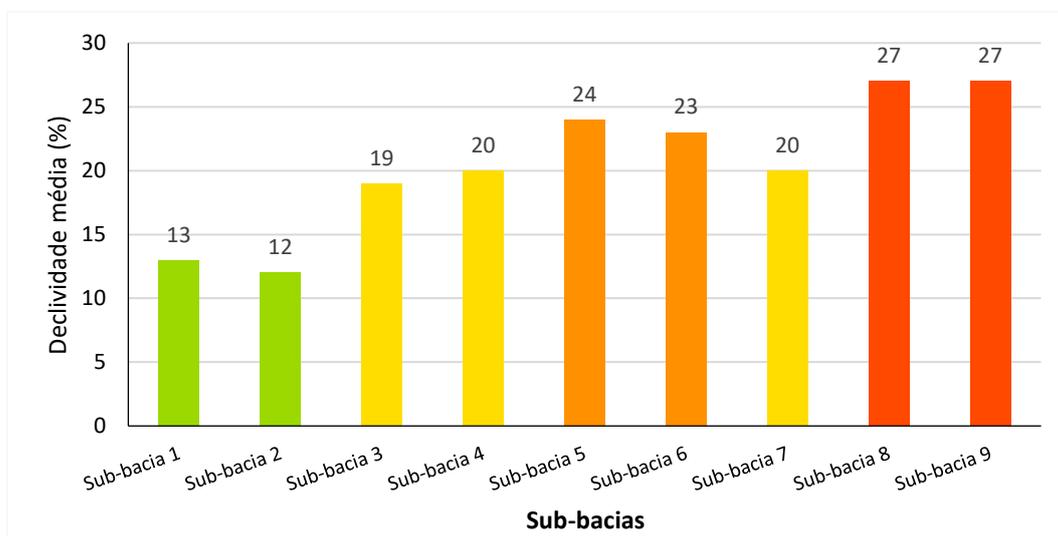


Figura 6. Quantificação da declividade média para as sub-bacias hidrográficas.

Nota-se por meio da Figura 6 que as sub-bacias hidrográficas localizadas na região norte apresentaram uma menor declividade média, como é o caso das sub-bacias 1, 2 e 3. Contudo, as sub-bacias de número 5, 6 e 8 resultaram nas maiores declividades médias. O conhecimento da declividade de um terreno torna-se um fator decisivo no estabelecimento da limitação referentes as formas de ocupação do uso do solo, visando a preservação da fauna e flora, sendo estes fundamentais para a manutenção de ecossistemas locais e o controle dos processos erosivos, contribuindo com a qualidade dos recursos hídricos [35]. Ainda, a topografia do terreno influencia

no desencadeamento de processos erosivos, podendo provocar elevadas perdas de solos nas áreas de produção agrícola, em função do arraste de matéria orgânica, nutrientes e defensivos agrícolas, ocasionados pela ação conjunta dos impactos das gotas de chuva [36].

Como resultado foi obtido um mapa da representação espacial de cada parâmetro morfométrico utilizado nesse estudo, totalizando um total de cinco mapas, que possuem uma escala que variam de 0 a 1, sendo 0 indicando um valor ruim e 1 indica uma sub-bacia com melhores condições, segundo a definição de cada parâmetro (Figuras 7 a-e).

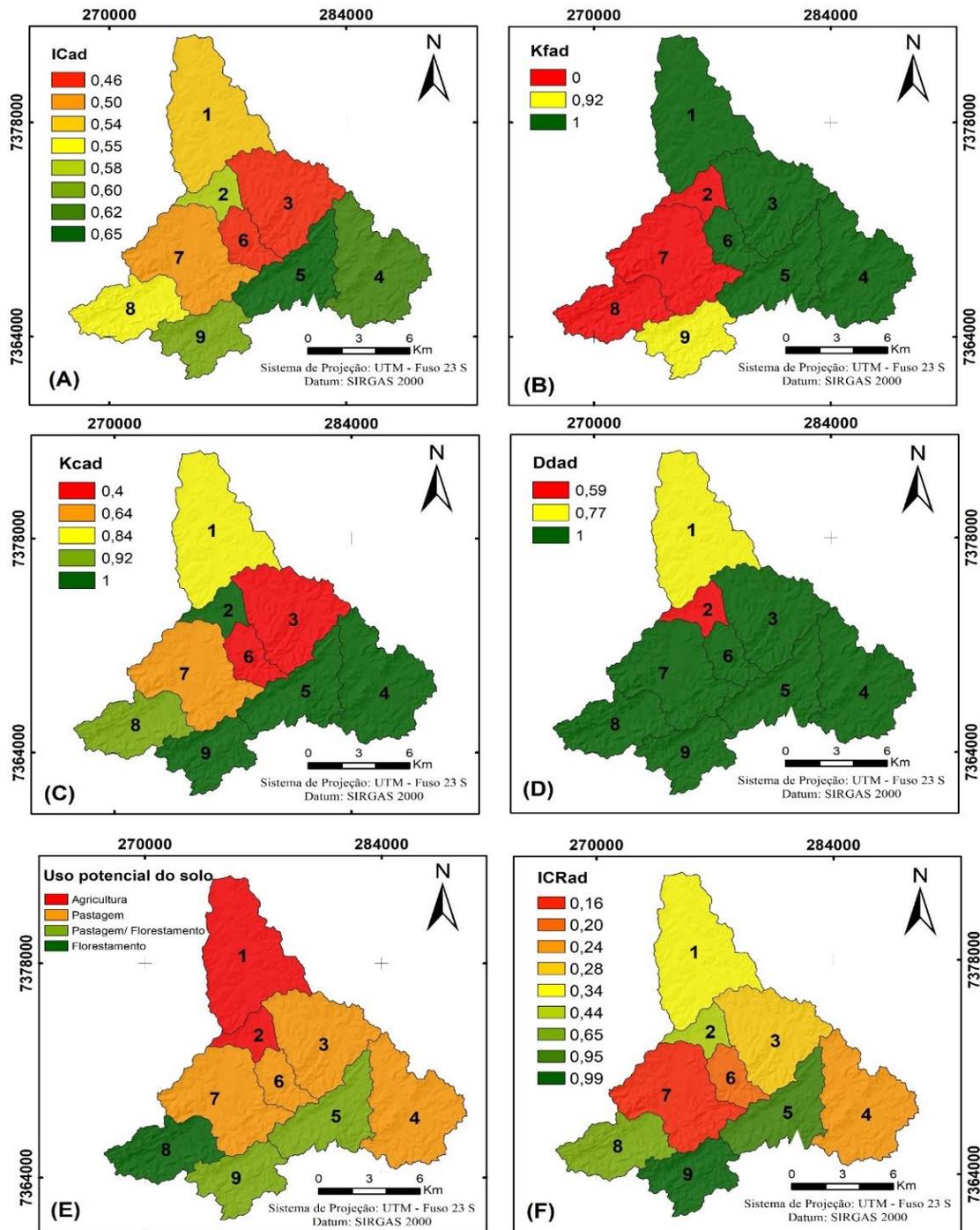


Figura 7: Mapas temáticos dos parâmetros morfométricos obtidos para as sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabaçu.

A espacialização do parâmetro do ICad (A) possibilitou identificar visualmente das áreas que apresentaram menor e maior ICad. De um modo geral, as sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabaçu apresentaram valores inferior a 0,7, indicando-as que se aproximam da forma circular, corroborando com a ocorrência inundações. Verifica-se que as sub-bacias de número 3 e 6 foram as que apresentaram um menor ICad, indicando uma maior propensão a ocorrência de inundações, pois quanto maior a circularidade da bacia hidrográfica, maior a tendência que ocorra chuvas intensas de forma simultânea em toda a sua extensão, concentrando um grande volume de água no tributário principal, conforme apresentado por Cardoso et al. (2006) [4]. Já a sub-bacia hidrográfica de número 5 foi a que apresentou o menor valor, isto é, menor propensão a enchentes.

No que diz respeito ao parâmetro Kfad (B), as sub-bacias de número 2, 7 e 8 apresentaram valor igual a 0, indicando que possuem susceptibilidade a grandes enchentes. As demais sub-bacias 1, 3, 4, 5 e 6 apresentam um formato mais alongado, visto que o valor de Kfad obtido foi igual ao valor 1.

A partir da distribuição dos valores do parâmetro *k*cad para as sub-bacias Hidrográficas do Rio Sorocabaçu, verifica-se que as sub-bacias hidrográficas de número 6 e 3 são as mais propensas a enchentes, todavia, as sub-bacias hidrográficas de números 2, 4, 5 e 9 não apresentam tendência a enchente.

A densidade de drenagem relaciona o número de canais com a área total da bacia [37], fornecendo uma indicação da eficiência da drenagem [4]. Conforme é apresentado na Figura 7-D, as sub-bacias 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 possuem uma rede de drenagem bem drenadas, que conforme [38] pode ser atribuído à presença de terrenos com maiores declividade que resultam em um maior escoamento e mais redes de drenagem superficial.

Entretanto, as sub-bacias hidrográficas de número 1 e 2, apresentaram menos valores de Ddap, ambas estão localizadas no município de Ibiúna, centro oeste do estado de São Paulo, a qual apresentam a classe de área urbana (Tabela 2) superior quando comparada as demais sub-bacias. Geralmente, menores valores de Dd estão associados a solos altamente permeáveis e áreas que apresentam uma topografia pouco íngreme [8].

A aptidão do uso potencial do solo para cada sub-bacia hidrográfica do Rio Sorocabaçu foi determinada considerando o intervalo IC do coeficiente de rugosidade (RN) conforme é apresentada na Tabela 3. A amplitude variou de 27,24 a 149,04 e o intervalo de classe igual a 30,45.

Tabela 3: Intervalos de classe do RN para classificação da aptidão de uso potencial do solo para as sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabaçu.

Classificação segundo o RN	Intervalo de classe	Indicativo de uso potencial do solo
Aptidão A	27,24 - 57,69	Agricultura
Aptidão B	57,69 - 88,14	Pastagem
Aptidão C	88,14 - 118,59	Pastagem/Floresta
Aptidão D	118,59 - 149,04	Floresta

Nota-se que os menores valores de RN se referem a classe de aptidão A, em contrapartida, a aptidão D refere-se aos maiores valores de RN, deste modo, quanto maior o valor de RN na sub-bacia hidrográfica, maior será a susceptibilidade a ocorrência de processos erosivos, assim, destinando tais áreas para a preservação permanente, uma vez que as ações antropogênicas podem contribuir com a deterioração dessas áreas.

O mapa referente ao uso potencial do solo (E), descreve as classes de aptidão do uso do solo em função dos coeficientes de RN. Os resultados indicam que a maioria das sub-bacias hidrográficas apresenta potencial para o uso destinado a pastagem (49,6%), enquanto as sub-bacias 5 e 9 referem-se as áreas destinadas ao uso agrícola (22%) e, por fim, apenas 19,4% possuem potencial para áreas destinadas a pastagem/floresta. A sub-bacia 8, em particular, foi a única que apresentou o uso potencial para a preservação (9,4%), ou seja, áreas que são consideradas inadequadas para os outros tipos de uso, no entanto, cerca de 12% de sua área é utilizada para a agricultura e pastagem/campo.

Entretanto, é fundamental destacar que o desenvolvimento socioeconômico dessas regiões deve considerar o aspecto ambiental, de modo que o uso do solo, bem como as características morfométricas sejam consideradas para o estabelecimento do ordenamento territorial [21].

Já no que diz respeito a distribuição dos índices do Coeficiente de Rugosidade Adaptado (CRad) para as sub-bacias hidrográficas do Rio Sorocabaçu (F), nota-se que a sub-bacia hidrográfica de número 7 foi a que apresentou menor valor, isto é, apenas 16% de sua área está de acordo com a aptidão do uso e ocupação do solo. Todavia, as sub-bacias hidrográficas 5 e 9 apresentam mais de 95% de sua área correspondente a aptidão do uso e ocupação do solo. De um modo geral, a região central e as sub-bacias localizadas mais ao norte da BHRS resultaram em valores de ICRad relativamente inferiores quando comparado as demais sub-bacias hidrográficas, enquanto, na região Sul as sub-bacias hidrográficas apresentaram melhores valores, visto que os usos do solo correspondem a aptidão do uso e ocupação do solo.

Por fim, na Figura 8 é apresentado a distribuição dos valores resultantes da aplicação do Índice de Análise Morfométrica e Ocupação (IMUS) para as sub-bacias hidrográficas da BHRS, segundo a metodologia elaborada por Silva et al. (2016) [23].

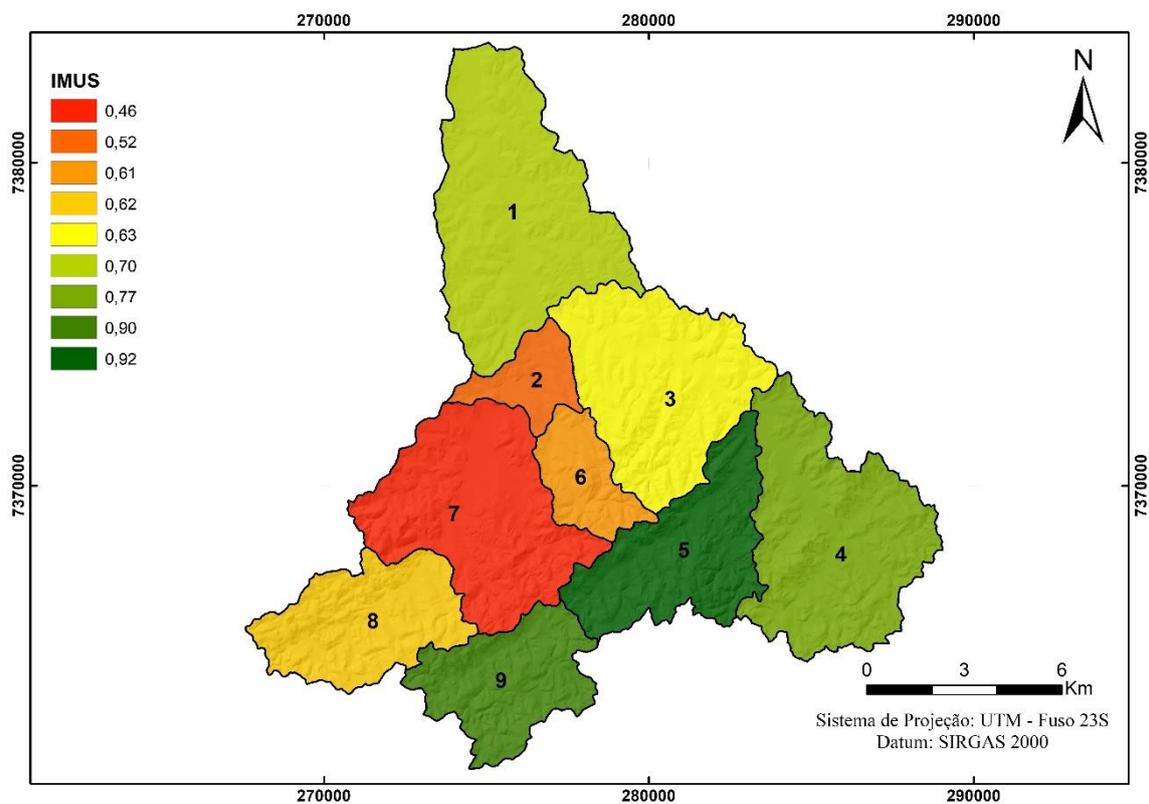


Figura 8: Mapa temático do índice IMUS da BHRS.

De um modo geral, as sub-bacias hidrográficas localizadas na região sudeste e a uma sub-bacia bem ao norte, apresentaram melhores resultados, isto é, valores acima de 0,70, enquanto, as sub-bacias hidrográficas localizadas na região central e sudoeste da BHRS tiveram valores abaixo de 0,63. A sub-bacia 7 obteve o pior valor (0,46), o qual resultou valores baixos em todas as variáveis morfométricas analisadas, com exceção da densidade da drenagem, justificando o seu resultado, em contrapartida, a sub-bacia hidrográfica de número 5 foi a que apresentou o melhor valor de IMUS (0,92), influenciado pelos maiores valores dos índices morfométricos obtidos. Assim, os altos valores e menores valores possuem relação com os resultados obtidos nos índices utilizados nesse estudo (Figura 8).

Conforme citado por Ross (2018) [20], o planejamento do território deve levar em consideração a análise integrada da paisagem, ponderando suas potencialidades e as fragilidades dos sistemas ambientais. Deste modo, a obtenção de indicadores morfométricos para a área a BHRS, corroboram para a identificação das sub-bacias hidrográficas que são mais susceptíveis a

ocorrência de processos erosivos, inundação, bem como suas limitações, visando o estabelecimento de diretrizes que subsidiem o manejo e gestão dessas áreas quanto ao uso do solo, de modo que se tenha uma exploração econômica e mais justa, conforme a aptidão da terra.

4. CONCLUSÃO

O uso das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento demonstraram-se eficazes na aquisição dos parâmetros morfométricos e mapeamento do uso e cobertura vegetal da BHRS e, posteriormente, na integração dos parâmetros para a elaboração do índice IMUS.

Os indicadores morfométricos obtidos determinam que a BHRS apresenta características físicas que as tornam mais vulneráveis às ações antropogênicas e ocorrência de processos erosivos, demonstrando quais sub-bacias hidrográficas são mais propensas a inundações. Todavia, a ocupação e o uso desordenado do solo podem contribuir para que mais áreas venham a ser susceptíveis a esses processos ou até mesmo intensificar, ocasionando em uma série de impactos negativos que afetam diretamente a qualidade de vida.

Nesse sentido, o estabelecimento de indicador morfométrico surge como uma alternativa para auxiliar na melhor gestão da bacia hidrográfica e redução da degradação ambiental, uma vez que possibilita caracterizar os elementos físicos de forma quantitativa, podendo ser utilizados para apontar as áreas com maior susceptibilidade ao desencadeamento de processos erosivos e eventos hidrometeorológicos, auxiliando no gerenciamento e tomada de decisões acerca das atividades desenvolvidas nas sub-bacias.

Ainda, se utilizado em conjunto com outras análises, tornam-se um importante instrumento para o estabelecimento do zoneamento ecológico-econômico da BHRS, compatibilizando as dinâmicas de uso e ocupação do território com o uso sustentável dos recursos naturais e, portanto, estando alinhado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Organização das Nações Unidas) que trata de cidades e comunidades sustentáveis.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Valle Júnior RF, Galbiatti JA, Pissarra TCT, et al. Diagnóstico do conflito de uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Uberaba. *Glob Sci Tech*. 2013;6(1):40-52. doi: 10.14688/1984-3801.v06n01a04
2. Silva DCC, Albuquerque Filho JL, Oliveira RA, et al. Metodologia para análise socioambiental de domicílios presentes em bacias hidrográficas. *Holos*. 2019;35:e556. doi: 10.15628/holos.2019.5566
3. Pacheco FAL, Fernandes LFS. Environmental land use conflicts in catchments: a major cause of amplified nitrate in river water. *Sci Total Env*. 2016;548:173-88. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.155
4. Cardoso CA, Dias HCT, Soares CPB, et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Rev Árvore*. 2006;30(2):241-8. doi: 10.1590/S0100-67622006000200011
5. Javed A, Khanday MY, Rais S. Watershed prioritization using morphometric and land use/land cover parameters: A remote sensing and GIS based approach. *J Geol Soc India*. 2011;78:63-75. doi: 10.1007/s12594-011-0068-6
6. Rai PK, Chandel RS, Mishra VN, et al. Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data. *App Water Sci*. 2018;8(15):1-16. doi: 10.1007/s13201-018-0660-7
7. Oliveira DHR, Acorsi MG, Smaniotto DA. Uso e ocupação do solo e caracterização morfométrica de microbacia na região centro-sul paranaense. *Águas Subterrâneas*. 2018;32(2):1-10. doi: 10.14295/ras.v32i2.29114
8. Aher PD, Adinarayan J, Gorantiwar SD. Quantification of morphometric characterization and prioritization for management planning in semi-arid tropics of India: A remote sensing and GIS approach. *J Hydrol*. 2014;511:850-60. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.028

9. Georgin J, Oliveira GA, Rosa ALD. Estudo comparativo de índices morfométricos relacionado com cheias nas bacias hidrográficas do alto Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim-RS. *Rev Eletron Gest, Educ e Tec Amb.* 2015;19(2):1357-64. doi: 105902/2236117016834
10. Santos CA, Sobreira FG. Análise morfométrica como subsídio ao zoneamento territorial: o caso das bacias do Córrego Carioca, Córrego da Bação e Ribeirão Carioca na região do Alto Rio das Velhas-MG. *Rev Escola de Minas.* 2008;61(1):77-85. doi: 10.1590/S0370-44672008000100013
11. Ameri AA, Pourghasemi HR, Cerda A. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision-making models. *Sci Total Envi.* 2018;613:1385-400. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.210
12. Silva, CVT, Ribeiro Filho JC, Silva PCM. et al. Caracterização Morfométrica, Uso e Ocupação de uma Bacia Hidrográfica. *Ver. Eng. Agri.* 2017;25(5):436-444.
13. Fonseca SF, Santos DC, Hermano VM. Geoprocessamento aplicado à análise dos impactos socioambientais urbanos: estudo de caso do bairro Santo Expedito em Buritizeiro/MG. *Rev Geogr (UFPE).* 2013;30(3):178-91.
14. Okumura M, Araujo AGM. Long-term cultural stability in hunter-gatherers: a case study using traditional and geometric morphometric analysis of lithic stemmed bifacial points from Southern Brazil. *J Archaeological Sci.* 2014;45:59-71.
15. Castro LIS, Campo S, Zimback CRL, et al. Sistema de Informação Geográfica na formulação de indicadores ambientais para sustentabilidade dos recursos hídricos. *Rev Irriga.* 2015;19(4):655. doi: 10.15809/irriga.2014v19n4p655
16. Coliado PHS, Simonetti VC, Silva DCC. Avaliação das características físicas da bacia hidrográfica do rio Pariquera-Açu no Baixo Ribeira de Iguape (SP). *Holos Envi.* 2020;20:320-34. doi:10.14295/holos.v20i3.12386
17. Rahman MM, Zaman MN, Biswas PK. Optimization of significant morphometric parameters and sub-watershed prioritization using PCA and PCA-WSM for soil conservation: a case study in Dharla River watershed, Bangladesh. *Mod Earth Systems Envi.* 2021:1-15. doi: 10.1007/s40808-021-01255-9
18. Simonetti VC, Frascareli D, Gontijo ESJ, et al. Water quality indices as a tool for evaluating water quality and effects of land use in a tropical catchment. *International J River Basin Mgmt.* 2019;17:1-34. doi: 10.1080/15715124.2019.1672706
19. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Manual técnico de uso da terra. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE; 2013.
20. Ross JLS. *Ecogeografia do Brasil: Subsídios para o planejamento ambiental.* São Paulo: Oficina de Textos; 2018.
21. Toniolo BP, Oliveira RA, Lourenço RW, et al. Indicadores morfométricos como instrumento de gestão da bacia hidrográfica do Rio Cotia (SP). *Holos Envi.* 2021;21:282-302. doi: 10.14295/holos.v21i2.12442
22. Vestena LR, Thomaz EL. Avaliação de conflitos entre Áreas de Preservação Permanente associadas aos cursos fluviais e uso da terra na Bacia do Rio das Pedras, Guarapuava-PR. *Ambiência.* 2006;2(1):73-85.
23. Silva DCC, Albuquerque Filho JL, Sales JCA, et al. Uso de indicadores morfométricos como ferramentas para avaliação de bacias hidrográficas. *Rev Bras Geogr Fís.* 2016;9(2):627-42. doi: 10.26848/rbgf.v9.2.p627-642
24. Gomes DM. Mapeamento geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na bacia do Córrego Ribeirão do Meio, São Pedro/SP na escala 1:20.000. São Carlos: EdUFSCar; 2000.
25. Villela SM, Mattos A. *Hidrologia aplicada.* São Paulo: McGraw-Hill do Brasil; 1975.
26. Rocha JSM, Kurts SMJM. *Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas.* 4 ed. Santa Maria: UFSM/CCR; 2001.
27. Miller VC. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area. Technical Report-3, Columbia. New York: University Department of Geology; 1953.
28. Horton RE. *Basin characteristics.* Local New York: Trans American Geophysical Union; 1932.
29. Lima WP. *Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.* 2 ed. Piracicaba (SP): ESALQ; 2008.
30. Zhang Z, Wiang X, Zhao X, et al. A 2010 update of National Land Use/Cover Database of China at 1:100000 scale using medium spatial resolution satellite images. *Remote Sens Envi.* 2014;149:142-54. doi: 10.1016/j.rse.2014.04.004
31. Reiche J, Verbesselt J, Hoekman D, et al. Fusing Landsat and SAR time series to detect deforestation in the tropics. *Remote Sens Envi.* 2014;156:276-93. doi: 10.1016/j.rse.2014.10.001
32. Environmental Systems Research Institute (ESRI). *ArcGis 10.6. Redlands (US): ESRI; 2017.*
33. Florenzano TG. *Iniciação em sensoriamento remoto.* 3. ed. ampliada e atualizada. São Paulo: Oficina de Textos; 2011.

34. Batista RAW, Nery LM, Matus G, et al. Estimativa do fator de erosividade do solo da região do Vale do Ribeira Paulista, Brasil. *Formação*. 2021;28:441-60. doi: 10.33081/formacao.v28i53.8015
35. Valle IC, Francelino MR, Pinheiro HSK. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. *Floresta e Ambient*. 2016;23(2):295-308. doi: 10.1590/2179-8087.107714
36. Bertoni J, Lombardi Neto F. *Conservação do solo*. 9. ed. São Paulo: Ícone; 2014.
37. Almeida W, Souza, NM, Junior, DSR, et al. Análise morfométrica em bacias hidrográficas fluviais como indicadores de processos erosivos e aporte de sedimentos no entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV. *Rev Bras Geomorfologia*. 2013;14(2):139-43.
38. Kaliraj N, Chandrasekar N, Magesh S. Morphometric analysis of the river Thamirabarani sub-basin in Kanya Kumari District, Southwest Coast of Tamil Nadu, India, using remote sensing and GIS. *Envi Earth Sci*. 2015;73:7375-401. doi: 10.1007/s12665-014-3914-1