

# Revista Brasileira de Geografia Física



ISSN:1984-2295

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

# Uso de indicadores morfométricos como ferramentas para avaliação de bacias hidrográficas

Darllan Collins da Cunha e Silva. UNESP - Universidade Estadual de São Paulo. E-mail: darllanamb@yahoo.com.br

José Luiz Albuquerque Filho. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. E-mail: <a href="mailto:albuzelu@ipt.br">albuzelu@ipt.br</a>
Jomil Costa Abreu Sales. UNESP - Universidade Estadual de São Paulo. E-mail: <a href="mailto:jomilc@gmail.com">jomilc@gmail.com</a>
Roberto Wagner Lourenço. UNESP - Universidade Estadual de São Paulo. E-mail: <a href="mailto:robertow@sorocaba.unesp.br">robertow@sorocaba.unesp.br</a>

Artigo recebido em 21/02/2016 e aceito em 29/05/2016

#### RESUMO

Indicadores morfométricos são importantes mecanismos para a comunicação de informações resumidas ou para a provisão de bases sólidas sobre as características físicas de bacias hidrográficas, o que possibilita adequar o manejo do uso e ocupação do solo e cobertura vegetal com base nessas características, visando garantir a sustentabilidade e influenciando no bem estar dos seres vivos. Portanto, nesse estudo, construiu-se um Índice de Análise Morfométrica e Aptidão do Uso do Solo e Cobertura Vegetal (IMUS) que integrou informações morfométricas e o atual uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Una, utilizando, em seu cálculo, bases científicas, indicadores morfométricos e técnicas de geoprocessamento. Os valores obtidos para os indicadores morfométricos demonstraram que a bacia apresenta características físicas desejáveis quanto à vulnerabilidade a processos erosivos, entretanto, o uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica contrasta com a aptidão calculada na região nordeste da bacia apresentando baixos valores, o que refletiu no valor final do IMUS. Desta forma, o IMUS se mostrou um importante instrumento para a análise das características morfométricas e uso e ocupação do solo para a previsão de enchentes e controle da susceptibilidade à erosão das sub-bacias hidrográficas, podendo ser uma ferramenta de apoio na gestão de bacias hidrográficas e servir de suporte no desenvolvimento de políticas públicas.

Palavras-chave: Indicadores Morfométricos; Bacia Hidrográfica; Geoprocessamento.

# Use of morphometric indicators as tools for assessment watershed

#### ABSTRACT

Morphometric indicators are important mechanisms for reporting summary information or for the provision of a solid foundation on the watersheds physical characteristics, which make possible to adapt the land use and management of the vegetation cover, based on those characteristics in order to ensure sustainability and influence on the welfare of human beings. Therefore, in this study, a Morphometric Analysis and Aptitude of the Land Use and Vegetal Cover (IMUS) was created, incorporating morphological information and current land use and occupation in Una River Basin, using in its calculation, scientific basis, morphometric indicators and geoprocessing techniques. The morphometric indicators of the values obtained showed that the watershed presents desirable physical characteristics in terms of erosion vulnerability, however, the watershed land use and occupation contrasts with the aptitude calculated in the northeast of the basin showing low values, which resulted in the final amount of IMUS. Thus, the IMUS has proved to be an important tool for the morphometric characteristics analysis and land use and occupation to forecast floods and erosion susceptibility control of sub-basins, allowing it to be a support tool in the management of watersheds and in the public policies development. Keywords: Morphometric indicators; Watershed; Geoprocessing.

## Introdução

A Bacia Hidrográfica, também chamada de bacia fluvial ou bacia de drenagem, é uma compartimentação geográfica e hidrológica delimitada por divisores de água ou divisores topográficos que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, isto

é, num determinado ponto de um curso de água fluvial, também denominado de exutório da Bacia Hidrográfica (Machado e Torres, 2012).

A Bacia Hidrográfica é uma unidade de gestão territorial importante para os estudos ambientais, pois todos os componentes pertencentes a ela como geologia, geomorfologia,

cobertura vegetal, clima e rios estão integrados e interligados e, portanto, qualquer alteração nesses componentes pode impactar esse ambiente (Faustino et al., 2014).

Por isso que analisar o uso e a ocupação do solo, bem como as características morfométricas das bacias hidrográficas tem se mostrado uma das maneiras mais eficientes para a constatação de impactos no ambiente (Machado e Torres, 2012; Santos et al., 2012; Faustino et al., 2014). Ainda, para Santos *et al.* (2012), as características morfométricas das bacias hidrográficas são elementos essenciais para a avaliação do comportamento hidrológico e sua relação com a maximização ou minimização dos impactos ambientais.

O uso de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) para mapear o uso e ocupação do solo bem como extrair informações morfométricas das bacias hidrográficas são fundamentais, pois auxiliam na interpretação do espaço geográfico e obtenção de informações espaciais (Faustino et al., 2014).

Vários estudos científicos utilizaram SIG's para extrair informações morfométricas de bacias hidrográficas e estabelecer uma relação entre esses dados com a preservação ambiental dessas unidades de gestão, como os de Fraga et al. (2014) que determinou as características morfométricas da Bacia Hidrográfica do Rio Catolé Grande, BA, utilizando dados SRTM em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou de Moreli et al. (2014) que caracterizou a morfometria da Sub-Bacia Hidrográfica do córrego Cancã, Venda Nova do Imigrante, ES, visando contribuir para a formulação de propostas de gestão dos recursos naturais. Já Campos et al. (2015) utilizou técnicas geoprocessamento na caracterização morfométrica da microbacia do Ribeirão Descalvado – Botucatu (SP) visando a preservação, racionalização do seu uso e recuperação ambiental, enquanto que, Ferreira et al. (2015) realizou a caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica

do rio Pancas, por meio de dados SRTM e plataforma SIG, visando fornecer informações favoráveis ao gerenciamento e planejamento de seus recursos hídricos.

Portanto, nesse estudo foram levantados alguns parâmetros físicos da Bacia Hidrográfica do Rio Una, buscando caracterizar sua morfometria e correlacionar esses dados com o uso e ocupação do solo e como isso influencia na capacidade desse sistema ambiental de se manter sustentável frente ao uso e manejo imposto pelas atividades antrópicas. Após essa análise construiu-se um Índice de Análise Morfométrica e Aptidão do Uso do Solo e Cobertura Vegetal (IMUS) de fácil aplicação e baixo custo, que integrou os fatores físicos da Bacia Hidrográfica com a aptidão do uso e ocupação do solo e cobertura vegetal em diferentes regiões da Bacia Hidrográfica do Rio Una para avaliação de como as características físicas da Bacia Hidrográfica contribuem para sua sustentabilidade ambiental.

# Metodologia

Caracterização da área de estudo

A área de estudo, denominada Bacia Hidrográfica do Rio Una, faz parte da décima Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Sorocaba e Médio Tietê (UGHRI 10) e está localizada no interior do Estado de São Paulo a aproximadamente 75 km da capital do Estado de São Paulo, no Município de Ibiúna (Figura 1), conforme carta de São Roque SF-23-Y-C-V-2 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1979). O município de Ibiúna está inserido na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS) e possui uma população de 73.309 habitantes com 55.7% dos habitantes residentes na zona rural, segundo dados publicados pela Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados referentes ao ano de 2014 (SEADE, 2015).

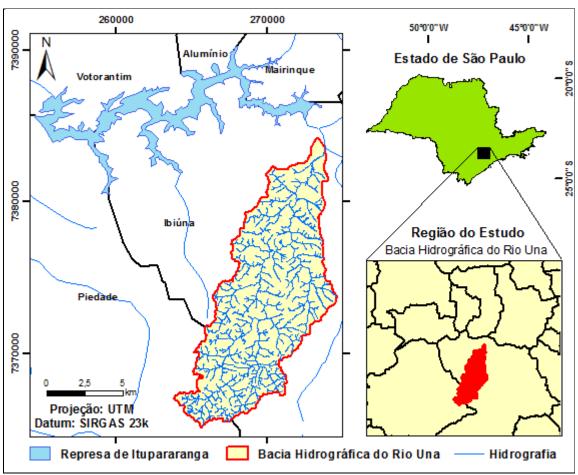


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Una

O Rio Una juntamente com os Rios Sorocabuçu e o Sorocamirim desembocam no reservatório de Itupararanga, o qual possui grande importância regional, sendo o principal manancial de captação de água para o município de Sorocaba e região, além de irrigar centenas de propriedades agrícolas nos arredores. Já o clima predominante na área de estudo é do tipo Cwb, isto é, com verão chuvoso e inverno com estiagem, segundo a classificação de Köeppen, enquanto que, a vegetação original é a ombrófila densa montana (Veloso et al., 1991; Salles, 2008; Sales, 2015).

Uso do Solo e Cobertura Vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Uma

O mapa de uso do solo e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Una foi gerado a partir da análise das imagens de satélite multiespectrais ortorretificadas do sensor SPOT 5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) com resolução espacial de 2,5 metros do ano de 2010 fusionadas (Bandas do Vermelho; Infravermelho Próximo; Verde; Infravermelho Médio), cedidas pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA) da Secretaria do Meio Ambiente do Estado

de São Paulo. Para o tratamento e análise dessas imagens foi utilizado o método de classificação supervisionada multivariada de Máxima Verossimilhança (MAXVER) presente no *software* ArcGIS 10.1.

Na classificação supervisionada, o analista seleciona as amostras de treinamentos que são representativas das classes a serem mapeadas, sendo que o agrupamento (ou *clustering*) é feito automaticamente pelo sistema, o qual identifica as nuvens de *pixels* que apresentam respostas espectrais semelhantes às amostras selecionadas, no caso do classificador paramétrico MAXVER, este classifica os agrupamentos de pixels considerando a ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais de classe definida na seleção (Lillesand et al., 2004).

As classes do mapa de uso do solo e cobertura vegetal da área de estudo foram divididas em Pastagens, Matas (Área Florestal), Lagos, Edificações Urbanas, Edificações Rurais, Campos Sujos, Agriculturas de longo período (culturas perenes) e Agricultura de curto período (culturas temporárias), de acordo com os níveis I e II presentes no Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), com exceção das áreas com

edificações urbanas que foram divididas em Edificações Urbanas e Rurais de acordo com a classificação dos setores censitários presentes no Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2012) e os Campos Sujos que foram introduzidos de acordo com o mapeamento realizado por Vaeza *et al.* (2010) e Detoni (2011). Além disso, foi identificado a Estação de Tratamento de Esgoto e o Aterro Sanitário do município de Ibiúna presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Una.

Para processar as imagens do SPOT 5 foi gerada uma imagem falsa cor com a composição das bandas nos comprimentos de ondas do Infravermelho Próximo, Infravermelho Médio e Vermelho respectivamente. Essa composição destaca a vegetação e os corpos hídricos dos demais tipos de usos e, portanto, facilita na extração desses usos do solo para compor o mapa de uso e ocupação do solo e cobertura vegetal (Florenzano, 2002). Portanto, essa composição de bandas foi utilizada para extrair essas feições.

As áreas com presença de edificações rurais e urbanas, bem como as áreas agrícolas com presença de culturas temporárias e permanentes, foram extraídas manualmente sobre uma composição colorida das imagens do SPOT 5, as quais foram identificadas com a ajuda das imagens do *Google Earth*.

As demais áreas foram classificadas como pastagens e campos sujos, estes últimos representam as áreas aparentemente desprovidas de cuidados e com cobertura do solo variável, composta por plantas arbustivas e subarbustos, plantas rasteiras e solos expostos, conforme destacam Vaeza et al. (2010) e Detoni (2011) em seus estudos de mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal. Essa classificação se deu manualmente com o auxílio das imagens coloridas do SPOT 5 e com auxílio das imagens do *Google Earth*.

Os arquivos vetoriais gerados no ArcGIS foram exportados para o *Google Earth* para retificação das áreas e atualização da situação do uso do solo e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Una, uma vez que, as imagens do SPOT 5 são de 2010. Além disso, foram realizados vários trabalhos de campo para confirmar as classes de uso do solo e cobertura vegetal extraídas.

Definição das Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Uma

O sistema de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Una, que é constituído pelo curso d'água principal e seus tributários ou afluentes, foi extraído de cartas planialtimétricas do Instituto Geográfico Cartográfico (IGC) na escala 1:10.000 e digitalizado no ArcGIS 10.1.

Para definir o número de Sub-Bacias Hidrográficas foi identificado, primeiramente, a ordem dos cursos da água da Bacia Hidrográfica, isto é, o grau de ramificação ou bifurcação do sistema de drenagem da Bacia Hidrográfica (TuccI, 2001). Para isso, foram utilizados os critérios introduzidos por Strahler (1952), no qual para os cursos d'água sem tributários é adotada a ordem "1", ou primeira ordem, enquanto que, os cursos de água de segunda ordem originam-se da confluência de dois cursos de água de primeira ordem, podendo ter tributários também de primeira ordem; os cursos de água de terceira ordem originam-se da confluência de dois cursos de água de segunda ordem, podendo receber tributários de segunda e primeira ordens e assim sucessivamente (Silva et al., 2004). A ordem da Bacia Hidrográfica é determinada pelo curso de água de ordem maior.

Identificado a ordem do curso de água principal da Bacia Hidrográfica do Rio Una, as Sub-Bacias Hidrográficas foram determinadas como sendo as que apresentavam um curso de água com uma ordem inferior ao do curso da água principal, além das que apresentavam a mesma ordem do curso de água principal onde houvesse uma confluência entre o curso de água principal e o curso de água com uma ordem imediatamente inferior, baseado em seus divisores topográficos internos.

Para determinar os divisores topográficos das Sub-Bacias Hidrográficas foi necessário interpolar os dados de elevação do terreno extraídos de cartas planialtimétricas do Instituto Geográfico Cartográfico (IGC) na escala 1:10.000 e pontos cotados coletados em campo com o GPS de navegação da marca *Garmim* modelo *Etrex Vista* pelo método de interpolação TIN (*Triangulated Irregular Network*) que consiste em uma estrutura poliédrica cujos elementos básicos são triângulos (Felgueiras, 2001).

Posteriormente, foram eliminadas distorções ou falhas da interpolação, por meio do preenchimento das depressões utilizando o comando Fill presente no módulo Hidrology do ArcGIS 10.1 de modo a gerar uma superfície contínua e hidrologicamente correta com células (pixels) de 1m de resolução espacial. A partir dessa superfície gerada foi possível extrair automaticamente as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una por meio do módulo *Hidrology* do ArcGIS 10.1, uma vez que, já se conhecia os exutórios de cada sub-Bacia Hidrográfica definidos anteriormente.

Determinação dos parâmetros morfométricos e de aptidão do uso do solo e cobertura vegetal do IMUS

Segundo Teodoro et al. (2007), após a delimitação das Sub-Bacias Hidrográficas é possível obter diferentes parâmetros morfométricos relacionados com a geometria e drenagem das sub-bacias hidrográficas. Alguns desses parâmetros morfométricos serão descritos a seguir e utilizados no estudo das Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una. Ressalta-se que todos os morfométricos parâmetros das Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una foram obtidos por meio de processamentos executados no ArcGIS 10.1.

Segundo Villela e Mattos (1975), a forma superficial de uma bacia é um importante parâmetro morfométrico, pois possibilita identificar o tempo de concentração, a partir do inicio da precipitação, necessário para que toda a água dentro dos limites da Bacia Hidrográfica ao exutório desta. Existem vários indicadores utilizados para determinar a forma da Bacia Hidrográfica correlacionando-os sempre com figuras geométricas como é caso do coeficiente de compacidade, fator de forma e o índice de circularidade, sendo que este último será adotado para o estudo das formas geométricas das Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una (Machado e Torres, 2012).

O Índice de Circularidade (Ic) é um parâmetro que avalia a forma da Bacia Hidrográfica e tende para o valor igual à medida que a Bacia Hidrográfica se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada. Segundo Machado e Torres (2012) o Ic é a relação existente entre a área de uma Bacia Hidrográfica com área de um círculo que tem a mesma dimensão que o perímetro da Bacia Hidrográfica. Ainda, segundo Machado e Torres (2012), as bacias hidrográficas mais circulares apresentam maior probabilidade de provocarem enchentes súbitas no curso de água principal provocadas por precipitações intensas que bacias hidrográficas alongadas, pois a água procedente das vertentes e dos tributários que chegam ao curso água principal tende à simultaneidade, concentrando-se num curto espaço de tempo gerando um pico de vazão ou deflúvio. O Ic para cada Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Una foi calculado utilizando-se a Equação (1).

$$Ic = \frac{4\pi A_{sub}}{P^2} \tag{1}$$

Onde:

P é o comprimento da Sub-Bacia Hidrográfica (m);

 $A_{sub}$  é a área de drenagem da sub-Bacia Hidrográfica (m<sup>2</sup>).

O Ic foi adaptado para ser utilizado no cálculo do IMUS, pois o valor igual a 1 representa uma situação ruim, enquanto que, o valor igual a 0 representa uma situação boa. Assim, calculou-se o Índice de Circularidade Adaptado (Ic<sub>ad</sub>) conforme a Equação (2), onde o valor igual a 0 representa uma situação ruim e o valor igual a 1 representa uma situação desejável.

$$Ic_{ad} = 1 - Ic \tag{2}$$

O coeficiente de compacidade (Kc) é a relação entre o perímetro de uma Bacia Hidrográfica e a circunferência de um círculo de área igual ao da Bacia Hidrográfica. Segundo Villela e Mattos (1975), esse coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da Bacia Hidrográfica e indica a susceptibilidade da mesma à enchentes, uma vez que, quanto mais próximo o valor de Kc de 1, mais circular é a Bacia Hidrográfica e, consequentemente, mais suscetível a enchentes, entretanto, quanto maior o valor de Kc, mais alongada é a Bacia Hidrográfica e menor é a susceptibilidade à enchente. O Kc foi determinado baseado na seguinte Equação (3):

$$Kc = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \tag{3}$$

Onde

P é o perímetro da sub-Bacia Hidrográfica (m); A é a área de drenagem da sub-Bacia Hidrográfica (m²).

Segundo Mello e Silva (2013), as bacias hidrográficas que apresentam valor de Kc inferiores a 1,25 apresentam alta propensão a grandes enchentes, enquanto que, as que apresentam valores acima de 1,50 possuem tendência a conservação, não sujeita a enchentes. Visto isso, os valores de Kc foram escalonados e classificados segundo a Equação (4) para que seus valores variem de 0 a 1, onde o valor 1 representa a Bacia Hidrográfica com tendência a conservação e 0 as bacias hidrográficas com propensão a grandes enchentes.

$$Kc_{ad} = \begin{cases} \mathbf{0} & para \ Kc \le 1,25 \\ \mathbf{4} \times \mathbf{Kc} - \mathbf{5} & para \ 1,25 < Kc < 1,50 \\ \mathbf{1} & para \ Kc \ge 1,50 \end{cases} \tag{4}$$

Onde:

 $Kc_{ad}$  é o indicador do coeficiente de compacidade adaptado para variar de 0 a 1;

Kc é o coeficiente de compacidade.

A forma da Bacia Hidrográfica, bem como a forma do sistema de drenagem, pode atuar sobre alguns processos hidrológicos e também no comportamento hidrológico. Para interpretar a forma da bacia, utiliza-se o fator de forma (Kf) que relaciona a forma da Bacia Hidrográfica com a de um retângulo, correspondendo à razão entre a largura média e o comprimento axial da Bacia Hidrográfica (L). Segundo Villela e Mattos (1975), uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior. O fator de forma (Kf) foi determinado, utilizando-se a seguinte Equação (5).

$$Kf = \frac{A}{L^2} \tag{5}$$

Onde:

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

A é a área de drenagem da sub-Bacia Hidrográfica (m²).

Segundo Mello e Silva (2013), as bacias hidrográficas que apresentam valor de Kf no intervalo de 0,75 a 1 apresentam alta propensão a grandes enchentes, enquanto que, bacias hidrográficas com valores abaixo de 0,50 apresentam tendência a conservação, não sujeita a enchentes. Visto isso, os valores de Kf foram escalonados e classificados segundo a Equação (6) para que seus valores variem de 0 a 1, onde o valor 1 representa as bacias hidrográficas com tendência a conservação e 0 as bacias hidrográficas com propensão a grandes enchentes.

$$Kf_{ad} = \begin{cases} \mathbf{0} & para \ Kf \ge 0.75 \\ -\mathbf{4} \times \mathbf{Kf} + \mathbf{3} & para \ 0.75 < Kf < 0.50 \\ \mathbf{1} & para \ Kf \le 0.50 \end{cases}$$
(6)

Onde:

 $Kf_{ad}$  é o indicador do fator de forma adaptado para variar de 0 a 1;

Kf é o fator de forma.

A Densidade de Drenagem (Dd) é outro parâmetro de grande relevância para estudar a Bacia Hidrográfica, pois expressa pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os cursos de água fluviais (sejam eles perenes, intermitentes ou temporários) e a área total da bacia, isto é, informa o comprimento (em km) de curso de água fluvial disponível para drenar cada unidade de área da Bacia Hidrográfica (em km²). Seu estudo informa a velocidade com que a água deixa a Bacia Hidrográfica, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia.

Segundo Machado e Torres (2012), ao avaliar a Dd de uma Bacia Hidrográfica pode-se conhecer o potencial da mesma e suas Sub-Bacias Hidrográficas em permitir um maior ou menor escoamento superficial da água e, consequentemente, a capacidade de remoção de sedimentos desse sistema. A densidade de drenagem (Dd) para cada sub-Bacia Hidrográfica do Rio Una foi determinada pela Equação (7).

$$Dd = \frac{Lt}{A_{sub}} \tag{7}$$

Onde:

Lt é o comprimento total dos cursos de água fluviais da sub-Bacia Hidrográfica (km);

 $A_{sub}$  é a área de drenagem da sub-Bacia Hidrográfica (km²).

Segundo Villela e Mattos (1975) os valores para a densidade de drenagem variam de 0,5km/km<sup>2</sup> para bacias hidrográficas com drenagem pobre a 3,5km/km<sup>2</sup> ou mais para bacias hidrográficas excepcionalmente bem drenadas. A partir dessa informação, os valores de Dd obtidos para as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una foram classificados segundo a Equação (8), visto que neste estudo avaliou-se a quantidade de água ofertada e a capacidade de drenagem das bacias hidrográficas, não levando em consideração a capacidade de remoção de sedimentos dessas subbacias hidrográficas, por isso, que os valores próximos a 0 representam uma condição indesejável e os valores próximos a 1 representam uma condição desejável.

$$Dd_{ad} = \begin{cases} \mathbf{0} & para \ \mathbf{Dd} \leq 0.5km/km^2 \\ \mathbf{\frac{1}{3}} \times \mathbf{Dd} - \mathbf{\frac{1}{6}} & para \ 0.5km/km^2 < \mathbf{Dd} < 3.5km/km^2 \\ \mathbf{1} & para \ \mathbf{Dd} \geq 3.5km/km^2 \end{cases}$$
(8)

Onde:

 $Dd_{ad}$  é o indicador de densidade de drenagem adaptada da sub-Bacia Hidrográfica para variar de 0 a 1;

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

O Coeficiente de Rugosidade (*Ruggdeness Number* – RN) é um parâmetro que direciona o uso potencial dos solos em bacias hidrográficas, determinando a aptidão das áreas em função de

suas características, para atividades de agricultura, pecuária, silvicultura, florestamento ou para preservação permanente.

Para esse estudo, o Coeficiente de Rugosidade foi determinado pela multiplicação da declividade média encontrada em cada ponto (pixel) da sub-Bacia Hidrográfica, como propõe a formulação original, pelo valor numérico da densidade de drenagem, como pode ser visto pela Equação (9). Essa equação foi adaptada ao ambiente do ArcGIS 10.1 utilizando a ferramenta *Map Algebra* que possibilitou efetuar essa operação algébrica na imagem matricial de declividade e densidade de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Una.

$$RN = D \times Dd \tag{9}$$

#### Onde:

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

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

Quanto maior for o valor do RN, maior o risco de erosão. Em função disso, Rocha e Kurtz (2001) estabeleceu quatro classes de coeficientes, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Classes de aptidão do uso do solo de acordo com o RN

Tipos de Classes	Aptidão do uso dos solos
А	Agricultura
В	Pastagem/Pecuária
С	Pastagem/Florestamento
D	Florestamento

Fonte: Rocha e Kurtz (2001).

Para se caracterizar o "Uso Potencial dos Solos" nas quatro classes definidas por Rocha e Kurtz (2001) foi calculado o Intervalo de Classe (IC) referente aos coeficientes de rugosidades de classe conforme a Equação (10).

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

Onde:

RN<sub>maior</sub> é maior valor de RN encontrado na sub-Bacia Hidrográfica;

RN<sub>menor</sub> é menor valor de RN encontrado na sub-Bacia Hidrográfica.

Para definição dos intervalos de domínios das classes de RN's, iniciou-se com a classe inferior, a fim de incluir o menor valor de RN, após isso, acrescenta-se o valor do intervalo de classe (IC), definindo-se deste modo o limite superior do intervalo. A partir da determinação das classes elaborou-se o mapa do uso potencial do solo utilizando-se o software ArcGIS 10.1.

Em seguida, utilizou-se a função *overlay* nos mapas de uso do potencial solo e de uso do solo e cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica visando identificar áreas que apresentavam a ocupação do solo de acordo com o uso potencial do solo e as que se encontravam em desconformidades com a aptidão do uso potencial do solo, excetuando dessa análise as áreas ocupadas por construções urbanas e rurais, além de lagos e açudes.

Para calcular o Índice do Coeficiente de Rugosidade Adaptado (*ICR<sub>ad</sub>*) para cada sub-Bacia Hidrográfica para compor o IMUS foi considerado a relação entre as áreas em conformidades de uso e ocupação do solo com o uso potencial do solo pela área total da sub-Bacia Hidrográfica conforme a Equação (11).

$$ICR_{ad} = \frac{A_{conf}}{A_{cub}} \tag{11}$$

Onde:

A<sub>conf</sub> é a área em conformidade de uso e ocupação do solo com o uso potencial do solo da sub-Bacia Hidrográfica (m²);

 $A_{sub}$  é a área de drenagem total da sub-Bacia Hidrográfica (m²) sem a presença das classes compostas por edificações urbanas e rurais e os lagos e açudes.

Construção do Índice de Análise Morfométrica e Aptidão do Uso do Solo e Cobertura Vegetal

Não foi identificado nenhum indicador que tenha um peso superior em comparação aos outros, por isso, o Índice de Análise Morfométrica e Ocupação (IMUS) foi calculado a partir de uma média aritmética simples dos indicadores morfométricos e de ocupação conforme a Equação (12)

$$IMUS = \left(\sum_{i=1}^{5} V_i\right) / 5 \tag{12}$$

Onde:

 $V_i$  representa os indicadores morfométricos e de ocupação ( $Ic_{ad}$ ,  $Kf_{ad}$ ,  $Kc_{ad}$ ,  $Dd_{ad}$  e  $ICR_{ad}$ ).

## Resultados e discussão

A Tabela 2 mostra a distribuição quantificada em áreas e em porcentagens do total das classes de uso e ocupação do solo e cobertura vegetal, enquanto que, a Figura 2 mostra o mapa de Uso e Ocupação do Solo e Cobertura Vegetal da área de estudo.

Tabela 2. Classes de Uso do Solo e Cobertura Vegetal distribuídas na área de estudo

Classes de uso do solo	Área por classes (ha)	% do Total			
Agricultura de curto período	2204,0	22,86			
Agricultura de longo período	229,3	2,38			
Aterro Sanitário	4,9	0,05			
Campos Sujos	1009,6	10,47			
Edificações Rurais	773,9	8,03			
Edificações Urbanas	272,6	2,83			
ETE	3,3	0,03			
Lagos, represas e açudes	63,0	0,65			
Matas	3945,0	40,91			
Pastagem	1136,4	11,79			
Área Total (ha)	9642				

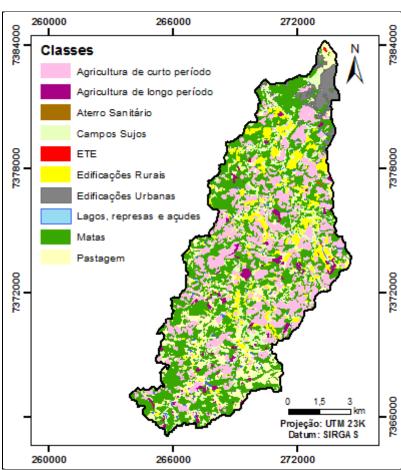


Figura 2. Uso e Ocupação do Solo e Cobertura Vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Una

A classe de uso do solo e cobertura vegetal mais presente ao longo da Bacia Hidrográfica é de matas (área florestal), que corresponde

aproximadamente a 41% da área de estudo, o que indica que a Bacia Hidrográfica está bem preservada. Porém, a área ocupada por agricultura

de curto período (culturas temporárias) relativamente alta corresponde e aproximadamente 23% da área de estudo, indicando que a Bacia Hidrográfica predominantemente rural e está sujeita a processos erosivos devido à rotatividade de culturas em expor o solo a processos erosivos de origem hídrica.

A classe de área urbana corresponde a aproximadamente 3% da área de estudo e indica que os impactos provenientes das atividades humanas desenvolvidas em centros urbanos são relativamente baixos, uma vez que, a população

urbana do município é pequena e uma parte considerável dessa área está localizada em outra Bacia Hidrográfica.

A Tabela 3 apresentam as classes de uso do solo e cobertura vegetal presentes em cada sub-Bacia Hidrográfica em porcentagem, o que possibilita caracterizar cada sub-Bacia Hidrográfica quanto às atividades predominantes em seus limites 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 3. Classes de uso do solo e cobertura vegetal por Sub-Bacias Hidrográficas em %

Classes	Área por classes das Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Agricultura de curto período	11,8%	9,9%	29,6%	31,0%	30,7%	38,7%	16,3%	40,4%	15,2%	11,4%	13,6%
Agricultura de longo período	0,7%	1,8%	0,8%	3,9%	2,8%	1,0%	2,5%	2,2%	1,8%	4,8%	3,5%
Aterro Sanitário	-	-	0,8%	-	-	-	-	-	-	-	-
Campos Sujos	12,0%	15,5%	13,6%	10,0%	14,6%	3,9%	6,6%	9,5%	14,0%	5,1%	4,2%
Edificações Rurais	6,9%	17,1%	16,8%	8,4%	13,2%	1,6%	4,5%	9,3%	4,8%	3,1%	1,8%
Edificações Urbanas	21,4%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETE	0,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lagos e açudes	0,5%	0,5%	1,1%	0,5%	0,9%	0,7%	0,4%	0,9%	0,5%	0,7%	1,0%
Matas	38,6%	49,5%	35,5%	41,0%	34,2%	44,3%	47,3%	29,3%	34,9%	53,3%	54,9%
Pastagem	7,8%	5,8%	1,7%	5,1%	3,6%	9,9%	22,3%	8,4%	28,7%	21,6%	21,0%

Ao analisar a Tabelas 3 percebe-se que as Sub-Bacias Hidrográficas 6 e 8 são as que apresentam a maior taxa de ocupação por culturas temporárias com aproximadamente 40% de suas áreas ocupadas e, provavelmente, são as mais susceptíveis a erosão. Percebe-se, também, que a Sub-Bacia Hidrográfica é a que apresenta a menor taxa de ocupação por matas (áreas florestais), resultado das atividades antrópicas para a geração de alimentos.

As Sub-Bacias Hidrográficas mais preservadas são a 10 e a 11 com aproximadamente 54% de seus territórios ocupados por matas, entretanto, apresentam altas taxas de ocupação por pastagens em comparação com as outras sub-bacias hidrográficas, com exceção para as Sub-Bacias Hidrográficas de número 7 e 9. Portanto, as Sub-Bacias Hidrográficas 10 e 11 são a princípio as

menos propensas a processos erosivos e degradação dos recursos hídricos, pois apresentam uma boa parte de seus territórios cobertos por área florestal.

A Bacia Hidrográfica do Rio Una apresenta o curso de água principal classificado como de quinta ordem, isto é, o Rio Una é de quinta ordem, portanto, as Sub-Bacias Hidrográficas presentes na área de estudo apresentam seus cursos de água principal classificados como de 4ª ordem ou 5ª ordem.

De acordo, com a metodologia adotada foi possível identificar 11 Sub-Bacias Hidrográficas na área de estudo como pode ser visualizado na Figura 3 que apresenta, além dos limites das subbacias hidrográficas, a ordem de todos os cursos de água segundo a classificação proposta por Strahler (1952).

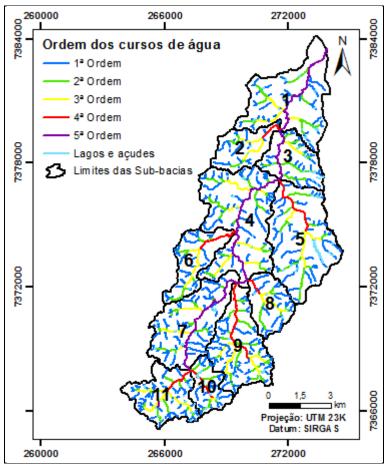


Figura 3. Classificação da ordem dos cursos de água da Bacia Hidrográfica do Rio Uma

Os cursos de água presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Una possuem uma extensão total 277,09 km. Como esta Bacia Hidrográfica tem uma área de aproximadamente 96,5km², calculouse a sua Densidade de Drenagem que equivale a 2,9km/km², o que indica, segundo Beltrame (1994), a uma Bacia Hidrográfica com alta densidade de drenagem, enquanto que, o curso de água principal tem aproximadamente 27,7km de extensão.

Os cursos de água de primeira ordem apresentam um comprimento total de 142,68km, isto é, são os que apresentam a maior frequência, ou seja, correspondem a 71,9% do número total de rios da Bacia Hidrográfica. Estes além de contribuírem com a maior extensão são responsáveis por englobarem as 424 nascentes da área em estudo. As nascentes são de extrema

importância para a manutenção da rede de drenagem dos cursos de água, no entanto, algumas se encontraram em propriedades particulares de pequenos agricultores e carecem de um plano de manejo para garantir sua proteção e conservação.

O comprimento médio dos cursos de água presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Una é de aproximadamente 0,47km, sendo que o curso de água de primeira ordem é o que apresenta o maior comprimento médio, igual a 24,37km, enquanto que, os cursos de água de primeira ordem foram os que apresentaram o menor comprimento médio, igual a 0,34km.

A Figura 4 apresenta a distribuição dos valores do parâmetro  ${\rm Ic}_{ad}$  para as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una.

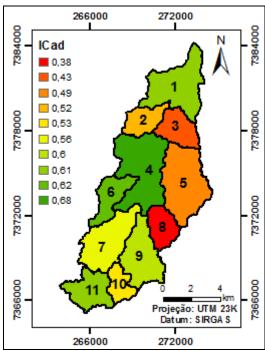


Figura 4. Distribuição Ic<sub>ad</sub> por Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una

Ao analisar os dados do parâmetro Ic<sub>ad</sub> percebe-se que as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una têm formas circulares e propensão a ocorrências de enchentes, pois nenhuma apresentou valores acima de 0,7. A sub-Bacia Hidrográfica de número 8 é a que tem a maior

propensão a enchentes, enquanto que, a sub-Bacia Hidrográfica de número 4 é a que tem a menor propensão a enchentes.

A Figura 5 apresenta a distribuição dos valores do parâmetro  $Kc_{ad}$  para as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una.

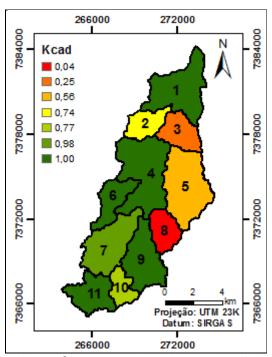


Figura 5. Distribuição kc<sub>ad</sub> por Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una

Os valores do parâmetro  $Kc_{ad}$  de forma das Sub-Bacias Hidrográficas também evidenciaram a sub-Bacia Hidrográfica de número 8 como a mais propensa a enchentes, enquanto que,

as Sub-Bacias Hidrográficas de números 1, 4, 6, 9 e 11 não apresentam tendência a enchentes.

A Figura 6 também apresenta outro parâmetro de forma, o indicador do coeficiente do fator de forma adaptado ( $Kf_{ad}$ ).

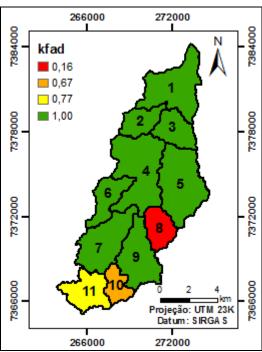


Figura 6. Distribuição  $Kf_{ad}$  por Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una

Novamente, a sub-Bacia Hidrográfica de número 8 apresentou o pior valor de forma dentre as Sub-Bacias Hidrográficas estudas, evidenciando que esta sub-Bacia Hidrográfica apresenta características físicas que a torna vulnerável a ações antrópicas, portanto, deve apresentar um plano de manejo eficaz que garanta a sua sustentabilidade.

Entretanto, a sub-Bacia Hidrográfica de número 11 foi a que apresentou em todos os indicadores, valores considerados bons, porém, nesse caso, não apresentou o mesmo desempenho, contudo não é um valor ruim. A diferença dos valores se deve ao fato deste indicador comparar a forma da sub-Bacia Hidrográfica a um retângulo, enquanto que, os outros parâmetros morfométricos correlacionam a forma da sub-Bacia Hidrográfica à círculos.

A Figura 7 apresenta os valores do parâmetro de densidade de drenagem (Dd<sub>ad</sub>) aplicado às Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una.

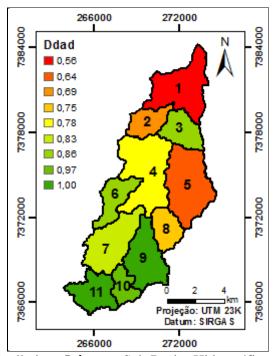


Figura 7. Distribuição  $Dd_{ad}$  por Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una

As Sub-Bacias Hidrográficas de número 9 e 11 são excepcionalmente bem drenadas, o que carece de uma área maior de matas ripárias para sua conservação e, consequentemente, necessitam de mais preservação de suas áreas florestais. A sub-Bacia Hidrográfica que apresentou o menor valor foi a de número 1 localizada na área urbana do município de Ibiúna, provavelmente devido a ocupação humana intensa nessa, muitos dos tributários do Rio Una podem ter sido perdidos nesse processo de urbanização do centro de Ibiúna

e também porque é uma área com baixa declividade, o que sinaliza uma área de inundação e de baixo ravinamento provocado pelo erosão hídrica.

A Figura 8 apresenta o mapa do Coeficiente de Rugosidade (RN), o qual direciona o uso potencial dos solos nas sub-bacias hidrográficas, determinando a aptidão das áreas em função de suas características, para atividades de agricultura, pecuária, silvicultura, florestamento ou para preservação permanente.

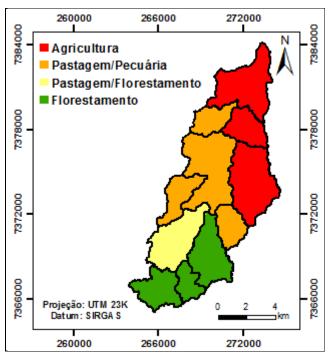


Figura 8. Mapa das classes de aptidão do uso do solo de acordo com o RN

Pode-se observar que a região central e sul da Bacia Hidrográfica do Rio Una estão aptas as práticas de agricultura e pastagens, somente uma pequena parcela da Bacia Hidrográfica localizada ao norte da mesma é indicada como área para a preservação, a qual corresponde aproximadamente a 21,5% da área total de estudo.

A Figura 9 apresenta os valores do ICR<sub>ad</sub> para as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una. Percebe-se que a região nordeste da Bacia Hidrográfica apresenta os menores valores para o

ICR<sub>ad</sub>, isso porque é uma área apta a preservação e há presença de culturas agrícolas. Aproximadamente 51% da área de estudo apresentam valores superiores a 0,8, isto é, apresenta mais de 80% de sua área correspondente a aptidão do uso e ocupação do solo. A sub-Bacia Hidrográfica de número 9 foi a que apresentou o menor valor e igual a 0,37, ou seja, somente 37% de sua área está de acordo com a aptidão do uso e ocupação do solo.

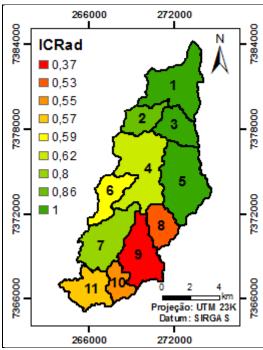


Figura 9. Distribuição ICR<sub>ad</sub> por Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una

A Figura 10 apresenta a distribuição dos valores do Índice de Análise Morfométrica e

Ocupação (IMUS) para as Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una.

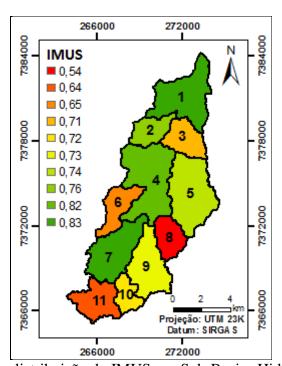


Figura 10. Mapa com a distribuição do IMUS por Sub-Bacias Hidrográficas do Rio Una

Todos os valores estão acima de 0,54, porém há poucas Sub-Bacias Hidrográficas com valores acima de 0,8, isto é, com valores desejáveis. A região nordeste foi a que apresentou os menores valores, influenciada especialmente pelos valores do  $ICR_{ad}$  e do  $Kf_{ad}$  em menor intensidade. A sub-Bacia Hidrográfica de número 1 que abriga a zona urbana do município, do ponto

de vista de suas características físicas, foi a que apresentou o melhor resultado e igual a 0,83, justificando a sua ocupação por atividades antrópicas.

Portanto, as Sub-Bacias Hidrográficas de números 8, 9, 10 e 11, por sua localização geográfica, são as que carecem de maior atenção quanto à gestão dessas áreas, uma vez que, todas

são vizinhas entre si e susceptíveis do ponto de vista de suas características físicas.

#### Conclusão

A utilização do ArcGIS 10.1 para a construção do IMUS demonstrou-se bastante eficaz, e possibilitou obter dados morfométricos coerentes com dados obtidos por outros autores que utilizaram outros *softwares* em ambiente de SIG's (Campos et al., 2015; Ferreira et al., 2015)

Os valores obtidos para os indicadores morfométricos demonstram que a bacia apresenta características físicas desejáveis quanto a vulnerabilidade a processos erosivos, entretanto, o uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica contrasta com a aptidão calculada na região nordeste da bacia apresentando baixos valores, o que refletiu no valor final do IMUS.

O IMUS se mostrou um importante instrumento para a análise das características morfométricas e uso e ocupação do solo para a previsão de enchentes e controle susceptibilidade à erosão das sub-bacias hidrográficas, podendo ser uma ferramenta fundamental de apoio na gestão de bacias hidrográficas servir de suporte e desenvolvimento de políticas públicas que buscam garantir a sustentabilidade dessa importante unidade gerencial que são as bacias hidrográficas.

# Agradecimentos

A Fundação Instituto de Pesquisas Tecnológicas - FIPT pelo apoio financeiro desta pesquisa.

# Referências

- Beltrame, A. V., 1994. Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas modelo e aplicação. Florianópolis, UFSC, 112 p.
- Campos, S.; Felipe, A. C.; Campos, M.; Reche, A. M., 2015. Geoprocessamento aplicado na caracterização morfométrica da microbacia do Ribeirão Descalvado—Botucatu, SP. IRRIGA 1, 52.
- Detoni, S. F., 2011. Evolução do uso do solo e da cobertura vegetal na região da Serra do Boturuna, Estado de São Paulo. Revista do Departamento de Geografia 20, 51-61.
- Faustino, A. B.; Ramos, F. F.; Silva, S. M. P., 2014. Dinâmica temporal do uso e cobertura do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (RN) com base em sensoriamento remoto e SIG: uma contribuição aos estudos ambientais. Sociedade e Território 26, 18-30.
- Felgueiras, C. A., 2001. Modelagem numérica de terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C. e

- MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Ferreira, R.; Moura, M.; Castro, F., 2015. Uso de plataforma SIG na caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Pancas—Brasil. Nativa 3, 210-216.
- Florenzano, T. G., 2002. Imagens de Satélite para estudos ambientais. São Paulo: Oficina de Textos.
- Fraga, M. S.; Ferreira, R. G.; Silva, F. B.; Vieira, N. P.
  A.; Silva, D. P.; Barros, F. M.; Martins, I. S. B.,
  2014. Caracterização Morfométrica da Bacia
  Hidrográfica do Rio Catolé Grande, Bahia, Brasil.
  Nativa 2, 214-218.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2012. Base Estatcart de Informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por Setor Censitário. Rio de Janeiro: IBGE. CD-ROM.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.,
  1979. Biblioteca. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível
  em: <a href="http://biblioteca.ibge.gov.br/">http://biblioteca.ibge.gov.br/</a>. Acesso em:
  13 de outubro 2015.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.,2013. Manual Técnico de Uso da Terra. 3 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 171 p.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.: Chipman, J. W., 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. Nova York: John Wiley & Sons.
- Machado, P. J. O.; Torres, F. T. P., 2012. Introdução à hidrogeografia. São Paulo: Cengage Learning.
- Mello, C. R.; Silva, A. M., 2013. Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. 1.ed. Lavras: Editora UFLA, 455p.
- Moreli, A. P.; Pereira, D. P.; Silva, S. F., 2014. Caracterização morfométrica da sub-Bacia Hidrográfica do córrego Cancã, município de Venda Nova do Imigrante - ES, Brasil. Nucleus v. 11, 385-395.
- Rocha, J. S. M.; Kurtz, S. M. J. M., 2001. Manual de Manejo Integrado de bacias Hidrográficas. Santa Maria: Editora da UFSM, 282 p.
- Sales, J. C. A., 2015. Metodologia para identificação de áreas de risco e prioritárias para conservação da avifauna na Bacia Hidrográfica do rio Una, Ibiúna/SP. 2015. 131 f. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Sorocaba.
- Salles, M. H. D.; Conceição, F. T.; Angelucci, V. A.;
  Sia, R.; Pedrazzi, F. J. M.; Carra, T. A.; Navarro,
  G. R. B., 2008. Avaliação Simplificada de Impactos Ambientais na Bacia do Alto Sorocaba (SP). Revista de estudos ambientais 10, 6-20.
- Santos, D. B.; Vidotto, M. L.; Bertinatto, R.; Souza Marcon, G. R., Frigo, E. P., 2012. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio São José, Cascavel, PR. Applied Research & Agrotechnology 5, 7-18.

- SEADE Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. 2015. Informação dos Municípios Paulistas (IMP). Disponível em: < <u>GS Search</u>
- />. Acesso em: 14 Out. 2015.
- Silva, A. M.; Schulz, H. E.; Camargo, P. B., 2004. Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas. São Carlos-SP. Editora Rima.
- Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. Geological Society of America Bulletin 63, 1117-1142.
- Teodoro, V. L. I.; Texeira, D.; Costa, D. J. L.; Fuller, B. B., 2007. O conceito de Bacia Hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. Revista Uniara 20, 137-156.
- Tucci, C. E. M., 2001. Hidrologia: ciência e aplicação.

- Porto Alegre, RS: Editora da Universidade (UFRGS)/Edusp/ABRH, 943p.
- Vaeza, R. F.; Oliveira Filho, P. C.; Maia, A. G.; Disperati, A. A., 2010. Uso e ocupação do solo em Bacia Hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução. Floresta e Ambiente 17, 23-29.
- Veloso, H. P., Rangel Filho, A. L. R. Lima, J. C. A., 1991. Classificação da Vegetação Brasileira Adaptada a um Sistema Universal. Ministério da Economia, Fazenda e Planejamento, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais.
- Villela, S. M.; Mattos, A., 1975. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p.