

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO MARINHEIRO, SETE LAGOAS - MG

Morphometric Characterization of the Marinheiro Creek Watershed, Sete Lagoas - MG (Brazil)

Hugo Henrique Cardoso Salis*
Adriana Monteiro da Costa**
João Herbert Moreira Viana***
Azeneth Eufrausino Schuler****

***Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG / Belo Horizonte, Minas Gerais**
hugohcsalis@gmail.com

****Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG / Belo Horizonte, Minas Gerais**
drimonteiroc@yahoo.com.br

*****Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo / Sete Lagoas, Minas Gerais**
joao.herbert@embrapa.br

******Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Embrapa Solos / Rio de Janeiro**
marysolschuler@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização morfológica da bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG, utilizando-se ferramentas de geoprocessamento, como subsídio à sua análise hidroambiental. O método foi desenvolvido em três etapas principais, quais sejam: i) Pré-processamento do MDE; ii) Delineamento hidrológico; e iii) Cálculo de parâmetros morfológicos da bacia do Córrego do Marinheiro. Foi possível verificar que a Densidade hidrográfica (Dh) calculada para a Bacia do Córrego do Marinheiro foi de 2,7 un.km⁻², ou seja, a cada quilômetro quadrado existem 2,7 canais. A declividade média encontrada na bacia do Córrego do Marinheiro foi de 13%, valor condizente com o relevo do tipo ondulado. A bacia pode ser classificada como de 3ª ordem, além de apresentar sistema de drenagem do tipo dendrítica. O Índice de sinuosidade (IS) calculado foi de 20,6%, valor que classifica o Córrego Marinheiro como reto. Os valores de declividade do álveo encontrados foram de S1 igual a 0,03 m.m⁻¹; S2 igual a 0,008 e S3 igual a 0,011. Concluiu-se que, de acordo com os parâmetros de geometria da bacia Kc (coeficiente de compacidade), Kf (fator de forma), Re (razão de alongação) e IC (índice de circularidade), na bacia há pouca tendência à ocorrência de inundações, em condições normais de precipitação, devido à sua forma alongada. Para aprimorar a caracterização das linhas de drenagem indicadas no MDE, são recomendados estudos mais detalhados, com medidas em campo e monitoramento dos canais, que permitam a diferenciação entre os cursos d'água perenes, intermitentes e efêmeros e as ravinas secas.

Palavras-chave: Análise ambiental. Geoprocessamento. Recursos hídricos.

ABSTRACT

This work aimed to make the morphometric characterization of the Marinheiro Creek watershed, Sete Lagoas (Brazil), using geoprocessing tools, to aid the hydroenvironmental analysis. The method was performed in three steps: pre-processing; hydrologic outlining, calculation of the morphometric parameters for the watershed. The calculated hydrographic density was 2.7 un.km⁻², i.e., there are 2.7 channels per square kilometer. The average slope for the

watershed was 13%, which is accordingly to the sloppy topography. The watershed was at 3rd order class, with dendritic type drainage. The sinuosity index was 20.6%, indicating a straight river. The channel slope values were $S1=0.03 \text{ m.m}^{-1}$; $S2 = 0.008 \text{ m.m}^{-1}$ and $S3 = 0.011 \text{ m.m}^{-1}$. According to the Kc (compactness coefficient), Kf (factor), Re (elongation ratio) and IC (circularity index), the watershed is not prone to flooding, under normal precipitation conditions, due to its elongated shape. In order to improve characterization of drainage lines indicated by the DEM, additional detailed work is recommended, including field sampling and monitoring, to make difference between perennial, intermittent and ephemeral rivers and dry ravines.

Keywords: Environmental analysis. Geoprocessing. Water resources.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um procedimento indispensável para conhecimento de sua dinâmica hidrológica. As informações quantitativas obtidas podem ser usadas para o planejamento e gerenciamento dos recursos naturais. Por meio da caracterização morfométrica é possível realizar avaliações e diagnósticos prévios sobre potenciais e limitações dos recursos hídricos, baseando-se nas características físicas da bacia hidrográfica (VILLELA; MATTOS, 1975; ALVES; CASTRO, 2003).

As características físicas de uma bacia hidrográfica como, por exemplo, a área, a forma, o relevo, o padrão de drenagem e a declividade, associadas com a geologia, a pedologia, o tipo de formação florestal, o uso e a cobertura do solo e os dados climáticos, podem determinar qual é a vulnerabilidade de cada bacia para as inundações, para os processos erosivos, para as perdas de matéria orgânica, nutrientes e microfauna, que podem acarretar, por sua vez, em assoreamento e eutrofização dos corpos hídricos (UMETSU et al., 2012). A partir da caracterização da morfometria da bacia, podem ser geradas aplicações úteis à tomada de decisão, como a estimativa da capacidade de suporte do ambiente (PINTO et al., 2016). Tanto na caracterização da morfometria como em análises derivadas, as ferramentas de geoprocessamento têm um importante papel por possibilitar uma avaliação integrada dos sistemas naturais, garantindo a otimização de procedimentos analíticos e maior agilidade na aquisição dos dados (CARELLI; LOPES, 2011). As técnicas de geoprocessamento foram utilizadas para caracterização de bacias hidrográficas por diversos autores, como Tonello et al. (2006), Lima Neto et al. (2008), Pissarra et al. (2010), Pinto et al. (2014), Rocha et al. (2014), Lopes (2016), Franco e Dal Santo (2015) e Almeida et al. (2016). A aplicação destas técnicas e ferramentas em bacias historicamente submetidas a pressões antrópicas pode contribuir para o diagnóstico ambiental e para a construção de estratégias para a recuperação das funções ecossistêmicas e hidrológicas e a preservação de remanescentes do ecossistema local.

Dentre as bacias historicamente antropizadas, a bacia do Córrego Marinheiro apresenta características típicas de áreas vastamente exploradas, com cultivos e pastagens já antigos em seus domínios, além de sofrer pressões em seu entorno relacionadas à especulação imobiliária, à construção de condomínios e à exploração de calcário. Destaca-se que a área possui relevância ambiental por encontrar-se em sítios geológicos especiais, como as áreas cársticas, além de uma grande diversidade de classes de solos e espécies arbóreas importantes, como o Faveiro de Wilson, atualmente na lista vermelha de espécies ameaçadas de extinção (IBAMA, 2008).

Nesse contexto, este trabalho apresenta o estudo de caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas-MG, utilizando-se de ferramentas de geoprocessamento, como subsídio à sua análise hidroambiental.

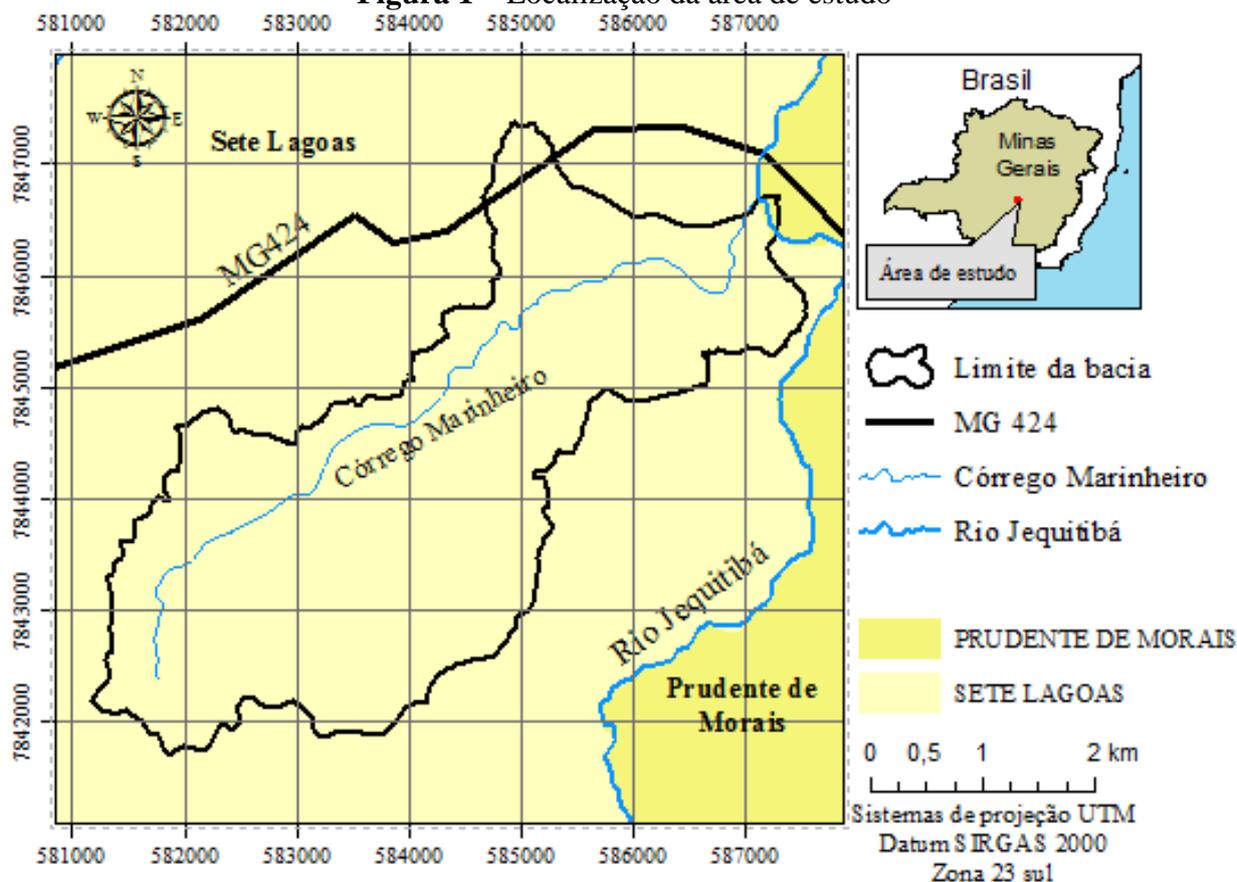
2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro (Figura 1), localizada no município de Sete Lagoas - MG, entre as coordenadas planas: Leste de 581100,3 a 587493,5 e Norte de 7841747,5 a 7847420,3, Datum geodésico SIRGAS 2000 e projeção UTM 23

sul. Fisionomicamente, a bacia está inserida no bioma Cerrado, porém apresenta fragmentos de vegetação nativa predominantemente do tipo floresta semidecidual montana, típica do bioma Mata Atlântica (COSTA et al., 2015). Também apresenta áreas antropizadas com plantios de culturas anuais e pastagens para criação de gado (SCOLFORO, 2008). O curso principal da bacia do Córrego do Marinheiro tem o sentido (nascente-foz) sudoeste-nordeste.

No período de Janeiro de 2010 a Dezembro de 2015, a região da bacia apresentou precipitação média mensal de 96,8 mm e temperatura média mensal compensada de 22°C. A bacia apresenta três tipos diferentes de litologias: Calcarenitos, Siltitos e Granitos (CPRM, 1997). Os tipos de solos presentes na bacia (classificados em primeiro nível categórico) são: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Nitossolos, Latossolos e Luvisolos (OLIVEIRA, 2016).

Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Os materiais básicos utilizados no estudo foram: a) Modelo Digital de Elevação (MDE) de 2014, proveniente do satélite TanDEM-X do Centro Aeroespacial Alemão (DLR), de resolução espacial de 12 m (WESSEL, 2013); e b) Software Arcgis versão 10.3 (ESRI, 2013). O método foi desenvolvido em três etapas principais, quais sejam: i) Pré-processamento do MDE; ii) Delineamento hidrológico; e iii) Cálculo de parâmetros morfométricos da bacia do Córrego do Marinheiro.

Na etapa de pré-processamento, foi utilizada a ferramenta de preenchimento - "fill" - do Arcgis para remover imperfeições nos dados de elevação do modelo original, sem filtragens prévias, gerando um novo MDE. Na segunda etapa, para o delineamento hidrológico, foi obtido inicialmente o perfil topográfico do curso d'água principal e, em seguida, calculado o gradiente de declividade na bacia, por meio da ferramenta "slope", sendo o mapa de declividade resultante submetido à reclassificação conforme os critérios descritos em Embrapa (1979). Em seguida, foram obtidas as direções do fluxo de drenagem, a distribuição das áreas em função da exposição do terreno e a rede de drenagem com valores de sua respectiva ordem hierárquica, com utilização dos comandos

flowdirection, *aspect*, e *StreamOrder*, respectivamente para obtenção de cada um dos produtos citados, com base na proposta de Strahler (1957).

Na terceira etapa, foram calculados 12 (doze) parâmetros morfométricos para a bacia, que por sua vez, foram avaliados a partir de quatro grupos: rede de drenagem; geometria da bacia; textura da drenagem e características do relevo (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros morfométricos calculados para a bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro

Parâmetro morfométrico	Fórmula	Referência
Rede de drenagem		
Densidade hidrográfica (Dh)	$Dh = Nt/A$	Horton (1945)
Índice de sinuosidade (Is)	$Is = 100(L - ev)/L$	Schumm (1963)
Ordem da drenagem	Hierarquia fluvial	Strahler (1952)
Número de segmentos (Nt)	$Nt = N_1 + N_2 + \dots N_n$	Horton (1945)
Geometria da bacia		
Área (A)		Schumm (1956)
Comprimento do eixo principal (L_b)		Schumm (1956)
Perímetro (P)		Schumm (1956)
Fator de forma (kf)	$kf = A/L_b^2$	Horton (1945)
Razão de alongação (Re)	$Re = 1,128 (A^{0,5}/L_b)$	Schumm (1956)
Índice de circularidade (Ic)	$Ic = 12,53 (A / P^2)$	Miller (1953)
Coefficiente de compacidade (kc)	$kc = 0,28 (P / \sqrt{A})$	Lima (1996)
Análise da textura da drenagem		
Índice de rugosidade (Ir)	$Ir = \Delta H \times Dd$	Christofolletti (1969)
Densidade de drenagem ($km^{-2} \cdot km$)	$Dd = Cr/A$	Horton (1945)
Razão de textura (Rt)	$Rt = Nt/ P$	Smith (1950)
Tempo de concentração (tc)	$tc = 0,0559(4,0 \cdot A^{0,5} + 1,5 \cdot L)L^{-0,5} S^{-0,5}$	Silveira (2005)
Características do relevo		
Razão de relevo (Rr)	$Rr = \Delta H / L$	Christofolletti (1969)
Declividade do álveo (S1, S2, S3)	$S1 = \Delta H / L$	Villela e Mattos (1975)
	$S2 = (2 \times A_{bp})/L^2$	Villela e Mattos (1975)
	$S3 = (\sum Ri/Di)L$	Villela e Mattos (1975)

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Onde Nt é o número de segmentos de rios da bacia; A é a área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); Ev é a equivalente vetorial (km); L_b é o comprimento do eixo principal da bacia (m); P é o perímetro da bacia (m); ΔH é a variação da cota altimétrica (m); Cr é o comprimento da rede de drenagem (km); S é a declividade equivalente ($m \cdot m^{-1}$); A_{pb} é a área abaixo da curva do perfil topográfico (m^2); Ri é o comprimento do trecho i (m) e Di é a declividade do trecho i ($m \cdot m^{-1}$).

Após o delineamento hidrológico e cálculo dos parâmetros morfométricos, foi realizada a caracterização e análise da bacia do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas – MG, comparando-se os resultados obtidos com dados publicados de bacias de diferentes regiões.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O delineamento hidrológico e cálculo dos parâmetros morfométricos permitiu a caracterização da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, com perímetro de 27,3 km, comprimento

do eixo principal de 7,132 km e área de drenagem de 14,8 km². Os parâmetros morfométricos analisados correspondem a características específicas de sua rede de drenagem, da geometria da bacia, da textura de drenagem e do relevo (Tabela 2). Nos itens que se seguem, os parâmetros são analisados com relação aos valores obtidos.

Tabela 2 – Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro a partir de quatro grupos: Rede de drenagem, geometria da bacia, análise da textura da drenagem e características do relevo

Parâmetro morfométrico	Valor	Unidade
Rede de drenagem		
Densidade hidrográfica (Dh)	2,7	un.km ⁻²
Índice de sinuosidade (Is)	20,6	%
Ordem da drenagem	3	adimensional
Número de segmentos (Nt)	40	unidade
Geometria da bacia		
Área (A)	14,8	km ²
Comprimento do eixo principal (L _b)	7,132	km ²
Número de segmentos de rios (Nt)	40	un
Comprimento da rede de drenagem (Cr)	33,7	km
Comprimento do Rio Principal (L)	9,18	km
Perímetro (P)	23,7	km
Fator de forma (kf)	0,25	m.m ⁻¹
Razão de alongação (Re)	0,57	adimensional
Índice de circularidade (Ic)	0,33	adimensional
Coefficiente de compacidade (kc)	1,72	m.m ⁻²
Análise da textura da drenagem		
Índice de rugosidade (Ir)	148	adimensional
Densidade de drenagem (km ⁻² . km)	1,59	km.km ⁻²
Razão de textura (Rt)	1,69	un.km ⁻¹
Tempo de concentração (tc)	5,18	horas
Características do relevo		
Razão de relevo (Rr)	0,031	m.m ⁻¹
Declividade do álveo (S1, S2, S3)	0,03	m.m ⁻¹
	0,008	m.m ⁻¹
	0,011	m.m ⁻¹

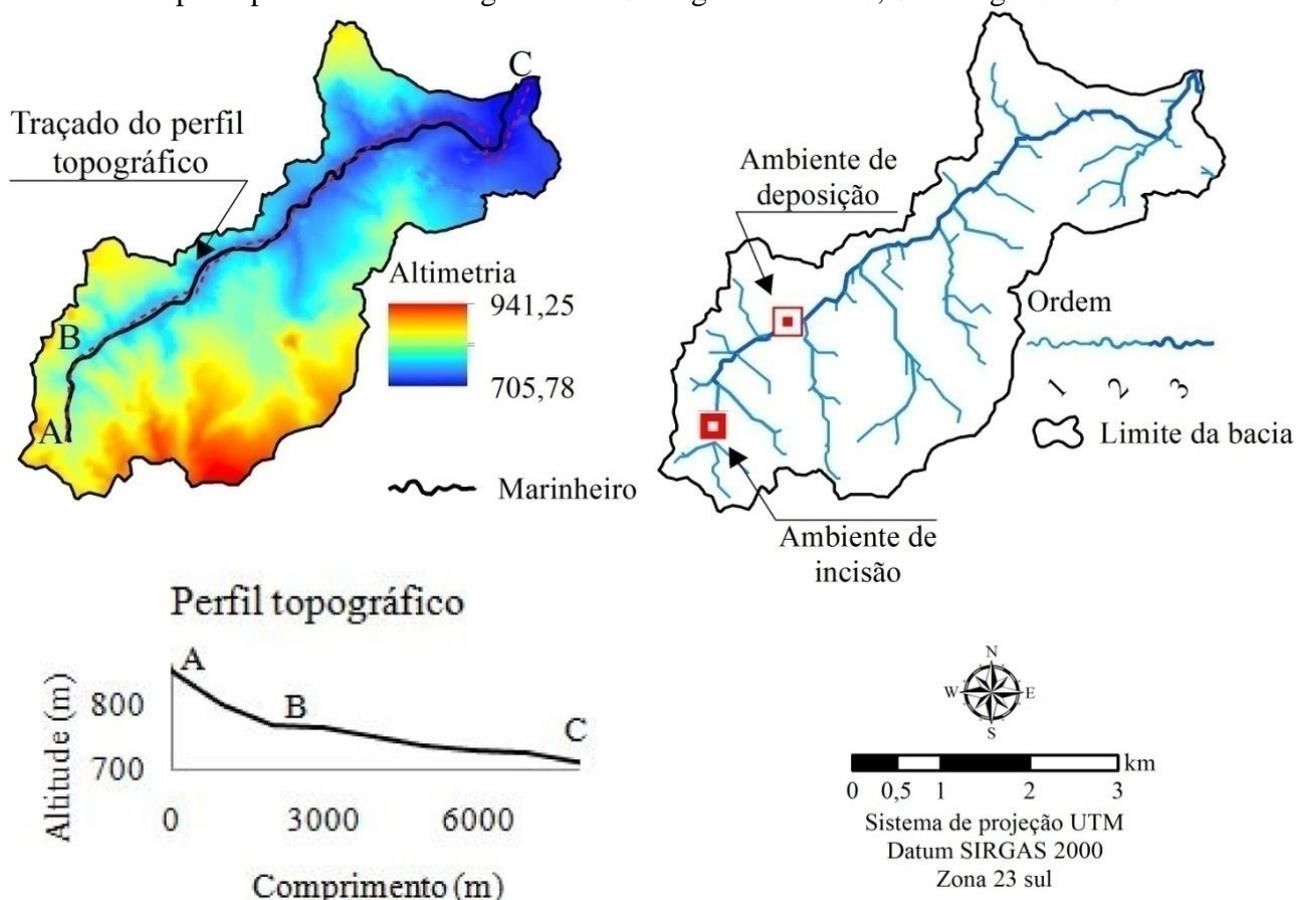
Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

3.1. Rede de drenagem

A partir dos valores observados para a rede de drenagem, é possível verificar que a Densidade hidrográfica (Dh) calculada para a Bacia do Córrego do Marinheiro foi de 2,7 un.km⁻², ou seja, a cada quilômetro quadrado existem 2,7 canais. A bacia pode ser classificada como de 3^a ordem e apresenta sistema de drenagem do tipo dendrítica (STRAHLER, 1957; CHRISTOFOLETTI, 1979). O padrão de drenagem observado é diretamente influenciado pelo relevo, tipo de solos, geologia e precipitação.

Baseado no perfil topográfico do curso d'água do Córrego Marinheiro, é possível verificar as principais características ambientais e hidrodinâmicas encontradas na seção da drenagem principal na bacia (Figura 2).

Figura 2 – Altimetria, ordem hierárquica fluvial e perfil topográfico da seção da drenagem principal da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

De acordo com a Figura 2, é possível dividir o curso d'água da bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro em dois ambientes. O primeiro é o ambiente de incisão (segmento AB do perfil topográfico) que tem origem na nascente e segue na direção norte por 2 km. Após essa distância, a drenagem altera a direção para o sentido nordeste, caracterizando o início do segundo ambiente, o de deposição (segmento BC do perfil topográfico) que tem comprimento de 7,2 km de drenagem até a foz. O ambiente de incisão e o ambiente de deposição apresentam características físicas, pedológicas e litológicas distintas (Tabela 3).

Tabela 3 – Características dos ambientes de incisão e deposição do curso d'água da bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG

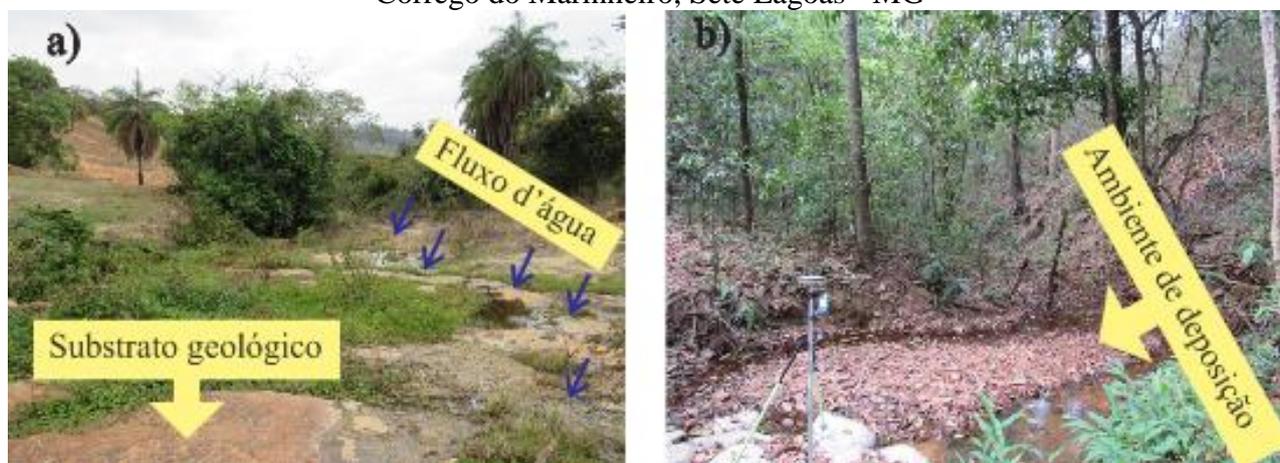
Característica	Ambientes:	
	Incisão	Deposição
Segmento	AB	BC
Comprimento (km)	2,0	7,2
Altitude máxima (m)	849,6	767,5
Altitude mínima (m)	767,5	705,8
Altitude média (m)	808,6	736,7
Diferença de altitude (m)	82,1	61,7
Declividade ($m.m^{-1}$)	0,041	0,009
Solos (subgrupo)	CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos	CAMBISSOLOS FLÚVICOS Tb Eutróficos
Litologia	Granito	Siltito

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

A partir dos valores observados para os dois trechos de declive, pode-se inferir que há maior velocidade de escoamento da água superficial no ambiente de incisão, em comparação com a velocidade observada no segundo trecho, em ambiente característico de deposição. Outras características que irão diferenciar os dois ambientes são o substrato pedológico e o substrato geológico.

O primeiro ambiente é caracterizado pela presença de solos do tipo CAMBISSOLOS HÁPLICOS, os quais possuem restrição à drenagem devido ao contato lítico na subsuperfície (PORTUGAL et al., 2008). Esse contato lítico é com a rocha do tipo Granito, caracterizado por ser resistente à denudação, apresentar baixa porosidade e restrição a ocorrência e armazenamento de água, a menos que esteja fraturada (LEITE et al., 2004). Na Figura 3 são apresentados os ambientes de incisão e deposição observados na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro.

Figura 3 – Ambiente de incisão e de deposição do curso d'água principal da bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Na Figura 3(a), é possível identificar o trecho do curso d'água drenado sobre o substrato geológico, caracterizando o arraste de partículas de solo para o ambiente de deposição (b). Nesse último ambiente, foram classificados solos do tipo CAMBISSOLOS FLÚVICOS, os quais permanecem sob risco de inundação periódica. O substrato geológico presente é o siltito (CORREA et al., 2004; MASSON et al., 2000).

Verificou-se a presença de 40 segmentos de cursos d'água e tendência retilínea do curso d'água principal, com índice de sinuosidade (I_s) de 20,6% (MANSIKKANIEMI, 1970). Essa característica indica que o curso principal da bacia apresenta maior velocidade de escoamento e menor retenção de água no interior do curso d'água principal, quando comparado com outras bacias de mesma característica e com valores de I_s maiores.

O córrego Marinheiro sofre um controle estrutural associado à geologia do embasamento cristalino. A parte inicial do curso, que corre em grande parte sobre afloramentos do granito, apresenta direção predominante sul – norte, coincidente com a direção geral das principais fraturas visíveis nos afloramentos. Esta direção sofre mudança abrupta para a direção sudoeste – nordeste, predominante na maior parte do curso, e está associada a uma falha no embasamento cristalino inserida na região (GALVÃO et al., 2015).

Sabe-se que a sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos, pela compartimentação litológica, pela estruturação geológica e pela declividade dos canais, conforme LANA et al. (2001).

Resultados semelhantes aos da bacia do Marinheiro para densidade de drenagem (D_d) e densidade hidrográfica (D_h) foram encontrados para a bacia do Rio Coco (D_d) ($1,203 \text{ km.km}^{-2}$) e D_h ($2,637 \text{ un.km}^{-2}$), localizado na margem direita do Rio Araguaia, no estado do Tocantins, indicando

capacidade de drenagem moderada (ALMEIDA et al., 2016). Quanto ao índice de sinuosidade (I_s), em estudo realizado na bacia hidrográfica do Rio Forqueta – RS, foram encontrados valores de I_s iguais a 45,63%, o que classifica o rio principal da área como sinuoso e, portanto, com menor velocidade de escoamento (PÉRICO et al., 2011), em contraste com bacias cujos valores de I_s são similares ao obtido no Córrego Marinheiro (20% ou inferior), e seus cursos têm conformação retilínea.

3.2. Geometria da bacia

O controle estrutural geológico também influencia a geometria da bacia. De acordo com os valores observados para o Coeficiente de compactidade (K_c), de $1,72 \text{ m.m}^{-2}$, é possível indicar que a bacia apresenta formato irregular, com tendência à não ocorrência de inundações acentuadas. À medida que esse valor se aproxima da unidade, mais circular é a bacia e maior a propensão a inundações severas, devido ao maior tempo de latência dos picos de vazão (VILLELA e MATOS, 1975).

O Fator de forma (K_f) de $0,25 \text{ m.m}^{-1}$, encontrado para a bacia do Córrego do Marinheiro, corrobora com o resultado do valor de K_c , indicando característica alongada da bacia e podendo inferir que a mesma apresenta boa drenagem em condições normais de precipitação (BORSATO, 2005).

Todos esses valores indicam que a bacia não possui formato circular, correspondendo, portanto, a uma bacia com tendência para a forma alongada, o que é confirmado pela R_e de 0,57 e Índice de circularidade igual a 0,33, todos coerentes com a forma geral da bacia observada na Figura 2.

Estudos realizados na bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, localizada no Município de Guanhães - MG, com dimensões de $6,981 \text{ km}^2$ e perímetro de $14,84 \text{ km}$, constataram que a área estudada possui forma alongada ($K_f = 0,409$; $K_c = 1,575$; e $IC = 0,397$) e apresenta menor risco de inundações nas condições normais de precipitação (TONELLO et al., 2006).

3.3. Análise da textura da drenagem

A textura da drenagem indica o grau de dissecação da paisagem pelos canais de drenagem e inclui o Índice de rugosidade (I_r), a Densidade de drenagem (D_d) e a Razão de textura. O Índice de rugosidade (I_r) encontrado para a bacia do Córrego do Marinheiro foi de 148 (valor adimensional). Esse parâmetro indica a velocidade de conversão do fluxo de vertente em fluxo fluvial, refletindo o potencial de transmissividade hidráulica da bacia e o nível de energia, dada a amplitude altimétrica.

Em estudo realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Pontal (BHRP), localizada no extremo oeste do Estado de Pernambuco, de clima semiárido, foi encontrado valor de I_r igual a 101,70 (LOPES, 2015). Comparando-se esses valores, é possível determinar que a bacia do Córrego do Marinheiro, apesar de apresentar I_r baixo, possui risco ligeiramente maior de inundações do que a BHRP, possivelmente devido à maior transmissividade hidráulica do solo na região da Bacia do Marinheiro.

A densidade de drenagem (D_d) calculada ($1,59 \text{ km.km}^{-2}$) indica que a eficiência do sistema de drenagem é moderada. Em outras bacias, esse índice pode variar de $0,5 \text{ km.km}^{-2}$ em bacias de drenagem pobre, a $3,5 \text{ km.km}^{-2}$ ou mais, em bacias bem drenadas (VILLELA; MATOS, 1975). O valor de Razão de textura (R_t) encontrado para a bacia foi de $1,69 \text{ un.km}$, ou seja, esses valores indicam que há 1,69 segmento de curso d'água a cada km do perímetro da bacia, podendo ser classificada como grosseira, por apresentar número reduzido de canais no terreno, com baixos valores de bifurcação (SMITH, 1950).

Baixos valores de razão de textura (R_t) geralmente podem estar associados a regiões de rochas permeáveis, o que pode facilitar a infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento

superficial (TONELLO et al., 2006). A bacia é caracterizada por duas geologias distintas (os granito-gnaisses do Supergrupo Belo Horizonte e os siltitos e calcarenitos do Grupo Bambuí), por sobre as quais se desenvolveram solos com características físico-hídricas bem distintas. Sobre os granito-gnaisses, foram identificados solos menos desenvolvidos e de menor permeabilidade, como Cambissolos e Argissolos, e, sobre os siltitos, solos mais profundos e bem drenados, como os Latossolos (OLIVEIRA, 2016). Estes últimos são os solos predominantes da bacia, o que justifica o baixo valor de R_t . Considere-se ainda a presença relevante de relevo cárstico, com dolinas e vales secos, que também contribuem para a captura e infiltração do escoamento superficial.

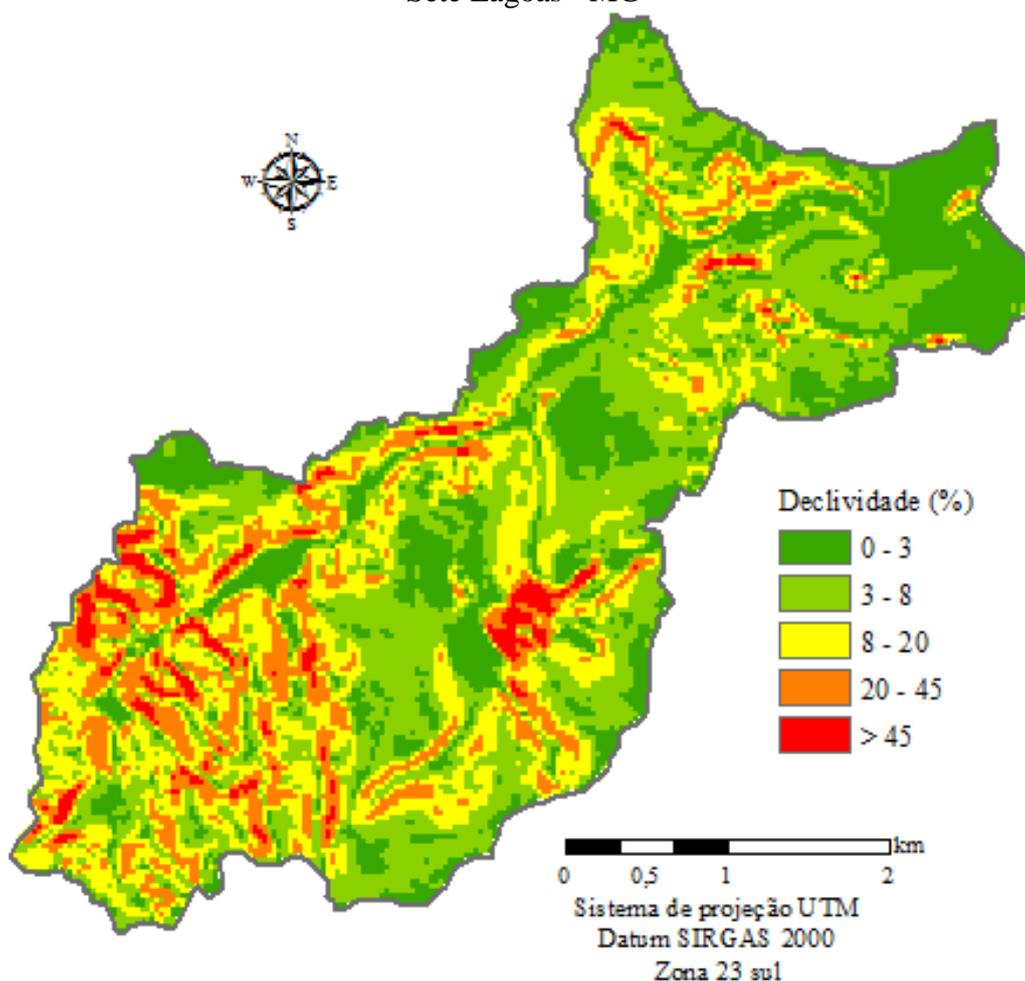
O Tempo de concentração obtido para a bacia do Córrego do Marinheiro foi de 5,18 horas. Ele determina o tempo que a bacia hidrográfica responde como sistema linear para o escoamento superficial direto, ou seja, representa o tempo entre o fim da chuva efetiva e o fim do escoamento superficial direto, ou ainda, o tempo que demarca o instante da chegada ao exutório da gota vinda do ponto mais distante da bacia (SILVEIRA, 2005). Esse autor ressalta que, devido ao tempo da trajetória da última gota de chuva a chegar do ponto mais distante corresponder a escoamentos de baixa magnitude, os valores para este percurso são maiores que o real tempo de concentração, sob influência da propagação hidráulica. Isso gera uma incerteza prática na determinação desse parâmetro, embora ele seja frequentemente utilizado como referência no cálculo de precipitações e vazões de projetos. Tendo em vista que as várias fórmulas de cálculo do tempo de concentração, das mais simples às mais complexas, podem superestimar seu valor, caso refiram-se ao escoamento superficial de baixa carga hidráulica, Silveira (2005) avaliou o desempenho de 23 fórmulas de tempo de concentração. O autor calculou os erros dessas fórmulas para bacias rurais e urbanas com base em arquivos-teste de valores 'observados' de tempo de concentração obtidos a partir de análise de hietogramas e hidrogramas disponíveis na literatura técnico-científica. Seus resultados podem contribuir com a escolha da fórmula de cálculo de T_c para diferentes situações e indicam a possibilidade de uso de algumas fórmulas em situações distintas das condições de obtenção da fórmula. Por exemplo, fórmulas desenvolvidas a partir de parcelas e de pequenas bacias rurais mostraram bons resultados em grandes bacias rurais.

Em estudo realizado na bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (362 km²), Campo Grande, MS, Almeida et al. (2013) avaliaram o desempenho de dez equações empíricas amplamente utilizadas para cálculo do tempo de concentração (T_c). Dentre as equações avaliadas, o método de Giandotti, desenvolvido para bacias rurais, estimou o valor de T_c mais próximo ao obtido pela análise do hidrograma para o Córrego Guariroba. No presente trabalho, esse mesmo método foi escolhido devido ao caráter rural da bacia estudada, e ao fato de a fórmula de Giandotti demonstrar uma ampla faixa de áreas com potencial de aceitabilidade de uso no estudo de Silveira (2005).

3.4. Características do relevo

As propriedades morfológicas da bacia respondem a características como o grau de dissecação do relevo, a exposição aos raios solares, os processos erosivos e as diferentes inclinações do álveo. A declividade média encontrada na bacia do Córrego do Marinheiro foi de 13%, valor condizente com o relevo do tipo ondulado. A declividade máxima na área foi de 82%, indicando, também, a presença de relevo montanhoso ou escarpado, que na área corresponde principalmente aos afloramentos de calcáreos do Grupo Bambuí. Com o desvio padrão de 9%, é possível verificar que as características de relevo predominantes da bacia tendem do suave ondulado a ondulado (Figura 4).

Figura 4 – Distribuição das classes de declividade verificadas na bacia do córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Observando-se a Figura 4, é possível identificar que a maior concentração de áreas de relevo mais íngreme (acima de 20%) encontra-se próxima à cabeceira da bacia, na porção sudoeste. Na região da foz, a declividade predominante é do tipo plano e suave ondulado. O conhecimento sobre a distribuição espacial das classes de declividade é relevante para o planejamento da área, tanto para o cumprimento da legislação quanto para garantir a eficiência das práticas de intervenções antrópicas (Tabela 4).

Tabela 4 – Distribuição das classes de declividade verificadas na bacia do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG

Classe de declividade	Descrição	Hectares	%
0 a 3%	Plano	118,7	8,0
3 a 8%	Suave ondulado	323,5	21,9
8 a 20%	Ondulado	733,5	49,6
20 a 45%	Forte ondulado	294,4	19,9
Acima de 45%	Montanhoso	9,9	0,7
Total		1480	100

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Observando-se que 49,6% da área total da bacia, o que corresponde a 733,5 ha, apresenta relevo do tipo ondulado (Tabela 4). A classe de declividade que ocupa a segunda maior área é a do

tipo suave ondulado, presente em 21,9% da bacia, seguida da classe correspondente ao relevo forte ondulado, com área de 19,9% do total. As classes de declividade do tipo plano e montanhoso ocupam as menores áreas na bacia do Córrego do Marinheiro, correspondentes a 8% e 0,7%, respectivamente. O valor de declividade influencia diretamente nos processos físicos naturais de escoamento superficial e infiltração de água no solo. Nas regiões de maior declividade, a velocidade do escoamento superficial tende a ser maior, resultando em menor quantidade de água armazenada no solo.

A orientação da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro determina sua exposição geográfica aos raios solares e a quantidade de radiação solar que receberá (Tabela 5). A despeito de considerar a influência dos diferentes tipos de cobertura vegetal sobre a evapotranspiração, espera-se que as bacias de orientação norte, no hemisfério sul, recebam maior quantidade de radiação solar e, conseqüentemente, apresentem maiores taxas de evapotranspiração (CASTRO; LOPES, 2001).

Tabela 5 – Distribuição das áreas em função da exposição do terreno na bacia do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG

Orientação (graus)	Exposição	Hectares	%
0 - 45	N - NE	287,4	19,4
45 - 90	NE - E	209,3	14,1
90 - 135	E - SE	165,1	11,2
135 - 180	SE - S	156,6	10,6
180 - 225	S - SW	84,4	5,7
225 - 270	SW - W	114,5	7,7
270 - 315	W - NW	205,3	13,9
315 - 360	NW - N	257,4	17,4
Total		1480	1480

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Observando-se a Tabela 5, é possível verificar que a maior superfície de exposição é ocupada pela classe norte-nordeste, seguida da classe de exposição noroeste-norte. Esses valores indicam que as nascentes, drenagens ou corpos hídricos presentes nessas porções de área apresentam tendência a maior perda de umidade por evapotranspiração, em comparação com as demais áreas, devido à maior exposição aos raios solares (CASTRO; LOPES, 2001).

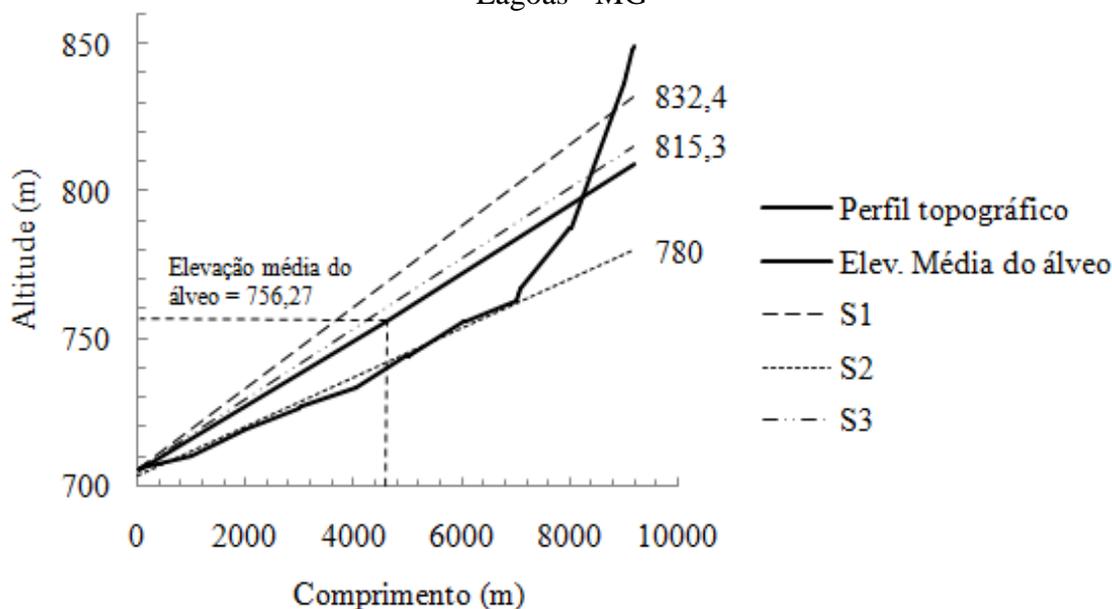
A Razão de relevo (Rr) encontrada para a bacia foi de 0,03 m.m⁻¹. É classificada por Piedade (1980) como um valor baixo e indica uma menor velocidade de escoamento superficial na área, podendo favorecer a infiltração de água no solo e reduzir o potencial de erosão do local, o qual é também condicionado pela precipitação e pela cobertura predominante do solo.

Na bacia do Córrego do Marinheiro, foram encontrados valores de declividade do álveo S1 igual a 0,03 m.m⁻¹; S2 igual a 0,008 e S3 igual a 0,011 (Figura 5). Essa diferença pode ser explicada pelo método de cálculo utilizado em cada estimativa (método direto, método de área equivalente e método da média harmônica). Considerando-se que quanto maior a declividade do álveo, maior é a velocidade de escoamento das águas em seu curso, valores elevados de S1, S2 e S3 indicam menores valores para o tempo de permanência da água, sendo conveniente um manejo de solo e água mais intensivo (TONELLO et al., 2006). Embora as médias calculadas para o córrego Marinheiro sejam de baixo valor, há variação da declividade ao longo do curso.

A elevação média do álveo na bacia é de 756,27 m (Figura 5), e a declividade de álveo mais elevada é de S1, cujo cálculo considera todo o comprimento do canal principal e sua variação altimétrica. O valor de S3 indica menor declividade, comparando-se com o de S1, e seu processo de cálculo considera a média harmônica das diferentes declividades nos trechos do curso d'água. O valor encontrado de S2, que utiliza método de ponderação pela área de contribuição da bacia, subestima a declividade devido às características do álveo do Córrego do Marinheiro, com forte alteração da declividade no percurso entre a foz e a sua cabeceira, com trecho de alto declive próximo à cabeceira.

Resultados semelhantes, de baixa declividade pelo processo da média harmônica, foram identificados por Lopes (2016). Os dois trechos identificados como ambientes de deposição e de sedimentação (Tabela 2) correspondem à mudança de declividade de 0,041 para 0,009 m.m^{-1} , e também coincidem aproximadamente com a mudança da direção do curso de norte - sul para sudoeste - nordeste.

Figura 5 – Representação das formas de declividade do álveo do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas - MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Em estudo realizado na bacia hidrográfica do Rio da Prata, no município de Castelo - ES, foram obtidos valores de declividade média de álveo, S1 ($0,0570 \text{ km.km}^{-1}$), S2 ($0,1004 \text{ km.km}^{-1}$) e S3 ($0,0424 \text{ km.km}^{-1}$), os quais indicaram grandes variações da declividade no percurso de seu canal principal (COUTINHO et al., 2011).

4. CONCLUSÕES

A análise morfométrica é de grande utilidade para os estudos hidrológicos, e este trabalho demonstra a relevância de conhecer o comportamento da rede de drenagem e sua inter-relação com a geomorfologia da paisagem para o planejamento e a gestão da bacia hidrográfica. O uso de ferramentas de sensoriamento remoto, como o TandemX, com resolução de 12 m e o software de geoprocessamento ArcGIS mostraram-se adequados para a obtenção das características morfométricas da bacia, podendo auxiliar na gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro.

Os processamentos realizados indicam que a bacia do Córrego Marinheiro pode ser classificada como de 3º Ordem, com padrão de drenagem dendrítico. A Densidade de drenagem encontrada indica a tendência ao escoamento superficial moderado e à capacidade de infiltração moderada, o que permite destacar a importância da manutenção da vegetação natural e possível ampliação de áreas com essa cobertura, uma vez que elas podem reduzir a velocidade de escoamento superficial e permitir maior infiltração de água no solo e a recarga do aquífero.

A análise da topografia do canal principal mostra dois ambientes distintos, o primeiro trecho a partir da nascente, sendo um ambiente de incisão, e um segundo ambiente de deposição, que se estende até a foz. Há um forte controle estrutural do curso principal do Marinheiro, associado ao embasamento cristalino, com afloramentos de granito predominantemente na direção do córrego (Sul-

Norte) no primeiro trecho (de incisão), com um ponto de ruptura no início do segundo trecho, quando a direção passa a ser Sudoeste- Nordeste.

A análise da geometria da bacia mostrou parâmetros compatíveis com seu formato alongado, o que confere à bacia um baixo grau de vulnerabilidade a inundações. O relevo é predominantemente suave ondulado a ondulado, com orientação predominante para as faces Norte-Nordeste e Noroeste-Norte. A baixa razão de relevo indica valores baixos da velocidade de escoamento superficial, e a exposição para o norte é responsável por maiores taxas de evapotranspiração.

A avaliação das linhas de drenagem consideradas como cursos d'água deve ser cuidadosa. Devido ao histórico de uso e ocupação do solo na bacia, os canais de drenagem podem ter sido afetados pela atividade antrópica, aliada aos fatores de erosão hídrica, sofrendo impactos como o assoreamento do leito, o desaparecimento por rebaixamento do lençol ou a degradação de cursos d'água e de nascentes por meio de abertura de áreas para agricultura e pecuária sem manejo adequado. Desta forma, sugere-se a realização de observações, tomadas de medidas em campo e relatos de moradores antigos para diferenciar rios perenes e rios temporários (intermitentes) de outras linhas de drenagem geradas a partir do MDE e consideradas como cursos d'água, embora possam ser canais efêmeros, ravinas, voçorocas ou mesmo cursos d'água já extintos.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo apoio financeiro, ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente do IGC/UFMG, à EMBRAPA Milho e Sorgo e à EMBRAPA Solos pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, I. K. ; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, V. R.; ALVES SOBRINHO, T. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, 2013. p. 1-8.

ALMEIDA, R. F. B.; BAYER, M.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Compartimentação morfométrica da bacia do rio Coco como subsídio a análise de fragilidade ambiental. **Revista Mercator**, v. 15, n. 4, p. 83-94, 2016.

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 117-127, 2003.

BORSATO, F. H. **Caracterização física das bacias de drenagem do município de Maringá e os postos de combustíveis como potenciais poluidores**. Dissertação (Mestre em Geografia). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

CARELLI, L.; LOPES, P. P. Caracterização fisiográfica da bacia Olhos D'Água em Feira de Santana/BA: Geoprocessamento aplicado à análise ambiental. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 43-54, 2011.

CASTRO, P.; LOPES, J. D. S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa: CPT, 2001. 84p.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 9, n. 18, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, v. 4, n. 8, p. 23-42, 1979.

CORREIA, J. R.; ANJOS, L. D.; LIMA, A. C. S.; NEVES, D. P.; TOLEDO, L. D. O.; CALDERANO FILHO, B.; SHINZATO, E. Relações entre o conhecimento de agricultores e de pedólogos sobre solos: estudo de caso em Rio Pardo de Minas, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1045-1057, 2007.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapas Temáticos de Geologia, Geomorfologia, Hidrologia, Solos e Uso dos Solos do Projeto Vida**. Belo Horizonte, 1997. 1 Atlas. Escala 1:50.000.

COSTA, T. C. e C. da; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, L. M. T. D.; VIANA, J. H. M. Probabilistic classification of tree and shrub vegetation on phytogeographic system. **Journal of Environmental Science and Engineering B**, Libertyville, v. 4, n. 6, 315-330, 2015.

COUTINHO, L. M.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; ZANETTI, S. S.; GARCIA, G. de O. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio da Prata, Castelo, ES. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 4, 2012.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro, EMBRAPA, 1979. p. 83.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS for Desktop**. Versão. 10.3. Redlands: ESRI, 2013.

FRANCO, A. C. V; DAL SANTO, M. A. Contribuição da morfometria para o estudo das inundações na Sub-bacia do Rio Luís Alves/SC. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 3, p. 151-167, dez. 2015.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 7, p. 1499-1513, 2015.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Portaria nº 06, 23 de setembro de 2008. **Apresenta a Lista Oficial de Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção**.

LANA, C. L.; ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Análise morfométrica da bacia do rio Tanque, MG - Brasil. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 2, p. 121-126, 2001.

LIMA NETO, R. T.; MENDONÇA, L. A. R.; PEREIRA, J. de A.; SOUSA, C. A. V. de; GONÇALVES, J. Y. de B; FRISCHKORN, H. Análise morfométrica e ambiental da microbacia hidrográfica do rio Granjeiro, Crato/CE. **REM: Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, n. 3, p. 365-369, set. 2008.

LIMA, W. de P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. 1986. Disponível em: <<https://www.ipef.br/hidrologia/hidrologia.pdf>>. Acesso em: jan. 2017.

LEITE, A. A. S.; DALL'AGNOL, R.; MACAMBIRA, M. J. B.; ALTHOFF, F. J. Geologia e geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara (PA) e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 4, p. 447-458, 2004.

LOPES, I. **Caracterização morfométrica e uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Pontal**. 2016. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Juazeiro.

MANSIKKANIEMI, H. The sinuosity of rivers in northern Finland. **Publicationes Instituti Geographici Universitatis Turkuensis**, v.52, p.16-32, 1970.

MASSON, M. R.; CHRISTOFOLETTI, S. R.; THOMAZELLA, H. R.; FUGIE, A.; ZANARDO, A.; ALEGRE, V. Mapeamento e caracterização geológica/tecnológica da formação Corumbataí com vistas ao seu emprego na indústria de revestimentos cerâmicos. Parte I - Geologia e correlação entre as minas e jazidas estudadas. **Ceram. Ind.**, v. 5, n. 6, p. 24-33, 2000.

MILLER, Victor C. Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. **Technical report** (Columbia University. Department of Geology); no. 3, 1953.

OLIVEIRA, A. R. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego marinho, Sete Lagoas (MG)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PÉRICO, E.; CEMIN, G.; AREND, U.; REMPEL, C.; ECKHARDT, R. R. Análise fisiográfica da bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.1200-1207.

PIEPADE, G. C. R. **Evolução de voçorocas em bacias hidrográficas do município de Botucatu, SP**. 1980. 161 f. Tese (Livre Docência) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 1980.

PINTO, V.G.; LIMA, R. N. de S.; RIBEIRO, C. B. de M.; MACHADO, P. J. de O. Diagnóstico físico-ambiental como subsídio a identificação de áreas vulneráveis à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG), Brasil. **Rev. Ambiente e Água**, Taubaté, v. 9, n. 4, p. 632-646, dez. 2014.

PINTO, V. G.; DE SOUZA LIMA, R. N.; PINTO, R. C.; RIBEIRO, C. B. de M. Influência do número de classes de vulnerabilidade na determinação da suscetibilidade morfométrica à inundação / Influence of the number of vulnerability classes in determining morphometric susceptibility to flooding. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 637, 2016.

PISSARRA, T. C. T.; RODRIGUES, F. M.; POLITANO, W.; GALBIATTI, J. A. Morfometria de microbacias do Córrego Rico, afluente do Rio Mogi-Guaçu, Estado de São Paulo, Brasil. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 669-676, ago. 2010.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. A. V.; COSTA, L. M. D.; SANTOS, B. C. M. D. Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico Tb distrófico sob diferentes usos na zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 249-258, 2008.

ROCHA, R. M.; LUCAS, A. A. T.; ALMEIDA, C. A. P. de; MENEZES NETO, E. L.; e NETTO, A. de O. A. Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio Poxim-Açu, Sergipe, Brasil. **Rev. Ambiente e Água**, Taubaté, v. 9, n. 2, p. 276-287, 2014.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.

SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. de C. (Org). **Inventário Florestal de Minas Gerais**. Lavras: Editora UFLA, 2008.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, n. 10, p.5-23, 2005.

SMITH, K. G. Standards for grading texture of erosion al topography. **American Journal of Science**, v. 248, n. 9, p. 655-668, 1950.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L. de; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas Guanhães (MG). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n.5, p. 855, 2006.

UMETSU, R. K.; PEREIRA, N.; CAMPOS, É. M. F. P. de; UMETSU, C. A.; MENDONÇA, R. A. M. de; BERNASCONI, P.; e CAMARGO, M. F. Análise Morfométrica e Socioambiental de uma bacia hidrográfica Amazônica, Carlinda, MT. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.1, p.83-92, 2012.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1975.

WESSEL, B. **TanDEM-X Ground Segment: DEM Products Specification Document**. Project Report.EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.0, 2013. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/93565/>>.

Data de submissão: 02.05.2017

Data de aceite: 10.07.2018

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.