

Antropogeomorfologia em setor de expansão urbana de cidade de médio porte

Anthropogeomorphology in an urban sprawl sector of mid-sized city

Marcos Vinicius da Silva Ferreira*, Leandro de Godoi Pinton**

*Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecn. Ambiental - Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), marcosferreira1707@gmail.com

**Departamento de Geografia (DEGEO) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), leandro.pinton@uftm.edu.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v53i0.76912>

Resumo

O crescimento das cidades médias brasileiras tem promovido o desenvolvimento de distintos problemas ambientais em seus sistemas hidrogeomorfológicos, exigindo a sistematização de estudos que permitam a avaliação dos efeitos das intervenções antrópicas nas formas e processos geomorfológicos. Nessa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo avaliar as mudanças morfológicas induzidas pelas atividades antrópicas na bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente, situada em setor de expansão urbana de São Carlos, cidade de médio porte do centro-leste do estado de São Paulo. O estudo foi conduzido pelos princípios da Antropogeomorfologia e da cartografia geomorfológica de detalhe. Com base nesses pressupostos teórico-metodológicos, realizou-se o mapeamento de cenários representativos da morfologia pré-perturbação antrópica e da morfologia antropogênica, e de geoindicadores que denotam a dinâmica de feições geomórficas de detalhe numa série histórica de 48 anos. As mudanças morfológicas decorrentes dos usos urbanos e rurais promoveram o aumento nos parâmetros extensão e quantidade dos geoindicadores de origem denudativa, indicando a intensificação da erosão linear e a degradação dos solos nos segmentos de vertentes. A concomitante ampliação da sinuosidade do curso d'água principal evidencia os efeitos indiretos da interferência antrópica na dinâmica fluvial. A diversidade paisagística identificada no eixo de expansão de cidade média evidencia a possibilidade da formulação de modelos de planejamento físico-territorial adequados às características ambientais dos sistemas hidrogeomorfológicos em estágio de perturbação ativa.

Palavras-chave: Antropoceno; Cartografia geomorfológica; Geoindicadores.

Abstract

The growth of Brazilian mid-sized cities has fostered the development of different environmental problems in hydrogeomorphological systems, requiring the systematization of studies for the assessment of the effects of human interventions on landforms and geomorphological processes. The present study aimed to evaluate the morphological changes induced by human activities in the Água Quente stream basin, located in an urban expansion sector of São Carlos, a mid-sized city in the central-east of the state of São Paulo. The investigation was supported by the principles of Anthropogeomorphology and detailed geomorphological mapping. The mapping of representative stages of pre-anthropogenic morphology, anthropogenic form, and geoindicators which denotes the detailed geomorphic features dynamics in a 48-year historical series was held under these theoretical-methodological frameworks. The morphological changes resulting from urban and rural land-use

promoted an increase in the parameters of extension and quantity of geoindicators of denudative origin, suggesting the intensification of linear erosion and the soil degradation in the slope segments. The concomitant increase in the mainstream sinuosity demonstrates the indirect effects of the human impact on fluvial dynamics. The landscape diversity identified in the mid-sized city expansion axis shows the possibility to formulate models of physical-territorial planning based on the environmental characteristics of hydrogeomorphological systems under the active disturbance stage.

Keywords: Anthropocene; Geomorphological Mapping; Geoindicators.

I. INTRODUÇÃO

A concepção do termo Antropogeomorfologia por Golomb e Eder (1964) manifesta as intenções da idealização de uma corrente de pensamento para o estudo da ação do homem na gênese de formas de relevo e na modificação de sua morfodinâmica.

A incorporação desse preceito na Geografia é realizada por Nir (1983), com a formulação do arcabouço teórico-metodológico da denominada Geomorfologia Antrópica. O autor rompe com o esquema tradicional de organização do conteúdo da literatura geomorfológica, e centraliza a sua obra nas mais distintas atividades antrópicas (desmatamento; pastagem; agricultura; mineração; modais de transporte; manejo de rios e das linhas de costa e; áreas urbanas).

Diversos estudos de âmbito internacional promoveram o desenvolvimento dessa concepção metodológica (AGUILAR; OWENS; GIARDINO, 2020; BROWN et al., 2016; CHIRICO et al., 2020; FRAJER et al., 2020; GOUDIE, 1993; GOUDIE; VILES, 2016; HAFF, 2003; HARNISCHMACHER; ZEPP, 2014; JONES et al., 2014; LI et al., 2017; MIGÓN; LATOCHA, 2018; REED; KITE, 2020; RÓZSA, 2007; RÓZSA et al., 2020; SZABÓ; DÁVID; LÓCZY, 2010; TAROLLI; SOFIA, 2016, 2020; TAROLLI et al., 2019; THORNBUSH; ALLEN, 2018).

No Brasil, a aplicação de uma metodologia estruturada nas proposições de Nir (1983) advém do trabalho de Rodrigues (1997), cuja abordagem tem sido adaptada e aprimorada pela autora (RODRIGUES, 2005, 2010; RODRIGUES et al., 2019), culminando na construção de um quadro de orientações metodológicas para a sua aplicação no país. O inventário realizado por Rodrigues et al. (2019) dos estudos de caso que adotam essa perspectiva revela o predomínio de trabalhos sobre as mudanças geomorfológicas provenientes da dinâmica secular da urbanização na Região Metropolitana de São Paulo.

Ao lado desse contexto, a revisão da literatura geomorfológica nacional demonstra a possibilidade de aplicação dessa proposta teórico-metodológica em distintos cenários do país (BARBOSA; LIMA; FURRIER, 2019; FAGUNDES; LUPINACCI, 2017; PASCHOAL; CUNHA; CONCEIÇÃO, 2012; PINTON; CUNHA, 2015; ZANATTA;

LUPINACCI; BOIN, 2015), tanto do ponto de vista das modalidades de intervenção antrópica, quanto da diversidade de sistemas ambientais.

A desmetropolização, iniciada em meados da década de 1980, resultou no crescimento do contingente populacional nas cidades de médio porte do país (ANDRADE; SERRA, 2001; OLIVEIRA; SOARES, 2014; SPOSITO, 2007). Em resposta ao referido processo, admite-se a existência de um quadro de intensificação dos problemas ambientais relacionados às mudanças morfológicas derivadas da ação antrópica nesses centros urbanos.

O município de São Carlos-SP se enquadra nessa conjuntura. Dados dos censos demográficos de 1980 e 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 1982, 2011) evidenciam um aumento de 86% de seu contingente populacional no período. No cenário de 2010, o município contava com 221.950 habitantes, sendo 213.061 residentes em área urbana, os quais representavam 96% da população absoluta. A população estimada no município atingiu a marca de 254.484 pessoas em 2020 (IBGE, 2020), indicando um provável incremento de sua taxa de urbanização.

Concomitantemente, a expansão urbana nesse município foi caracterizada por eixos descontínuos rumo à periferia (LIMA, 2007), que propagaram a degradação de seus sistemas ambientais (MAURO, 1989; OLIVEIRA et al., 2021; PINTON et al., 2019; STANGANINI; LOLLO, 2018). Assim, verifica-se a necessidade da sistematização de estudos fundamentados na perspectiva da Antropogeomorfologia nessa cidade.

A presente investigação teve como objetivo avaliar as mudanças morfológicas induzidas pelas atividades antrópicas em sistema hidrogeomorfológico situado no setor de expansão urbana da cidade de São Carlos-SP.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente, localizada no sudoeste do perímetro urbano de São Carlos, cidade de médio porte do setor centro-leste do estado de São Paulo, foi selecionada como área de estudo (Figura 1) por comportar um dos eixos de expansão do núcleo urbano do município desde a década de 1960 (LIMA, 2007). A implantação de loteamentos populares desprovidos do devido planejamento urbano a partir de 1980 promoveu uma série de problemas ambientais nesse sistema hidrogeomorfológico, como a intensificação de processos erosivos, assoreamento dos cursos d'água, eliminação de nascentes e violações de dispositivos da legislação ambiental vigente (MAURO, 1989; PEDRO; LORANDI, 2004; PINTON et al., 2019; PONS; PEJON; ZUQUETTE, 2007; STANGANINI; LOLLO, 2018).

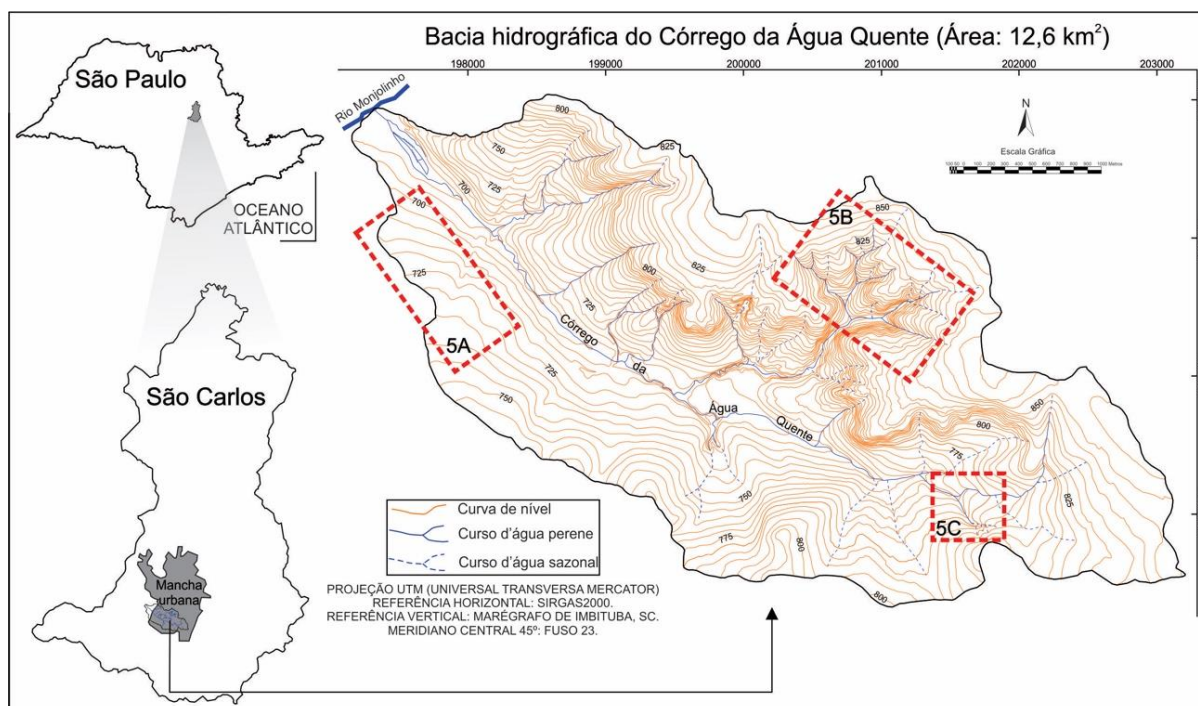


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP). Caixas vermelhas indicam a localização dos setores cobertos pela figura 5.

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com o ordenamento territorial estabelecido no Plano Diretor Municipal (SÃO CARLOS, 2016), a bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente abrange predominantemente a zona de qualificação e ocupação controlada, que é caracterizada por elevada suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos em razão de seus atributos naturais e pela presença de bairros de moradia da população de baixa renda.

A área de estudo situa-se na Bacia Sedimentar do Paraná, unidade geotectônica Fanerozoica preenchida por sedimentos continentais e marinhos, e extensa cobertura de rochas basálticas (ALMEIDA et al., 1981). De acordo com a proposição de Ross e Moroz (1997) para a representação do relevo paulista, a área de estudo está disposta no limite entre o Planalto Residual de São Carlos e o Planalto Centro Ocidental, sendo esse contato marcado pela eminente presença de escarpas erosivas. Sob a perspectiva da divisão geomorfológica do Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo – IPT (1981), ressalta-se que tais escarpas correspondem às encostas do patamar estrutural da província das Cuestas Basálticas.

Nesse setor transicional, o Planalto Residual de São Carlos é composto por colinas de topos convexos. Ross e Moroz (1997) destacam que essa unidade apresenta formas de dissecação média, com vales entalhados e densidade de drenagem média a alta, implicando numa fragilidade potencial média a muito alta.

No âmbito do Planalto Centro Ocidental, a área de estudo está localizada em setor constituído basicamente por colinas amplas e baixas com topos tabulares. Os autores evidenciam que essa unidade é caracterizada por uma baixa fragilidade erosiva em razão da presença de formas de baixo índice de dissecação, com vales pouco entalhados e densidade de drenagem baixa. Esse nível de fragilidade é identificado especialmente nos setores aplanados dos topos das colinas. Todavia, os setores de vertentes dessa unidade morfoescultural que são um pouco mais inclinados possuem elevada suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos, especialmente àqueles provenientes da concentração do escoamento superficial sobre solos com textura média à arenosa (ROSS; MOROZ, 1997).

Em relação aos solos da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente (Figura 2A), constata-se a maior abrangência do Neossolo Quartzarênico, o qual possui elevada erodibilidade em razão de sua baixa coesão e alta permeabilidade (INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC, 2015). A área de estudo ainda é distinguida pelas seguintes classes: Neossolo Flúvico no entorno da foz do curso d'água principal; manchas do Latossolo Vermelho com caráter férrico no baixo curso da bacia e, ainda, ao longo do front da escarpa erosiva e; o Latossolo Vermelho-Amarelo nas zonas de cabeceiras do curso d'água principal e de seus afluentes da margem direita.

Os referidos solos desenvolveram-se sobre litologias com idades variadas (Figura 2B), que se estendem do Mesozoico ao Cenozoico (SÃO PAULO, 1982). Datadas do Mesozoico, encontram-se as Formações Botucatu e Serra Geral, pertencentes ao Grupo São Bento. Em relação ao Cenozoico foram identificados os depósitos de cimeira (SÃO PAULO, 1982).

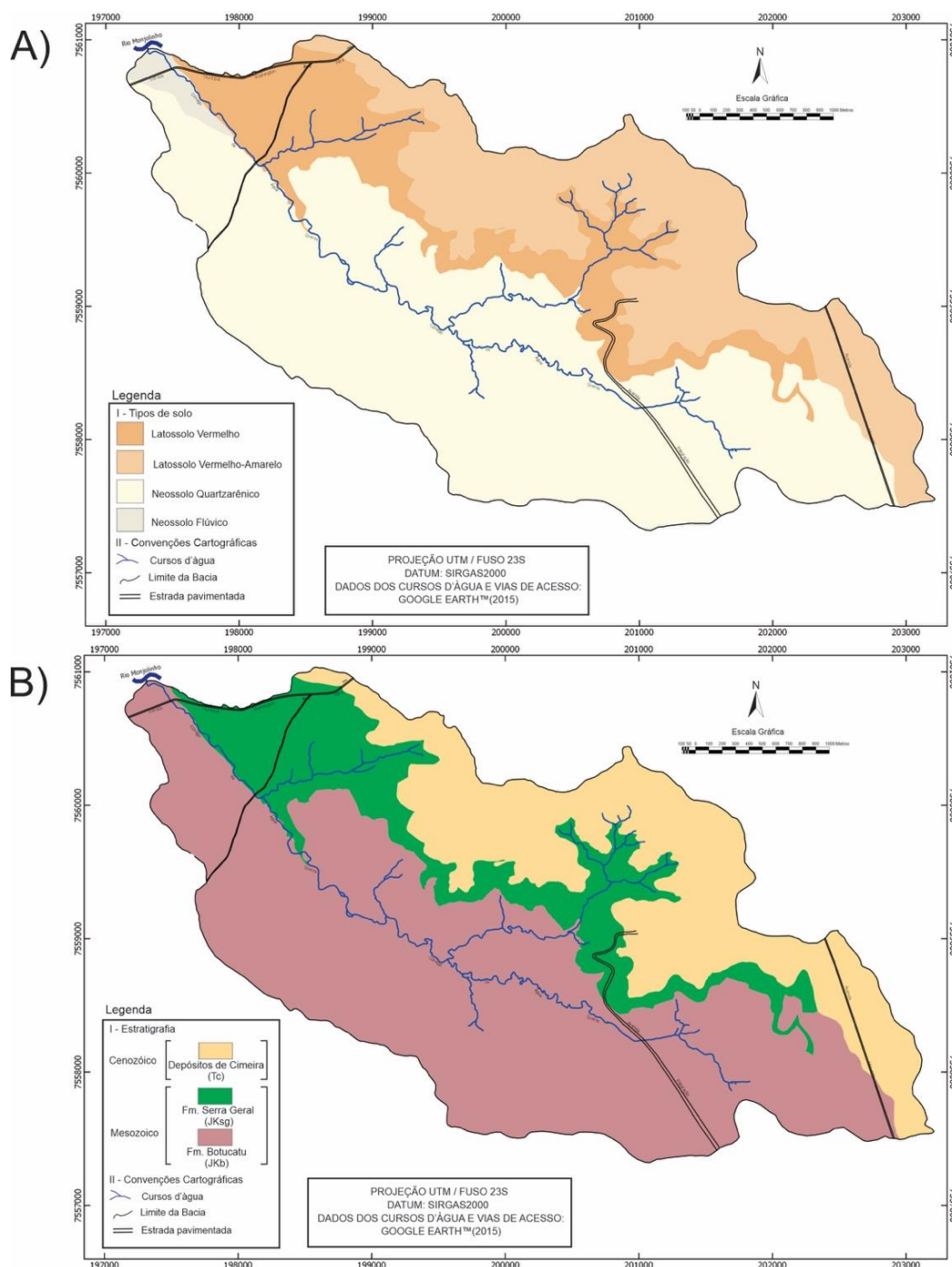


Figura 2 – Esboços cartográficos dos dados lito-pedológicos da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP). (A) Pedologia. (B) Unidades litoestratigráficas.

Fonte: (A) Adaptado de São Carlos (2014); (B) Adaptado de São Paulo (1982).

A decomposição dessas litologias e a morfodinâmica da área de estudo são reguladas pelas características climáticas do tipo Cwa (DUBREUIL et al., 2018). Na normal climatológica provisória 1992-2010

(EMBRABA, 2021), a precipitação total anual é de 1.361,6 mm, sendo os volumes máximo e mínimo registrados, respectivamente, nos meses de janeiro (247,7 mm) e agosto (22,8 mm).

Em relação à dinâmica das massas de ar e dos tipos de tempo, a classificação proposta por Monteiro (1973) permite a distinção da área de estudo em subunidade (Centro-Norte) que integra os climas regionais tropicais alternadamente secos e úmidos, controlados por massas equatoriais (Massa Equatorial Continental) e tropicais (acentuada participação da Massa Tropical Atlântica). Evidencia-se ainda as incursões de sistemas extratropicais (frentes frias e a Massa Polar Atlântica).

Ao lado desses componentes físico-naturais da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente, a supressão da vegetação primitiva pelas interferências antrópicas em setor transicional dos Biomas Cerrado e Mata Atlântica (PROJETO MAPBIOMAS, 2020) se constitui como variável catalisadora dos processos erosivos lineares.

Procedimentos metodológicos

A orientação teórico-metodológica do estudo foi fundamentada nos princípios da Antropogeomorfologia, cuja abordagem compreende as interferências antrópicas enquanto ações que podem romper com o “estado de equilíbrio” (*steady state*) de um sistema (NIR, 1983; RODRIGUES et al., 2019).

Do ponto de vista procedimental, adotaram-se as diretrizes da cartografia geomorfológica retrospectiva em escala de detalhe (1:10.000), e da proposta dos geoindicadores (BERGER, 1997; BERGER; IAMS, 1996; RODRIGUES, 2010; RODRIGUES et al., 2019) em série histórica de 48 anos (1962 – 2010). Com base na geração de arquivos vetoriais no ambiente do software QGIS® 3.12, foram produzidos os seguintes documentos cartográficos:

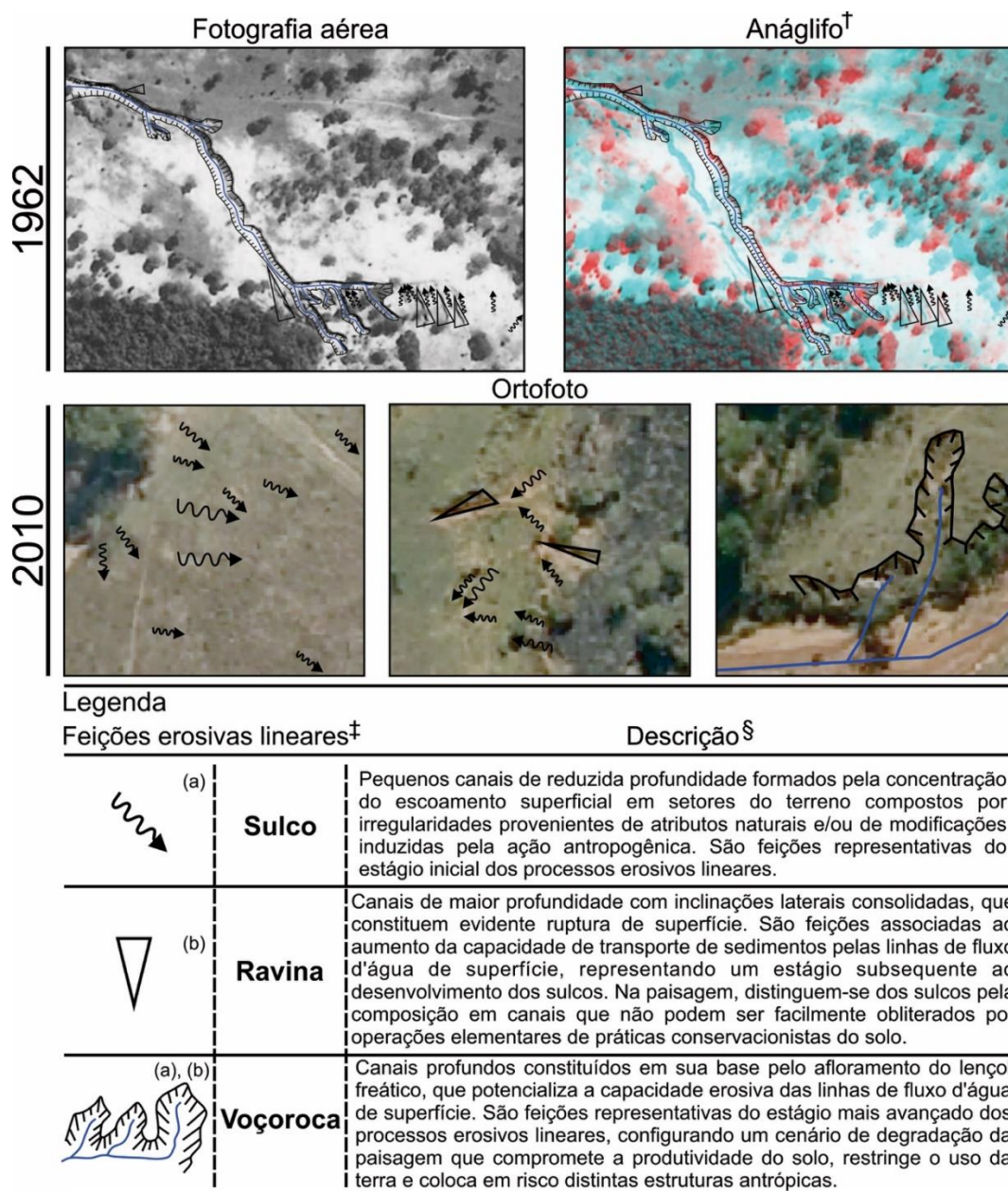
Cartas de feições erosivas lineares: ao integrarem o sexto táxon (ROSS, 1992), essas formas menores pressupõem à dinâmica de processos geomórficos atuais, passíveis de indução pelas atividades antrópicas. A identificação dessas feições em 1962 foi realizada por meio da interpretação de anáglifos gerados no software livre *StereoPhoto Maker*, tendo como material pares estereoscópicos de fotografias aéreas do levantamento aerofotogramétrico desse ano, na escala de 1:25.000, disponibilizadas pelo Laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto (LASERE) do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (USP). O mapeamento do cenário de 2010, por sua vez, foi executado com base na imagem ortorretificada do Projeto de Atualização Cartográfica do Estado de São Paulo – Mapeia São Paulo – da Empresa Paulista de Planejamento

Metropolitano S.A. (EMPLASA), na escala 1:10.000, disponível para integração direta no QGIS via plataforma *Web Map Service* (WMS) do sistema de dados ambientais do estado de São Paulo – DataGEO (<https://datageo.ambiente.sp.gov.br>).

Para a representação dessas formas de relevo foram utilizados os símbolos das propostas de Tricart (1965) e de Verstappen e Zuidam (1975). Com o intuito de favorecer a operacionalização desses procedimentos foi estruturada uma chave de interpretação para o reconhecimento dos três estágios de desenvolvimento das feições erosivas lineares em ambos os cenários (Figura 3).

A quantificação de parâmetros (extensão e quantidade) das feições erosivas lineares permitiu a sua configuração como geoindicadores de origem denudativa, respaldando o monitoramento de processos morfodinâmicos susceptíveis a intensas mudanças em curto intervalo temporal (PINTON; CUNHA, 2015). No contexto dos geoindicadores associados aos canais fluviais, efetuou-se o cálculo do índice de sinuosidade (LEOPOLD; WOLMAN, 1957) para o curso d'água principal.

Carta do estágio de pré-perturbação antrópica: compreende as morfologias “cujos atributos como extensão, [...] rupturas e mudanças de declives, dentre outros, não sofreram alterações significativas por intervenção antrópica direta ou indireta” (RODRIGUES, 2005, p. 103), ainda que os seus sistemas geomorfológicos tenham sido alterados na perspectiva dos processos. A base de dados desse produto cartográfico compreendeu os anáglifos supracitados, as cartas topográficas de 1990 executadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), na escala de 1:10.000, e a carta de uso e cobertura da terra de 1962. A análise correlativa desses dados permitiu a individualização de compartimentos representativos das morfologias dos táxons menores (quinto e sexto) contidos nas unidades morfoesculturais do relevo paulista da área de estudo.



[†]Utilizar óculos 3D para a geração do efeito tridimensional.

[‡]Simbologia com base em: (a) Verstappen e Zuidam (1975) e; (b) Tricart (1975).

[§]De acordo com Goudie (2013); Lepsch (2016); SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA (c2020).

Figura 3 – Chave de interpretação das feições erosivas lineares da Bacia do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Carta da morfologia antropogênica: essas morfologias são derivadas da interferência antrópica como ação que modifica (direta ou indiretamente) as propriedades e a localização dos materiais superficiais, intervindo em vetores, taxas e balanços dos processos geológico-geomorfológicos (RODRIGUES, 2005). Esse documento cartográfico foi elaborado com base na sistematização de unidades espaciais que expressam o

tratamento simultâneo de estágios de intervenção antrópica (pré-perturbação e perturbação ativa), sendo derivadas de combinações dos dados de uso e cobertura da terra com efeitos hidrodinâmicos semelhantes (Figura 4). A definição dessas unidades compreendeu a adaptação da proposta de Moroz-Caccia e Rodrigues (2017).

Unidades espaciais	Descrição	Potenciais efeitos hidrodinâmicos
Morfologias semipreservadas	Formas de relevo compostas por cobertura da terra predominantemente vegetal nativa (formações arbóreas, arbustivas e campestres) e; cursos d'água com características semipreservadas	- > Infiltração; - Canal eficiente no transporte da carga sedimentar produzida na bacia hidrográfica;
Morfologias antropogênicas decorrentes da ocupação urbana	Estágio inicial Formas de relevo com cobertura de superfície de terra batida, configurando loteamentos desocupados ou em processo de ocupação	- > Escoamento superficial difuso com fluxos concentrados em canais artificiais dispostos segundo a configuração dos arruamentos;
	Estágio intermediário Formas de relevo com cobertura de superfície essencialmente pavimentada, com pouca ou sem infraestrutura urbana consolidada	- Aumento do escoamento superficial concentrado;
	Estágio avançado Formas de relevo com cobertura de superfície essencialmente pavimentada, com infraestrutura urbana consolidada	- Intenso escoamento superficial concentrado, deflagrando inúmeras feições erosivas lineares no periurbano; - Aumento na carga de sedimentos para o canal, resultando na intensificação dos processos agradacionais; - Aumento da vazão; - Aumento da sinuosidade do curso d'água principal;
Morfologias antropogênicas decorrentes de atividade rural	Formas de relevo com expressiva cobertura permeável, submetidas ao arranjo agropecuário, com ou sem a adoção de práticas conservacionistas (pasto limpo; cana-de-açúcar; silvicultura; citricultura, outras culturas agrícolas e edificações que compõem as propriedades rurais)	- Infiltração moderada a baixa; - > Escoamento superficial difuso com fluxos concentrados nos canais coletores dos terraços agrícolas; - Aumento na carga de sedimentos para o canal, resultando na intensificação dos processos agradacionais; - Aumento da vazão; - Aumento da sinuosidade do curso d'água principal;
Morfologias associadas ao solo exposto	Formas de relevo sem cobertura vegetal que não possuem relação direta com o uso urbano ou rural	- Aumento do escoamento superficial concentrado;

Figura 4 – Quadro descritivo das unidades espaciais com morfologias pré-perturbação e de perturbação ativa e os seus potenciais efeitos hidrodinâmicos em sistema hidrogeomorfológico do setor de expansão urbana de cidade média.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Diante desse conjunto de dados foi possível atingir as proposições de Moroz-Caccia e Rodrigues (2017) para (i) o desenvolvimento de análises das mudanças morfológicas segundo os distintos cenários (1962 e 2010) do processo histórico de produção do espaço geográfico; (ii) o reconhecimento e dimensionamento dos estágios de intervenção antrópica no sistema; e (iii) o estabelecimento de estimativas do grau de influência das morfologias antropogênicas nos balanços, frequência e magnitude de processos hidrogeomorfológicos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Geoindicadores e morfodinâmica

De modo geral, houve um aumento dos parâmetros dos geoindicadores no período (Tabela 1). Os dados das ravinas foram exceção ao comportamento descrito, haja vista que o aumento em sua quantidade não foi

acompanhado pelo parâmetro de sua dimensão, que revela a configuração de feições com menor extensão. Apesar disso, as propriedades quantificadas dos geoindicadores das vertentes indicam uma intensificação dos processos erosivos lineares na série histórica.

Tabela 1 - Geoindicadores e suas propriedades quantitativas na bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP).

Geoindicadores		Parâmetro	1962	2010
Vertentes	Sulco	Extensão (m)	22.125	31.704
		Quantidade	797	3.641
	Ravina	Extensão (m²)	13.335	2.469
		Quantidade	73	99
	Voçoroca	Extensão (m²)	22.937	31.309
		Quantidade	11	18
Canal fluvial		Índice de sinuosidade	1,13	1,38

Fonte: Elaborado pelos autores.

No cenário de 1962, a maior frequência das feições erosivas lineares ocorreu nos setores da escarpa compostos por declividade acentuada e naqueles dispostos sobre o Neossolo Quartzarênico (Figura 2A). A distribuição espacial dessas feições em 2010 possui relativa similaridade com o arranjo do cenário pretérito. Todavia, registraram-se significativos incrementos de sulcos e ravinas no setor à margem esquerda do baixo curso do Córrego da Água Quente (Figura 5A), e nas zonas de cabeiras de afluente da margem direita desse curso d'água (Figura 5B). Em contrapartida ao panorama de degradação, ressalta-se a existência de considerável redução na extensão de voçoroca situada no alto curso do Córrego da Água Quente no período (Figura 5C).

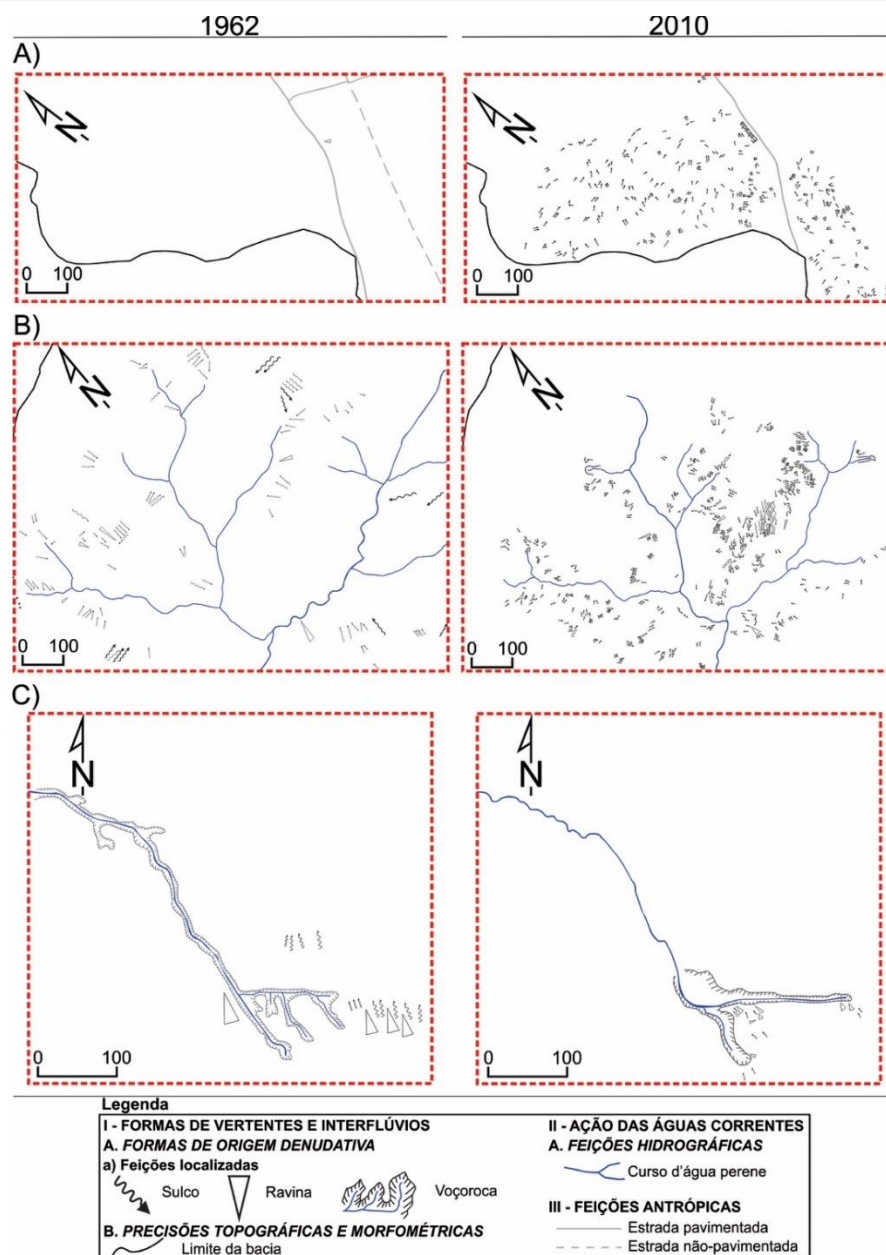


Figura 5 - Mudanças na distribuição de feições erosivas lineares em setores da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP) durante o período 1962-2010. (A) Margem esquerda do baixo curso. (B) Zonas de cabeiras de afluente da margem direita. (C) Voçoroca em anfiteatro do alto curso.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Estágio de pré-perturbação antrópica

A análise da figura 6 demonstra a organização dos compartimentos dos táxons menores individualizados nas unidades morfoesculturais que abrangem a área de estudo. A quantificação das áreas de abrangência de

cada unidade permitiu o seu efetivo dimensionamento, subsidiando a distinção do ordenamento espacial desses sistemas.

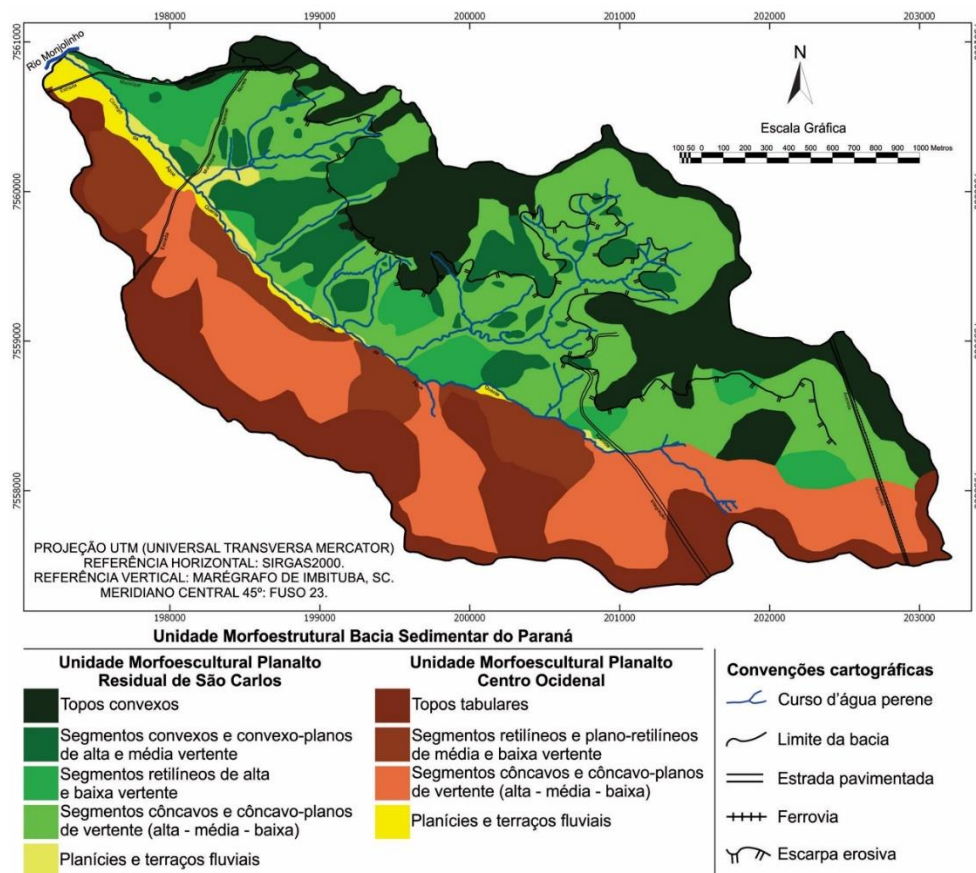


Figura 6 – Carta do estágio de pré-perturbação antrópica da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP).

Fonte: Elaborado pelos autores.

O setor do Planalto Centro Ocidental (Figura 7A) foi composto predominantemente por segmentos côncavos e côncavo-planos das vertentes (39,6%), seguidos pela unidade dos topos tabulares (38,7%). Os demais compartimentos mapeados compreenderam parcelas menores da unidade morfoescultural - segmentos retilíneos e plano-retilíneos de média e baixa vertente (17,1%) e planícies e terraços fluviais (4,6%).

De modo semelhante ao arranjo da unidade morfoescultural descrita acima, o setor do Planalto Residual de São Carlos (Figura 7B) também apresentou uma configuração predominante da unidade de segmentos côncavos e côncavo-planos das vertentes (45,3%). A distribuição espacial das outras unidades reconhecidas no setor ocorreu do seguinte modo: topos convexos (27,6%); segmentos convexos e convexo-planos de alta e média vertente (14,6%); segmentos retilíneos de alta e baixa vertente (10,5%) e; planícies e terraços fluviais (2%).

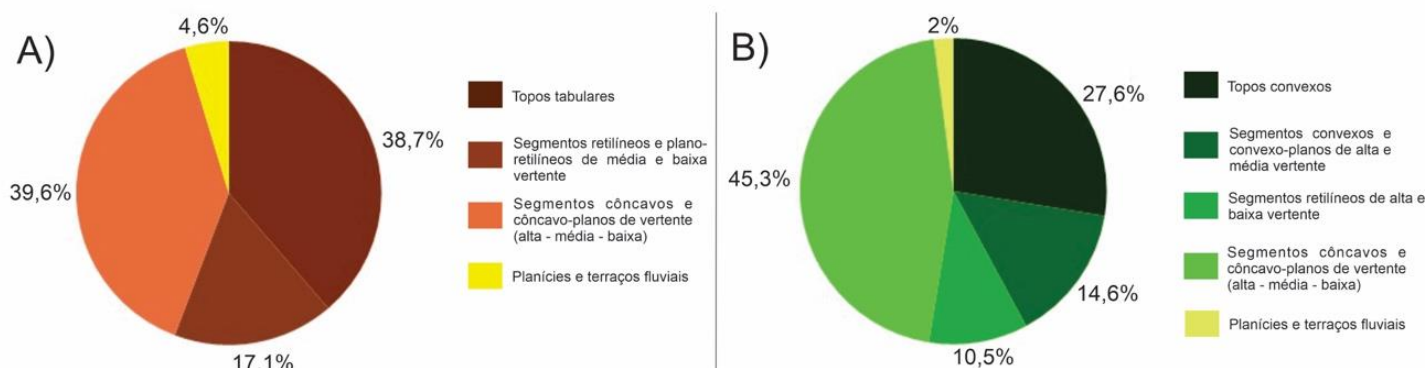


Figura 7 – Dimensão espacial (em %) dos compartimentos dos táxons menores individualizados nas unidades morfoesculturais da área de estudo. (A) Planalto Centro Ocidental. (B) Planalto Residual de São Carlos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Estágio de perturbação ativa

A carta da morfologia antropogênica da área de estudo (Figura 8) evidencia a conjunção de padrões de uso e cobertura da terra típicos do urbano (bairros periféricos consolidados; bairros periféricos pouco consolidados de moradia popular; loteamentos em processo de ocupação) e do rural (fragmentos de vegetação nativa e distintos arranjos destinados à agropecuária).

Os diversos estágios de morfologias provenientes do urbano expressam a materialização da lógica do mercado imobiliário no município, configurada por vetores de expansão rumo à periferia da cidade de modo descontínuo entre a década de 1950 e o início do século XXI (COSTA et al., 2013; LIMA, 2007; STANGANINI; LOLLO, 2018).

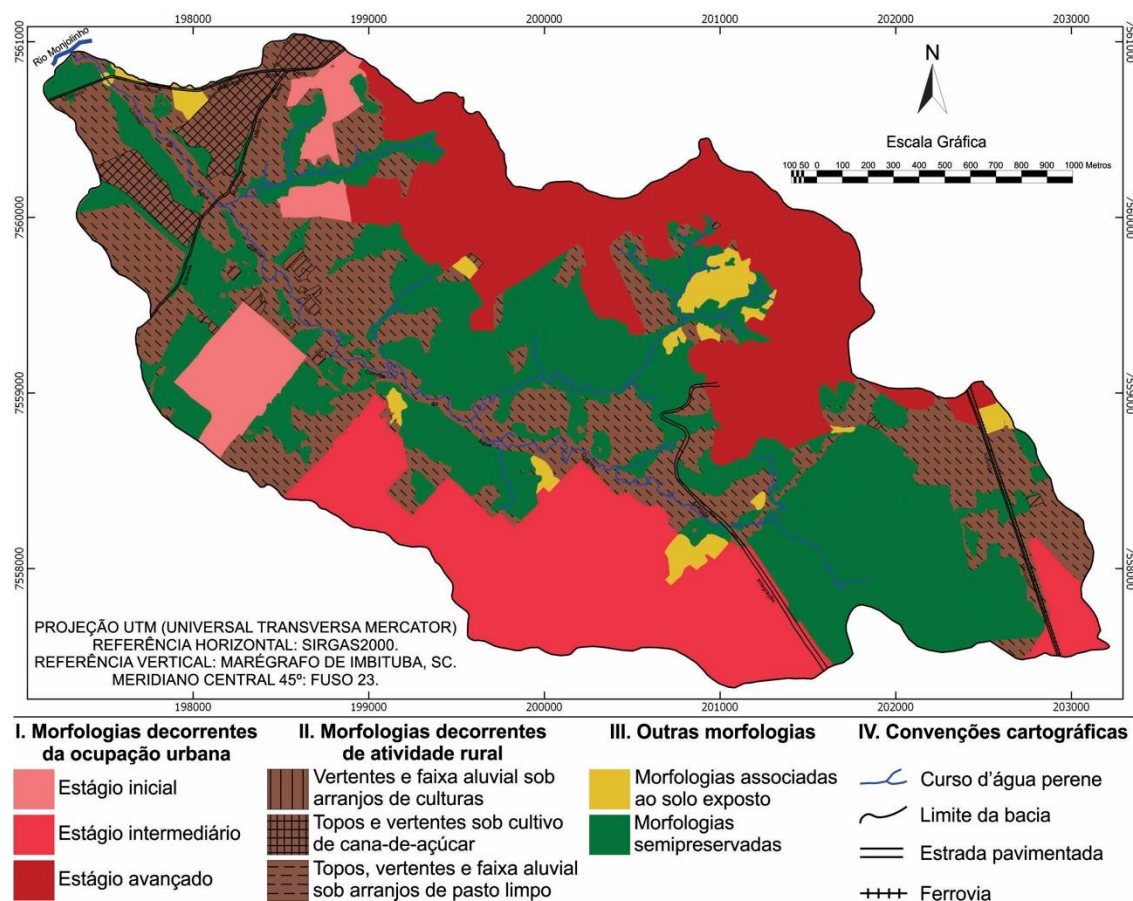


Figura 8 – Carta da morfologia antropogênica da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos (SP).

Fonte: Elaborado pelos autores

A área com morfologias do estágio avançado de ocupação urbana (Figura 8) coincide com os loteamentos implementados nas porções oeste e sudoeste da mancha urbana do município entre a década de 1950 e 1970.

O setor mapeado com morfologias urbanas em estágio intermediário de ocupação abarca o loteamento popular instalado na década de 1980, correspondente ao bairro “Cidade Aracy”. Apesar de quase meio século decorrido de seu estabelecimento, tal bairro ainda integra as áreas de especial interesse social no Plano Diretor municipal (SÃO CARLOS, 2016, p. 5) por compreender conjuntos habitacionais ou loteamentos destinados à moradia da população de baixa renda “que necessitam de melhorias urbanísticas, recuperação ambiental e regularização fundiária de assentamentos precários e irregulares”. A implantação de outras unidades habitacionais de interesse social em 2010 definiu os setores com morfologias urbanas em estágio inicial de ocupação.

No total, as morfologias antropogênicas decorrentes do urbano abarcavam 38,8% da bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente (Figura 9). Ao mesmo tempo que esse valor denota um relativo controle da expansão urbana, respeitando as condições de sua zona urbana (SÃO CARLOS, 2016), ele configura um potencial risco de novo ciclo de mudanças morfológicas decorrentes do urbano caso as diretrizes da política urbana do município não sejam efetivadas pelo poder público.

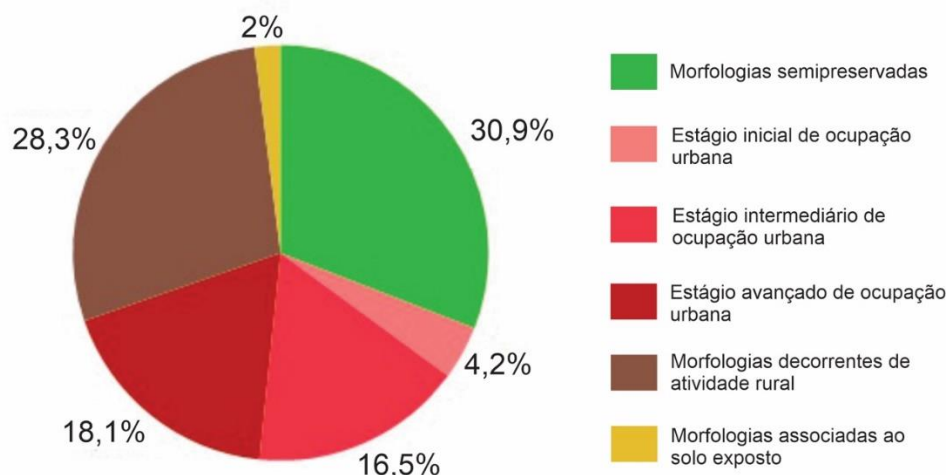


Figura 9 – Área ocupada (em %) das unidades espaciais de morfologia antropogênica da área de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

No âmbito das morfologias antropogênicas vinculadas ao uso rural, essas ocuparam 28,3% (Figura 9) da área de estudo, com o predomínio de vertentes submetidas aos arranjos de pastagem e, de modo secundário, ao cultivo da cana-de-açúcar e aos pequenos fragmentos de culturas associados às chácaras de recreio.

Ressalta-se a expressiva existência de setores com morfologia semipreservada (30,9%), relacionados especialmente aos fragmentos de vegetação nativa. Conforme a redação do plano diretor à zona urbana que envolve a área de estudo, deve-se manter tais áreas verdes significativas (SÃO CARLOS, 2016).

Implicações de morfologias antropogênicas sobre processos morfodinâmicos em setor de expansão urbana de cidade média

Os cenários de pré-perturbação antrópica (Figura 6) e da morfologia antropogênica (Figura 8) foram caracterizados por uma intensa morfodinâmica nas vertentes, expressa nos dados dos geoindicadores (Tabela 1). Essa conjuntura configura um padrão morfodinâmico complexo do sistema em análise, que responde à combinação entre os seus condicionantes físico-naturais e socioeconômicos.

Todavia, o aumento expressivo dos parâmetros dos geoindicadores de modo concomitante à composição do estágio de perturbação ativa demonstra a influência das morfologias antropogênicas na deflagração de desequilíbrios na magnitude de processos hidrogeomorfológicos.

Na paisagem rural, a abertura de glebas para o pasto limpo no setor à margem esquerda do baixo curso do Córrego da Água Quente (Figura 8) implicou em expressivo aumento de sulcos e ravinas (Figura 5A). Apesar desse tipo de pastagem ser comumente organizado com técnicas de manejo de caráter mecânico que conduzem ao controle dos processos erosivos, o contexto expressa a suscetibilidade dos atributos litopedológicos do setor. Nesse caso, admite-se ainda que a estrutura da morfologia antropogênica não coíbe o desenvolvimento da erosão linear, que passa a ser estabelecida nos canais coletores dos terraços agrícolas. Essa conjuntura foi registrada em estudos fundamentados na Antropogeomorfologia em sistemas exclusivamente rurais (PINTON; CUNHA, 2015; ZANATTA; LUPINACCI; BOIN, 2015).

Em contrapartida, a manutenção de morfologia semipreservada no cenário de perturbação ativa (Figura 8) em setor do Planalto Centro Ocidental com maior potencial hidrodinâmico ao desenvolvimento de processos erosivos lineares em razão de sua disposição na unidade espacial dos segmentos côncavos e côncavo-planos das vertentes (Figura 6) acarretou no controle de ampla voçoroca situada no alto curso do Córrego da Água Quente (Figura 5C).

No contexto do Planalto Residual de São Carlos, as mudanças nesse compartimento induzidas por morfologias do estágio avançado de ocupação urbana e associadas a solo exposto (Figura 8) promoveram a massiva configuração de sulcos e ravinas nas zonas de cabeceiras de afluentes da margem direita do Córrego da Água Quente (Figura 5B).

A impermeabilização do solo, acrescida da disposição dos arruamentos, estabeleceram canais artificiais na paisagem que potencializaram a concentração do fluxo do escoamento superficial nas áreas periurbanas. Apesar do registro de morfologias semipreservadas na circunvizinhança, a inexistência de aparelhos urbanos para dissipar a energia da água concentrada nesses setores acarretou no desenvolvimento das referidas feições erosivas.

As mudanças morfológicas decorrentes dos usos urbanos e rurais no estágio de perturbação ativa conferiram um quadro erosivo de instabilidade nas vertentes da área de estudo. O subsequente aumento da carga de sedimentos no curso do Córrego da Água Quente impôs mudança no seu traçado, caracterizado por menor índice de sinuosidade (1,13) no cenário de pré-perturbação antrópica (Tabela 1; Figura 6), e com maior

sinuosidade (1,38) naquele das morfologias antropogênicas (Tabela 1; Figura 8). Ressalta-se que a variação dessa métrica difere dos valores obtidos em sistemas hidrogeomorfológicos urbanizados da Região Metropolitana de São Paulo, que apresentaram redução significativa (RODRIGUES et al., 2019). Nos sistemas sob tal grau de urbanização, as intervenções foram realizadas de modo direto por meio da retificação do canal, enquanto nesse disposto em setor de expansão de cidade média, a resposta esteve atrelada às ações antrópicas indiretas.

IV. CONCLUSÕES

A presente investigação configura a primeira contribuição para o mapeamento dos cenários representativos da morfologia pré-perturbação antrópica e antropogênica em sistema hidrogeomorfológico caracterizado pela expansão de cidade brasileira de médio porte.

Os dados obtidos na bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente demonstraram os efeitos de morfologias antropogênicas em seus processos morfodinâmicos, com destaque às alterações do equilíbrio dos fluxos hídricos em superfície e subsuperfície dos segmentos de vertentes, que acarretaram na composição de canais de concentração do escoamento superficial e subsequente degradação dos solos pela erosão linear em série histórica de 48 anos.

No contexto dos geoindicadores, recomenda-se a incorporação de outras métricas associadas ao canal para o entendimento de pormenores da interferência de mecanismos do estágio de perturbação ativa na morfodinâmica dos processos fluviais.

Ao considerar a atual tendência de crescimento das cidades médias brasileiras, torna-se imprescindível a incorporação de preocupações sobre as mudanças morfológicas antropogênicas nos setores de expansão urbana para subsidiar a formulação de modelos de planejamento físico-territorial adequados com as suas respectivas características ambientais.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao PIBIC/CNPq. O segundo autor agradece a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG)/UFTM pelo apoio no desenvolvimento do projeto de pesquisa (n. 88/2019) associado ao presente manuscrito. Os autores agradecem os revisores pelas valiosas contribuições que promoveram melhorias na qualidade do manuscrito.

V. REFERÊNCIAS

- AGUILAR, R. G.; OWENS, R.; GIARDINO, J. R. The expanding role of Anthropogeomorphology in critical zone studies in the Anthropocene. *Geomorphology*, v. 366, p. 1-25, out. 2020.
- ALMEIDA, F. F. M. de.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. de B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, p. 1-29, 1981.
- ANDRADE, T. A.; SERRA, R. V. (org.). *Cidades médias brasileiras*. Rio de Janeiro: IPEA, 2001.
- BARBOSA, T. S.; LIMA, V. F. de; FURRIER, M. Mapeamento geomorfológico e geomorfologia antropogênica do município do Conde – Paraíba. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 3, p. 525-540, jul./set. 2019.
- BERGER, A. R. Assessing rapid environmental change using geoindicators. *Environmental Geology*, v. 321, p. 36-44, 1997.
- BERGER, A. R.; IAMS, W. J. (Ed.). *Geoindicators: assessing rapid environmental change in Earth systems*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996.
- BROWN, A. G.; TOOTH, S.; BULLARD, J. E.; THOMAS, D. S. G.; CHIVERRELL, R. C.; PLATER, A. J.; MURTON, J.; THORNDYCRAFT, V. R.; TAROLLI, P.; ROSE, J.; WAINWRIGHT, J. DOWNS, P.; AALTO, R. The geomorphology of the Anthropocene: emergence, status and implications. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42, n. 1, p. 71-90, jun. 2016.
- CHIRICO, P. G.; BERGSTRESSER, S. E.; DEWITT, J. D.; ALESSI, M. A. Geomorphological mapping and anthropogenic landform change in an urbanizing watershed using structure-from-motion photogrammetry and geospatial modeling techniques. *Journal of Maps, Latest Articles*, p. 1-12, abr. 2020.
- COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; CESPEDES, J. G.; SILVA, L. F. Monitoramento da expansão urbana, cenários futuros de crescimento populacional e o consumo de recursos hídricos no município de São Carlos, SP. *Geociências, São Paulo*, v. 32, n. 1, p. 63-80, 2013.
- DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. *Confins*, n. 37, 2018. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/15738>>. Acesso em 15 set. 2020.
- EMBRAPA. Condições meteorológicas: estação da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=caracterizacao>>. Acesso em 15 fev. 2021.
- FAGUNDES, A.; LUPINACCI, C. M. Urbanização e alterações geomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Córrego Lavapés – Rio Claro (SP). *Revista do Departamento de Geografia, São Paulo*, v. 33, p. 47-62, ago. 2017.
- FRAJER, J.; PAVELKOVÁ, R.; LÉTAL, A.; KOPP, J. Relics and transformation of former ponds in the urban environment of the historical region of Bohemia (Czech Republic). *Journal of Maps, Latest Articles*, p. 1-11, set. 2020.
- GOLOMB, B.; EDER, H. M. Landforms made by man. *Landscape*, v.14, p. 4-7, 1964.
- GOUDIE, A. S. Human influence in geomorphology. *Geomorphology*, v. 7, n. 1-3, p. 37-59, mar. 1993.
- GOUDIE, A. S. (Ed.). *Encyclopedia of Geomorphology*. London: Routledge, 2013. 2 v.
- GOUDIE, A. S.; VILES, H. A. *Geomorphology in the Anthropocene*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

- HAFF, P. K. Neogeomorphology, prediction, and the anthropic landscape. In: WILCOCK, P. R.; IVERSON, R. M. (Ed.). Prediction in geomorphology. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2003. p. 15-26.
- HARNISCHMACHER, S.; ZEPP, H. Mining and its impact on the earth surface in the Ruhr District (Germany). Zeitschrift für Geomorphologie, v. 58, n. 3, p. 3-22, jul. 2014.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. Solos do estado de São Paulo. 2015. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo demográfico 1980: dados gerais, migração, instrução, fecundidade, mortalidade. Rio de Janeiro: IBGE, 1982.
- _____. Censo demográfico 2010 – características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- _____. Tabelas de estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acesso em: 15 set. 2020.
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981. (Nota Explicativa).
- JONES, D. K.; BAKER, M. E.; MILLER, A. J.; JARNAGIN, S. T.; HOGAN, D. M. Tracking geomorphic signatures of watershed suburbanization with multitemporal LiDAR. Geomorphology, v. 219, p. 42-52, ago. 2014.
- LEOPOLD, L. B. WOLMAN, M. G. River channel patterns braided, meandering, and straight. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1957. (Geological Survey Professional Paper 282-B).
- LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de textos, 2016.
- LI, J.; YANG, L.; PU, R.; LIU, Y. A review on anthropogenic geomorphology. Journal of Geographical Sciences, v. 27, p. 109-128, jan. 2017.
- LIMA, R. P. O processo e o (des)controle da expansão urbana de São Carlos (1857-1977). 2007. 193 f. Dissertação (Mestrado em Teoria e História da Arquitetura e do Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- MAURO, C. A. Voçorocas: marcas das relações sociedade-natureza na bacia do Monjolinho – São Carlos (SP). 1989. 235 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- MIGÓN, P.; LATOCHA, A. Human impact and geomorphic change through time in the Sudetes, Central Europe. Quaternary International, v. 470, p. 194-206, mar. 2018.
- MONTEIRO, C. A. de F. A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo – estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1973.
- MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C.; RODRIGUES, C. Mudanças morfológicas e efeitos hidrodinâmicos do processo de urbanização na bacia hidrográfica do Rio Tamanduateí – Região Metropolitana de São Paulo. Geosp – Espaço e Tempo, v. 21, n. 1, p. 257-283, abr. 2017.
- NIR, D. Man, a geomorphological agent: an introduction to anthropic geomorphology. Jerusalem: Keter

Publishing House, 1983.

OLIVEIRA, H. C. M. de; SOARES, B. R. Cidade média: apontamentos metodológicos e tipologia. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 15, n. 52, p. 119-133, dez. 2014.

OLIVEIRA, V. G. de; CORRÊA, R. F. M.; OLIVEIRA, S. A. F. de; ASCIUTTI, G. A. M.; JACÓ, A. P.; MAZZUCO, G. G.; MENEZES, D. B. Avaliação da transformação antropogênica de terreno público urbano no município de São Carlos-SP. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n.1, p.121-134, jan./mar. 2021.

PASCHOAL, L. G.; CUNHA, C. M. L.; CONCEIÇÃO, F. T. da. A cartografia geomorfológica como subsídio para a análise do relevo antropogênico em área de mineração. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 4, p. 379-391, out./dez. 2012.

PEDRO, F. G.; LORANDI, R. Potencial natural de erosão na área periurbana de São Carlos-SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 56, n. 1, p. 28-33, jul. 2004.

PINTON, L. de G.; CUNHA, C. M. L. da. O uso de geoindicadores em paisagem rural: subsídios à análise das mudanças morfológicas Antropogênicas da Bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia (SP). *Revista do Departamento de Geografia - USP, São Paulo*, v. 29, p. 1-19, 2015.

PINTON, L. de G.; SUIZU, T. M.; MATOS, A. L.; OLIVEIRA, L. C. de. Inserção de princípios da Antropogeomorfologia no ensino médio: subsídios ao desenvolvimento da linguagem cartográfica e de concepções da Geografia Física. *Geosaberes*, Fortaleza, v. 10, n. 22, p. 62-71, 2019.

PONS, N. A. D.; PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Use of geoprocessing in the study of land degradation in urban environments: the case of the city of São Carlos, state of São Paulo, Brazil. *Environmental Geology*, v. 53, p. 727-739, mar. 2007.

PROJETO MAPBIOMAS. Coleção 5.0 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. Disponível em: <<https://plataforma.mapbiomas.org>>. Acesso em: 15 de setembro de 2020.

REED, M.; KITE, S. Peripheral gully and landslide erosion on an extreme anthropogenic landscape produced by mountaintop removal coal mining. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 45, n. 9, p. 2078-2090, jul. 2020.

RODRIGUES, C. *Geomorfologia Aplicada: avaliação de experiências e de instrumentos de planejamento físico-territorial e ambiental brasileiros*. 1997. 299 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

_____. Morfologia original e morfologia antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: exemplo na metrópole paulista. *Revista do Departamento de Geografia - USP, São Paulo*, n. 17, p. 101-111, 2005.

_____. Avaliação do impacto humano da urbanização em sistemas hidro- geomorfológicos. Desenvolvimento e aplicação de metodologia na grande São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia - USP, São Paulo*, v. 20, p. 111-125, 2010.

RODRIGUES, C.; GOUVEIA, I. C. M. C.; LUZ, R. A.; VENEZIANI, Y.; SIMAS, I. T. H.; SILVA, J. P. Antropoceno e mudanças geomorfológicas: sistemas fluviais no processo centenário de urbanização de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, v. 40, n. 1, p. 105-123, 2019.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia - USP, São Paulo*, n. 6, p. 17-29, 1992.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo: escala 1:500.000. São Paulo: FFLCH-USP; IPT; FAPESP, 1997. 2 v.

RÓZSA, P. Attempts at qualitative and quantitative assessment of human impact on the landscape. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, v. 30, n. 2, p. 233-238, 2007.

RÓZSA, P.; INCZE, J.; BALOGH, S.; NOVÁK, T. J. A novel approach to quantifying the degree of anthropogenic surface transformation – the concept of ‘hemeromorphy’. *ERDKUNDE – Archive for Scientific Geography*, v. 74, n. 1, p. 45-57, mar. 2020.

SÃO CARLOS (Cidade). Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano. Mapa de Pedologia combinado com o Mapa de Declividade. São Carlos: SMH DU, 2014. Escala 1:55.000.

_____. Lei nº 18.053, de 19 de dezembro de 2016. Estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências. *Diário Oficial [de] São Carlos*, São Carlos, SP, 28 dez. 2016. Disponível em: https://www.saocarlosocial.com.br/diariooficial/001/DO_28122016_HNGB66.pdf. Acesso em: 15 setembro 2020.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. Mapa Geológico de São Paulo: Campinas (Folha SF-23-Y-A). Coordenação de Paulo Milton Barbosa Landim. São Paulo: DAEE, 1982. Escala 1:250.000.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA. Glossary of soil science terms. c2020. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary>>. Acesso em 15 de set. de 2020.

SPOSITO, M. E. B. Cidades médias: espaços em transição. São Paulo: Expressão Popular, 2007.

STANGANINI, F. N.; LOLLO, J. O crescimento da área urbana da cidade de São Carlos/SP entre os anos de 2010 e 2015: o avanço da degradação ambiental. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 118-128, 2018.

SZABÓ, J.; DÁVID, L.; LÓCZY, D. (Org.). *Anthropogenic geomorphology: a guide to man-made landforms*. New York: Springer, 2010.

TAROLLI, P.; SOFIA, G. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology*, v. 255, p. 140-161, fev. 2016.

_____. Remote sensing for the analysis of anthropogenic geomorphology: potential responses to sediment dynamics in the agricultural landscapes. In: TAROLLI, P.; MUDD, S. M. (ed.) *Remote sensing of Geomorphology*. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 255-269.

TAROLLI, P.; CAO, W.; SOFIA, G.; EVANS, D.; ELLIS, E. C. From features to fingerprints: a general diagnostic framework for anthropogenic geomorphology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, v. 43, n. 1, p. 95-128, fev. 2019

THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. (Ed.). *Urban Geomorphology: landforms and processes in cities*. Amsterdam: Elsevier, 2018.

TRICART, J. *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Paris: Masson, 1965.

VERSTAPPEN, H. T.; ZUIDAM, R. A. van. *ITC System of geomorphological survey: manual ITC textbook*. Enschede, Holanda: ITC, 1975.

ZANATTA, F. A. C.; LUPINACCI, C. M.; BOIN, M. N. O uso da terra e alterações do relevo na alta bacia do Ribeirão

Areia Dourada, Marabá Paulista (SP): um estudo a partir de princípios da antropogeomorfologia. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 16, n. 1, p. 03-17, jan./mar. 2015.