

Revista  
**Ciência, Tecnologia & Ambiente**

---

## Legislação ambiental e áreas ripárias em microbacia de abastecimento público

Environmental legislation and riparian areas in public supply watersheds

Rafael Marini Paschoaletti Perri dos Santos<sup>1\*</sup>, Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes-Assad<sup>2</sup>,  
Adriana Cavalieri Sais<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Araras, SP, Brasil. \*Autor para correspondência:  
marini.eng.florestal@gmail.com

<sup>2</sup> Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Araras, SP, Brasil.

**Como citar:** SANTOS, R.M.P.P., LOPES-ASSAD, M.L.R.C. & SAIS, A.C. 2019. Legislação ambiental e áreas ripárias em microbacia de abastecimento público. *Ciência, Tecnologia & Ambiente*, vol. 9, e09153. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.09153>.

---

### RESUMO

Vegetação nativa em faixas marginais protege recursos hídricos da microbacia e oferece serviços ecossistêmicos. Em algumas regiões, o ecossistema ripário é degradado e requer ações para a restauração florestal. O objetivo deste trabalho foi identificar áreas hidrologicamente importantes em duas microbacias hidrográficas (MBH) e propor áreas prioritárias para restauração florestal. Com base nos limites estabelecidos pela Lei de Proteção da Vegetação Nativa sobre as faixas de vegetação ciliares, ou áreas de preservação permanente, e por meio de geotecnologias, foram processadas imagens com 30 e 90 m de resolução espacial, para estabelecer modelo de elevação e mapas dos índices topográficos de umidade e de categorização das formas dos elementos do terreno. Foi utilizado, também, um mapa de uso e ocupação dos solos com resolução espacial de 5 m. As áreas prioritárias identificadas por meio de álgebra de mapas estavam próximas ao canal de drenagem das MBH e parte delas excedeu a faixa mínima de proteção florestal definida pela legislação brasileira. Portanto, os limites definidos por lei não são suficientes para garantir a proteção total dos sítios ribeirinhos estudados e a metodologia adotada foi eficiente para orientar as ações de gerenciamento de recursos hídricos em larga escala.

**Palavras-chave:** TWI, elementos de paisagem, imagens SRTM, imagens Aster, Lei de Proteção da Vegetação Nativa.

---

### ABSTRACT

Native vegetation in riparian buffer zones protects water resources from the watershed and provides ecosystems services. In some regions, riparian ecosystems are degraded and require forest restoration actions. This work aims to identify important hydrological areas at two watersheds (MBH) and to propose priorities areas for forest restoration. Based on the limits established by the Brazilian Forest Law (Native Vegetation Protection Law of Brazil) for riparian buffers zones, or permanent preservation areas, and using geotechnologies, images with 30 m and 90 m of spatial resolution were processed to establish digital elevations models and maps for topographic wetness index (TWI) and landforms elements. A land use and occupation map with a spatial resolution of 5 m was also used. The priority areas identified through map algebra were close to the MBH drainage channel and part of them exceeded the minimum range of forest protection defined by Brazilian legislation. Therefore, the limits defined by law are not sufficient to guarantee the total protection of the riverside sites studied and the adopted methodology was efficient to guide the actions of water resources management on a large scale.

**Keywords:** TWI, landform elements, SRTM image, Aster image, Brazilian Forest Law.



## INTRODUÇÃO

Os ecossistemas terrestres podem ser entendidos como zonas terrestres próximas a corpos hídricos, onde ocorrem múltiplas interações entre o meio aquático, terrestre e vegetação, conferindo-lhes características distintas em relação às demais áreas de uma bacia hidrográfica (Bendix, 2017). Possuem uma dinâmica espacial e temporal regida pelo clima, processos hidrológicos e geomorfológicos, e pela sucessão ecológica de plantas terrestres e do ecossistema aquático (Gregory et al., 1991).

Este ecossistema, quando funciona adequadamente, é responsável por diversos serviços ecossistêmicos (Swanson et al., 2017), sendo que, talvez o mais notável, seja o de contribuir para a qualidade hidrogeoquímica da água (Hamilton et al., 2008). Portanto, identificar o ecossistema ripário ou áreas de caráter ripário, como áreas ripárias degradadas, é de grande importância para programas de conservação das águas em bacias e microbacias hidrográficas, principalmente àquelas destinadas ao abastecimento público. Deste modo, é fundamental a identificação do ecossistema ripário no contexto da paisagem.

A paisagem, como um geossistema, incorpora elementos distintos de diferentes estruturas em sua composição, tais como elementos abióticos – água, relevo, solo, ar (estruturas de paisagem primária); elementos físicos oriundos de ação humana – uso do solo, edificações, etc (estruturas de paisagem secundárias); e fatores socioeconômicos – elementos intangíveis de caráter e interesse particulares de indivíduos e ou grupos inseridos na paisagem (Miklós et al., 2018). Uma abordagem com base em combinações de alguns elementos da estrutura de paisagem pode contribuir para uma análise representativa de processos atuantes no ambiente. A descrição do contínuo da superfície do terreno, por exemplo, permite comparações quantitativas baseadas na diferenciação qualitativa destes elementos (MacMillan e Shary, 2009), permitindo inferir sobre processos hidrológicos, como a forma como a água se desloca pelo terreno e influencia características pedológicas e ecológicas na paisagem (Pennock et al., 1987).

Visando proteger a integridade dos mananciais, corpos d'água e cursos hídricos, além de biodiversidade, estabilidade geológica e beleza cênica, o artigo 4º

da Lei 12.651 (Brasil, 2012) estabelece regras para a manutenção de faixas com vegetação nativa nesses locais. As regras para a largura das faixas de proteção com vegetação ripária são determinadas de acordo com a natureza hídrica, variando de 30 a 500 metros. Mas para casos específicos, determinados conforme o histórico e o tamanho de propriedade rural (em módulo fiscal), pode haver flexibilização (redução) do tamanho das faixas de proteção mínima exigida a serem recuperadas/ restauradas.

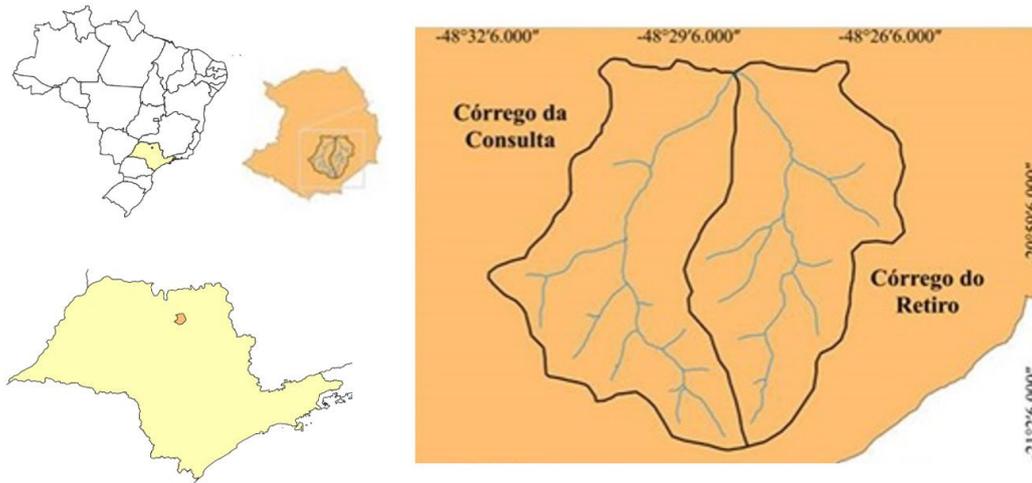
Assumindo que os limites estabelecidos pela Lei de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN) sobre as faixas marginais de cursos d'água podem não garantir integralmente a proteção das áreas ripárias, objetivou-se com este trabalho identificar áreas hidrológicas em duas microbacias hidrográficas (MBH), responsáveis pelo abastecimento público de água de um município paulista, e propor áreas prioritárias para restauração florestal.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

O estudo foi conduzido nas MBHs do Córrego da Consulta (20°59'29.14" S e 48°30'2.88" O) e MBH do Córrego do Retiro (20°59'9.88" S e 48°27'41.07" O), pertencentes à unidade de gerenciamento de recursos hídricos denominada Baixo Pardo/ Grande. Estão localizadas no município de Bebedouro (SP) e são as principais fontes de água para o abastecimento público urbano (Figura 1). A área de estudo encontra-se sob os domínios Mata Atlântica e Cerrado (Universidade Federal de Goiás, 2016a, 2016b). As MBHs dos Córregos da Consulta e do Retiro com áreas de 40,23 e 36,20 ha respectivamente, possuem características físicas semelhantes, com um padrão de drenagem hidrográfica dendrítico e orientação predominante no sentido Norte. O ponto mais alto se encontra a 646 m de altitude e o mais baixo, onde está localizada a área urbana do município, se situa a 547 m, na confluência dos Córregos da Consulta e do Retiro, formando o Córrego Bebedouro, em um curso de 4ª ordem, de acordo com a hierarquia de Strahler (Santos et al., 2018).

A média anual de precipitação na região, de acordo com série temporal de 1999 a 2015 (Universidade Federal de Goiás, 2016c), é de 1.482 mm. A distribuição das chuvas mostra um regime hídrico bem definido, dividido



**Figura 1.** Localização das microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, no município de Bebedouro, SP.

em período seco (abril a setembro) e período chuvoso (outubro a março) (Santos et al., 2018).

Áreas de uso antrópico, majoritariamente áreas agrícolas, representam 85 e 86% da área total das MBH da Consulta e do Retiro, respectivamente (Santos et al., 2018). Outros elementos que compõem a paisagem são corpos d'água artificiais, áreas edificadas, formação florestal, silvicultura e área de vegetação herbácea não cultivada (Santos et al., 2018).

### Geoprocessamento

Foram utilizados dados dos sensores orbitais SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e imagens *Google Earth*. A integração dos dados foi feita no sistema de informações geográficas QGIS 2.18, com apoio das ferramentas SAGA - *System for Automated Geoscientific Analyses* e GRASS - *Geographic Resources Analysis Support System*, disponíveis na plataforma QGIS.

Dois modelos digitais de elevação (MDE) foram gerados a partir de dados do SRTM, de 90 m de resolução espacial (MDE-90), e ASTER, com resolução espacial de 30 m (MDE-30). Para permitir a álgebra dos MDEs, os mesmos foram padronizados com grades de 15 m usando a interpolação *Multilevel  $\beta$ -Spline* (Lee et al., 1997) e posteriormente foram pré-processados para a remoção de dados discrepantes de elevação, pelos métodos de Planchon e Darboux (2002), no módulo *Terrain Analysis* no SAGA-GIS (Santos et al., 2018).

No SAGA GIS foram processados os mapas dos atributos que compõem o índice topográfico de umidade (TWI, da sigla em inglês), a partir do MDE-90 que foi utilizado por definir melhor os canais de drenagem. Para as formas dos elementos do terreno (FET), utilizaram-se o MDE-30, para que as classes geradas pudessem ser mais precisas, e os módulos *Aspect*, *Curvature* e *Slope* com posterior reclassificação. Com a integração desses dados com o mapa de uso do solo (Santos et al., 2018), foram definidas as áreas prioritárias para restauração florestal das MBH a partir de álgebra de mapas.

### Delimitação das Áreas Prioritárias

A delimitação das áreas prioritárias é resultado de interpretação e cruzamento dos mapas de TWI (índice topográfico de umidade) e FET (forma dos elementos do terreno).

O TWI foi gerado a partir da integração de dados de altitude, do algoritmo de acumulação de fluxos e de declividade, definidos no MDE-90. Para definição das classes foi realizada a distribuição dos valores de TWI em classes de frequência, resultando em 18 classes que foram reagrupadas em sete considerando apenas as classes com frequência relativa (*Fi*) acima de 1% (classes menores foram incorporadas as classes mais próximas) (Santos et al., 2018). As três classes de maior TWI foram mantidas por serem consideradas áreas mais propensas ao acúmulo de umidade (1 = TWI de 14,06 a 24,50; 2 = TWI de 13,15 a 14,06; e 3 = TWI de 12,24 a 13,15); as demais foram agrupadas

**Tabela 1.** Forma dos elementos do terreno, a partir da integração dos índices curvatura vertical (CV), curvatura horizontal (CH) e declividade, conforme adaptação e modificação de Pennock et al. (1987).

Elemento	Curvatura vertical (CV)	Curvatura horizontal (CH)**	Forma dos elementos do terreno (FET)
Ombro (OM)	Convexa	Côncava (C)	<b>OMC</b>
		Convexa (D)	<b>OMD</b>
		Planar	<b>OM</b>
Sopé coluvial (SC)	Côncava	Côncava (C)	<b>SCC</b>
		Convexa (D)	<b>SCD</b>
		Planar	<b>SC</b>
Planas* (0 a 3° de declividade)	Retilínea	--	<b>P</b>
		--	<b>SA</b>
Meia encosta suave (MES) (3 a 8° de declividade)	Retilínea	Côncava (C)	<b>MESC</b>
		Convexa (D)	<b>MESD</b>
		Planar	<b>MES</b>
Meia encosta íngreme (MEI) (8 a 20° de declividade)	Retilínea	Côncava (C)	<b>MEIC</b>
		Convexa (D)	<b>MEID</b>
		Planar	<b>MEI</b>

\*As áreas planas se dividem em áreas planas de topo (P) e áreas planas no sopé aluvial (SA); \*\*Curvatura horizontal côncava apresenta fluxo convergente (C) e curvatura horizontal convexa apresenta fluxo divergente (D).

OMC: ombro convergente; OMD: ombro divergente; OM: ombro; SCC: sopé coluvial convergente; SCD: sopé coluvial divergente; SC: sopé coluvial; P: áreas planas; SA: sopé aluvial; MESC: meia encosta suave convergente; MESD: meia encosta suave divergente; MES: meia encosta; MEIC: meia encosta íngreme convergente; MEID: meia encosta íngreme divergente; MEI: meia encosta íngreme.

em uma classe de áreas de menor propensão ao acúmulo de umidade ( $4 = \text{TWI}$  de 7,0 a 12,24).

A classificação das FET (Tabela 1) foi feita a partir da caracterização geomorfológica das MBH por meio processamento dos índices de curvatura horizontal (CH), curvatura vertical (CV) e declividade, de acordo com o método de Zevenbergen e Thorne (1987). A FET integra os índices CH (medida ao longo da curva de nível), CV (medida na direção da declividade) e declividade, visando a definição do padrão de fluxo hídrico das unidades geomorfológicas na paisagem, conforme Pennock et al. (1987). Adotou-se como limite entre áreas planas (P) e encostas a declividade de 3° (5,2%); e, como modificação, dividiu-se as meia-encostas em meia-encosta suave (MES), com limite de 3° a 8° (5,2 a 14%) de declividade, e meia-encosta íngreme (MEI), com limite de 8° a 20° (14 a 36%) de declividade.

Na categorização das FET, foi feita a diferenciação entre áreas planas de topo de morro (P) e áreas planas próximas ou localizadas no sopé aluvial (SA), por meio da álgebra de mapas da classe a ser discretizada e o TWI (MDE-30) associado à classe de altitude (590 m). As demais categorias foram ombro (OM) e sopé coluvial

(SC), respectivamente, determinadas pelas CV convexa e côncava.

A CH foi classificada de acordo com o grau de convexidade e concavidade das superfícies (plano-curvatura), conforme Tagil e Jenness (2008). Valores de CH menores que  $-0,1^\circ$  foram classificados como vertentes côncavas, atribuindo às FET o padrão de fluxo sentido convergente (C); valores de CH entre  $-0,1^\circ$  e  $+0,1^\circ$  como superfícies planas; e valores de CH maiores que  $+0,1^\circ$  corresponderam a vertentes convexas – fluxos divergentes (D). A classificação de CV se baseou nos limites de distribuição das classes de frequência dos índices nas MBH, com base em resultados de perfil positivo e negativo (CV mín.:  $-0,021^\circ$ ; CV máx.:  $0,011^\circ$ ; e mediana:  $0,0010$ ).

As áreas ripárias consideradas como prioritárias para a restauração florestal foram definidas por meio da álgebra de mapas do TWI, FET e do mapa de uso e ocupação do solo, conforme critérios apresentados na Tabela 2. Corpos d'água e formação florestal não foram considerados na álgebra de mapa como áreas sujeitas à restauração florestal. Ressalta-se que formação florestal não foi considerada na metodologia como áreas prioritárias para a restauração devido à peculiaridade que estas requerem para o estabelecimento de critérios;

**Tabela 2.** Critérios usados para proposição de áreas prioritárias para conservação ambiental das microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, considerando áreas de uso antrópico e áreas de vegetação herbácea não cultivada, como classes de uso e ocupação das terras.

Classes	Critérios	Observações
Prioritária 1	TWI: Classe 1 (>14,06) em áreas de SA, SC, MEI e OM TWI: Classe 2 (>13,15 e <14,06) em áreas de SA TWI: Classe 3 (>12,24<13,15) em áreas de SA	Áreas de uso antrópico e áreas de vegetação herbácea não cultivada, com maior TWI (14,06-24,5) e em todas as áreas indicadas como sopé aluvial
Prioritária 2	TWI: Classe 1 (>14,06) em áreas de MES e P TWI: Classe 2 (>13,15 e <14,06) em áreas de SC e MEI TWI: Classe 3 (>12,24<13,15) em áreas de SC	Áreas de uso antrópico e áreas de vegetação herbácea não cultivada, em que ocorreram as três maiores classes de TWI em diferentes formas de terreno
Prioritária 3	TWI: Classe 2 (>13,15 e <14,06) em áreas de MES e OM TWI: Classe 3 (> 12,24 e < 13,15) em áreas de MEI, MES e OM	Áreas de uso antrópico e áreas de vegetação herbácea não cultivada, em que ocorreram as duas maiores classes de TWI (exceto a classe de maior índice) em diferentes formas de terreno

TWI = sigla em inglês de índice topográfico de umidade; SA = sopé aluvial; SC = sopé coluvial; MEI = meia encosta íngreme; OM = ombro; MES = meia encosta suave; P = área plana.

**Tabela 3.** Reclassificação das classes do índice topográfico de umidade (TWI) de acordo com a frequência de classe do TWI nas microbacias hidrográficas (MBH) dos Córregos da Consulta e do Retiro.

Tipos de áreas	Classes TWI	MBH da Consulta		MBH do Retiro	
		Área (ha)	% da área total	Área (ha)	% da área total
Propensas ao acúmulo de umidade	1	171,2	4,3	162,5	4,5
	2	99,9	2,5	102,7	2,8
	3	292,8	7,3	306,1	8,5
	Total	564,0	14,1	571,3	15,8
Menor propensão ao acúmulo de umidade	4	3.456,7	85,9	3.039,1	84,2
	Total	4.020,7	100	3.610,5	100

Classes: (1) TWI de 14,06 a 24,50; (2) TWI de 13,15 a 14,06; (3) TWI de 12,24 a 13,15; (4) TWI de 7 a 12,24.

mas, entende-se que a condição dos remanescentes florestais é de grande importância para a restauração florestal de áreas contíguas ou próximas inseridas na microbacia hidrográfica.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização das Áreas Úmidas pelo Índice Topográfico de Umidade (TWI)

As áreas ripárias estão intimamente associadas às áreas próximas a cursos e corpos hídricos. A representação pelo TWI abrange desde cursos hídricos perenes até o gradiente de umidade dos solos numa MBH, quando processos hidrológicos de escoamento são fortemente influenciados pela topografia na paisagem.

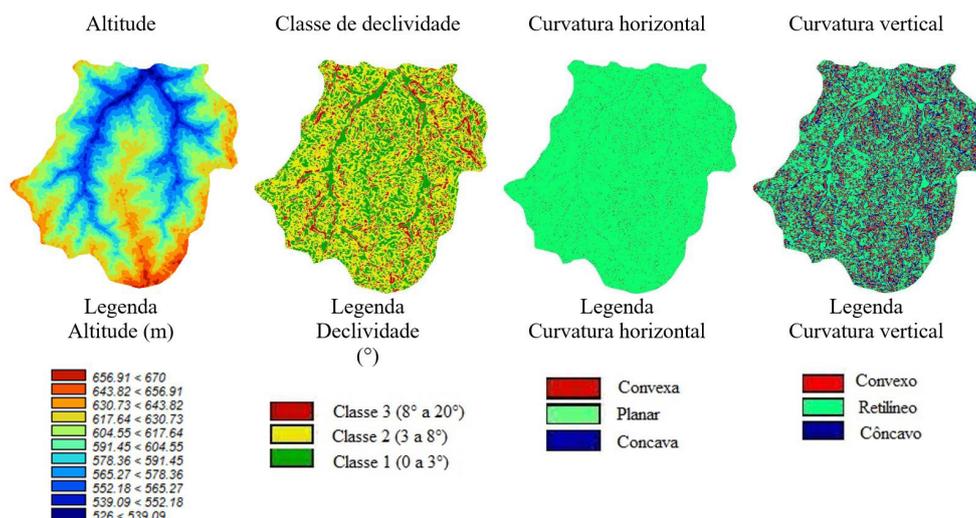
Diversos trabalhos observaram eficiência do TWI na previsão de áreas úmidas na paisagem, tais como, identificação de ecossistemas ripários (Higginbottom et al.,

2018; Raduła et al., 2018), previsão de áreas sujeitas a inundações para o planejamento habitacional de uso dos solos (Pourali et al., 2016), quantificação de distribuição de nutrientes nos solos por influência da topografia (Adhikari et al., 2018).

Neste trabalho, assumiu-se que maiores valores de TWI sugerem áreas de maior acúmulo hídrico nas MBH. Observou-se que 14% da área da MBH do Córrego da Consulta e 15,8% da MBH do Córrego do Retiro são propensas ao acúmulo de umidade (Tabela 3).

### Mapa das Formas dos Elementos do Terreno (FET)

A curvatura das vertentes (Figura 2) é considerada um fator determinante na orientação dos movimentos d'água na paisagem (Hall e Olson, 1991; Pennock et al., 1987). A convexidade ou concavidade da vertente modifica a potência erosional do escoamento superficial e influencia a dinâmica das redes de drenagem na paisagem, onde



**Figura 2.** Mapas de atributos topográficos que compõem o índice das formas dos elementos de terreno (FET), gerados para as microbacias hidrográficas dos Córregos da Consulta e do Retiro, a partir do modelo digital de elevação de 30 metros de resolução (MDE-30).

**Tabela 4.** Área (em hectares) e porcentagem da área total das diferentes formas dos elementos do terreno (FET) das microbacias hidrográficas (MBH) dos Córregos da Consulta e do Retiro.

FET	MBH Consulta		MBH Retiro	
	ha	(%)	ha	(%)
Ombro convergente (OMC)	4,0	0,1	4,2	0,1
Ombro divergente (OMD)	19,8	0,5	21,4	0,6
Ombro (OM)	803,8	20	780,2	21,6
Sopé coluvial convergente (SCC)	4,9	0,1	6,0	0,2
Sopé coluvial divergente (SCD)	3,1	0,1	3,6	0,1
Sopé coluvial (SC)	857,9	21,3	885,1	24,5
Áreas planas de topo (P) e sopé aluvial (SA)	887,9	22,1	724,7	20,1
Meia encosta suave convergente (MES C)	0,0	0	0,0	0
Meia encosta suave divergente (MES D)	0,1	0	0,2	0
Meia encosta suave (MES)	1.264,4	31	1.005,8	27,9
Meia encosta íngreme convergente (MEIC)	0,0	0	0,0	0
Meia encosta íngreme divergente (MEID)	0,0	0	0,0	0
Meia encosta íngreme (MEI)	174,1	4,3	178,6	5
Total	4.020	100	3.609,8	100

a água tende a se acumular e saturar nas porções mais côncavas da bacia, e a provocar menor umidade nas porções convexas (Hall e Olson, 1991).

As FET de maior representatividade nas MBH (Tabela 4) avaliadas foram a meia encosta suave (MES) e ombro (OM). Isto porque a curvatura vertical (CV) apresentou um perfil de vertente bem distribuído entre curvaturas convexas, retilíneas e côncavas, que tiveram uma frequência relativa mais alta. Isto mostra que a transição entre os segmentos de vertentes em ambas MBH ocorre de forma suavizada, condizente com as características de relevo de colinas suaves. Outro fator que favoreceu a predominância de elementos de MES foi

a predominância de áreas de declividade entre 3 e 8°, 56% na MBH da Consulta e 54,7% na do Córrego do Retiro.

As áreas de MEI se situaram em locais de declividade mais acentuada nas MBH, onde a gravidade pode atuar de forma mais pronunciada nos processos de escoamento e transporte de sedimentos (Pennock et al., 1987; Zevenbergen e Thorne, 1987). Foram, portanto, consideradas áreas importantes para a conservação e manejo diferenciado.

O SA consiste nos locais que o solo mais recebe umidade, enquanto o segmento ombros divergentes, o de menor umidade disponível (Hall e Olson, 1991). As áreas classificadas como SA são de significativa importância na conservação porque possuem interação frequente com o meio fluvial, são áreas de deposição de

materiais de solo e sedimentos e recebem o escoamento direto de áreas à montante das microbacias. Portanto, foram consideradas as mais importantes na destinação de manutenção/restauração da vegetação nativa.

A CH, que define os aspectos da plano-curvatura da vertente associados ao direcionamento dos fluxos em convergentes ou divergentes, mostraram uma baixa frequência de curvaturas horizontais côncavas e convexas, representando majoritariamente superfícies planares (cerca de 97% das áreas das MBH). Este resultado pode indicar a prevalência de superfícies planares, mas também valores de referência de outro trabalho (Tagil e Jenness, 2008) não ajustados adequadamente à área de estudo.

### Cenários para a Restauração Florestal

As informações dos mapas das classes das FET (MDE-30) e TWI (MDE-90) das MBH foram integradas e as áreas de maior valor do TWI corresponderam às SA e SC, enquanto as de menor valor do TWI corresponderam às áreas de MEI e OM.

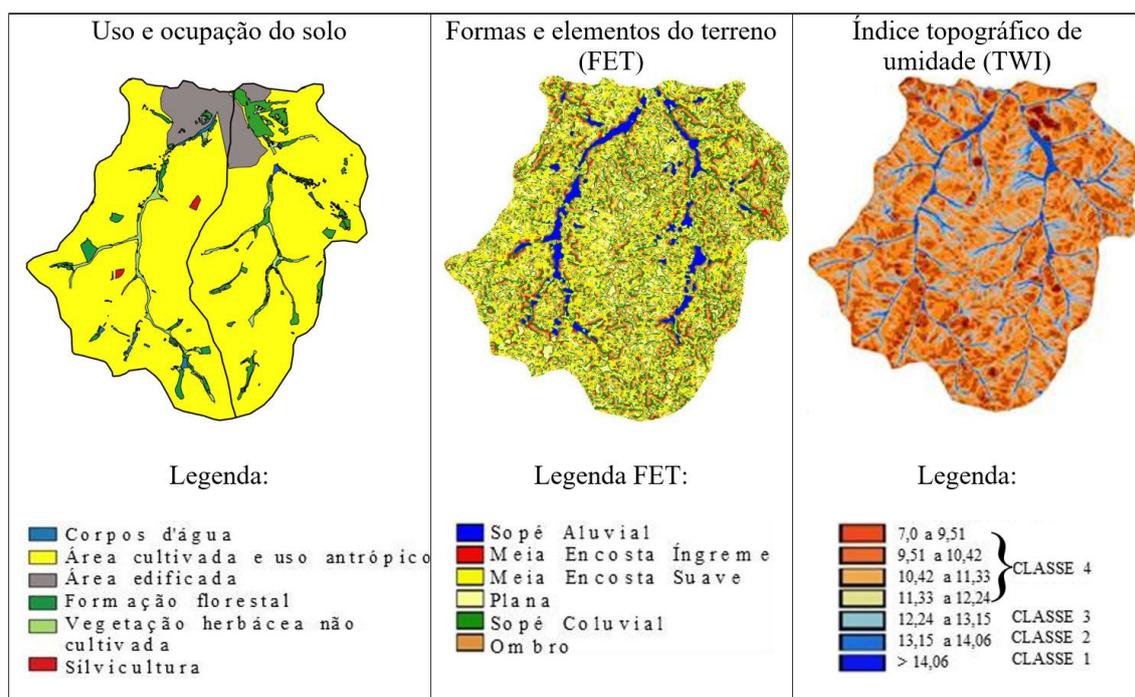
As informações qualitativas obtidas indicando as áreas com maior propensão ao acúmulo hídrico nas MBH podem contribuir com o planejamento ambiental e rural. As áreas de SA, locais que sugerem maior acúmulo de umidade, podem ser destinadas aos usos de menor

impacto ambiental para o meio hídrico ou destinadas exclusivamente à conservação com vegetação nativa, proporcionando serviços ecossistêmicos por meio da qualidade hídrica e da proteção do leito ripário.

As áreas de MEI, embora de menor tendência a acúmulo de água, são mais suscetíveis ao escoamento superficial e, dependendo de outros fatores, apresentam predisposição a processos erosivos, com transporte de material para o sopé (Minella e Merten, 2012). Portanto, devem ser alvo de práticas de manejo diferenciado, que favoreçam a infiltração e a diminuição dos processos erosivos e de escoamento superficial de água.

A integração dos mapas de uso e ocupação dos solos com os de TWI e FET (Figura 3) permitiram apontar as áreas ripárias nas MBH; ou seja, áreas importantes do ponto de vista hidrológico, que se encontravam com uso antrópico e com vegetação herbácea não cultivada.

Uma pequena porcentagem da área das MBH estudadas foi considerada de prioridade máxima (1) para restauração florestal (Tabela 5) e se concentrou ao longo dos canais de drenagem (Figura 4a), em diferentes larguras, variando de 15 metros (tamanho mínimo de representação possível pelo pixel) a larguras superiores a 30 metros em alguns trechos, por exemplo, 200 metros (Figura 4c).

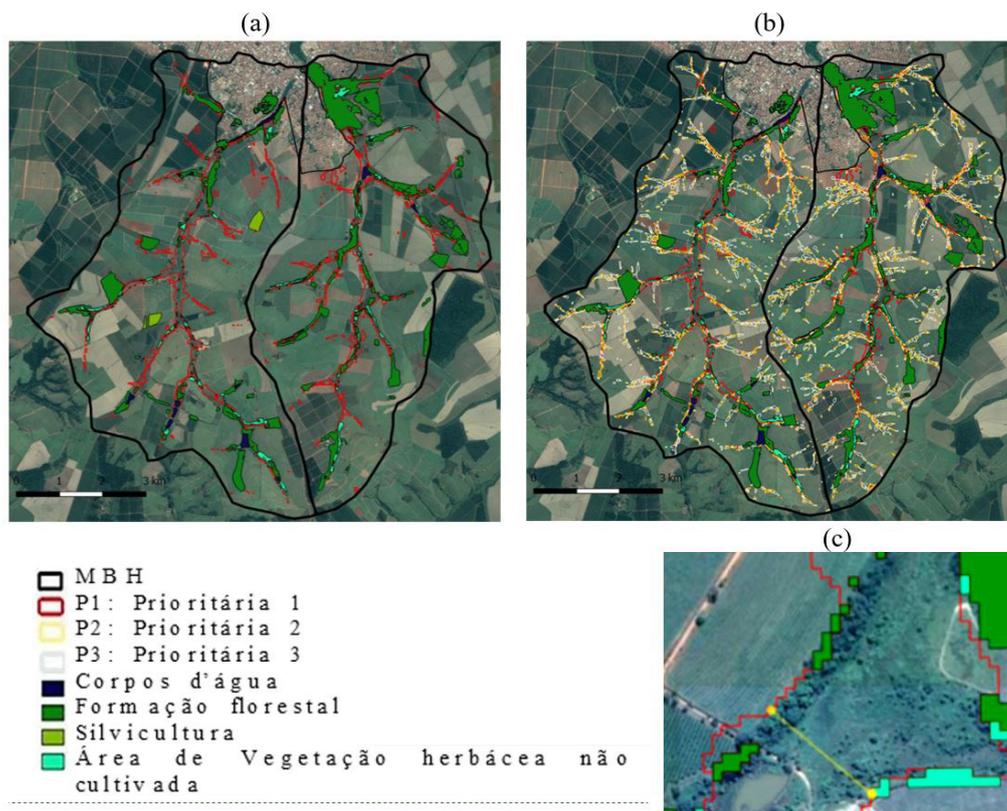


**Figura 3.** Mapas de uso e ocupação dos solos, formas dos elementos do terreno (FET) e índice topográfico de umidade (TWI) para as microbacias hidrográficas dos córregos da Consulta e do Retiro.

**Tabela 5.** Área, em hectares, e porcentagem da área total (%) para restauração florestal nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro, Bebedouro (SP), conforme cenários estabelecidos.

Cenários	MBH da Consulta		MBH do Retiro	
	ha	%	ha	%
Prioritária 1	166,0	4,1	133,8	3,7
Prioritária 1 + Prioritária 2	286,7	7,1	268,0	7,4
Prioritária 1 + Prioritária 2 + Prioritária 3	457,8	11,4	447,5	12,4
Prioritárias fora da delimitação da APP	356,5	8,9	375,1	10,4
Total de área de APP*	227,1	5,6	213,6	5,9

\*Computadas áreas de Área de Preservação Permanente (APP) de cursos hídricos (30 m), nascentes (50 m) e áreas declaradas de uso consolidado. MBH: Microbacia Hidrográfica



**Figura 4.** Delimitação das áreas prioritárias para a restauração florestal nas microbacias hidrográficas do Córrego da Consulta e do Córrego do Retiro: (a) prioritária 1; (b) prioritária 1+prioritária 2+prioritária 3; e (c) detalhe da delimitação da área prioritária com indicação de faixa marginal de 235 m (Dados Vetoriais (*shapefiles*) visualizados sobre imagem Google Earth, 2017). MBH: Microbacia Hidrográfica

As classes Prioritária 2 e 3 também apontaram áreas apropriadas à restauração florestal, que somadas à classe Prioritária 1, indicaram 356,5 ha na MBH da Consulta e 375,1 ha na MBH do Retiro como áreas mais propensas a saturação hídrica nestas MBH (Tabela 5 e Figura 4b).

Em comparação com a delimitação legal, o total de áreas prioritárias (1+2+3) representa 80,5% das APP na MBH do Córrego da Consulta, considerando 30 m de *buffer* para cursos hídricos menores que 10 metros de largura (total de 177,26 ha) e 50 m de raio para nascentes (total de 9,54 ha). Os 19,5% de área restante da APP, ou seja, 36,4 ha, são áreas não

apontadas como prioritárias, nas quais o TWI, associado aos outros índices, não indicou serem propensas ao acúmulo de umidade. Nesta MBH constatou-se que, dos 40,3 ha declarados como áreas de uso consolidado (Cadastro Ambiental Rural, 2017), 22,25 ha (55%), são de áreas prioritárias.

Na MBH do Córrego do Retiro, as áreas prioritárias também corresponderam a 80% das áreas de APP. Nesta MBH, 13,5 ha (49,7%), de um total de 27 ha das áreas declaradas de uso consolidado, foram apontados como áreas prioritárias.

Estes dados sugerem, portanto, divergências quanto à aptidão entre áreas destinadas à conservação e as de uso antrópico. Isto é, 20% das áreas que não foram identificadas como prioritárias em APP poderiam ser destinadas ao manejo diferenciado, enquanto que as áreas prioritárias em áreas declaradas de uso consolidado e áreas fora da delimitação legal teriam uma melhor atribuição para a conservação ou recuperação da vegetação nativa, considerando a importância hidrológica de abastecimento hídrico que estas MBH têm para o município de Bebedouro.

## CONCLUSÃO

A importância regional dos serviços hídricos nas duas MBH avaliadas se contrasta com a condição de sua cobertura vegetal nativa. Os cenários estabelecidos para as áreas prioritárias para restauração florestal, as APP definidas conforme a legislação florestal vigente, não são suficientes para a proteção integral das áreas ripárias nas MBH.

De acordo com a metodologia aplicada neste trabalho, na área estudada seria necessário um incremento de vegetação nativa nas áreas ripárias em relação ao previsto na LPVN. O mapeamento das áreas ripárias por meio dos índices topográficos apontou que na MBH do Córrego da Consulta seria necessário um incremento de 94 ha de vegetação ciliar no cenário previsto como de prioridade máxima, e 356,5 ha considerando a soma de todos os cenários considerados prioritários, além das áreas já previstas em APP e excetuando-se aquelas dentro das APP não apontadas como prioritárias. Este incremento demandaria um aumento de 2,3 a 8,8% de áreas com cobertura florestal em relação à área total da MBH. Para a MBH do Córrego do Retiro seria necessário um incremento de 85,4 ha (prioridade máxima) a 375 ha no total de áreas prioritárias a ser destinada a conservação/ recuperação da florestal ciliar nativa, ou seja, de 2,4 a 10,5% em relação à área total da MBH.

Os dados espaciais disponíveis e os produzidos por meio dos modelos digitais de elevação permitiram inferir áreas de caráter ripário, rotas preferenciais de drenagem, áreas de planícies de inundação nas microbacias estudadas e também características geomorfológicas. Estas informações possibilitam, além da gestão e planejamento ambiental das MBH, levantar informações para o planejamento urbano, infraestrutura e agrícola.

## REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K., OWENS, P.R., ASCHWORTH, A.J., SAUER, T.M., LIBOHOVA, Z., RICHTER, J.L. & MILLER, D.M., 2018. Topographic controls on soil nutrient variations in a silvopasture system. *Bioscience*, vol. 1, no. 1, pp. 1-15. <http://dx.doi.org/10.2134/age2018.04.0008>.
- BENDIX, J., 2017. Riparian ecosystems. In: D. RICHARDSON, N. CASTREE, M.F. GOODCHILD, A.L. KOBAYASHI, W. LIU & R.A. MARSTON, orgs. *The international encyclopedia of geography*. Chichester: John Wiley & Sons.
- BRASIL, 2012 [acesso em 1 março 2019]. Lei 12651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil* [online], Brasília, 28 maio. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm)
- CADASTRO AMBIENTAL RURAL – CAR, 2017 [acesso em 1 janeiro de 2017]. *Sistema de Cadastro Ambiental Rural – SICAR-SP*. São Paulo. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/sicar/>
- GOOGLE EARTH [online], 2017 [acesso em 1 janeiro de 2017]. Disponível em: [www.google.com.br/](http://www.google.com.br/)
- GREGORY, S.V., SWANSON, F.J., MCKEE, A.W. & CUMMINS, K.W., 1991. An ecosystem perspective of riparian zones: focus on links between land and water. *Bioscience*, vol. 41, no. 8, pp. 540-55a. <http://dx.doi.org/10.2307/1311607>.
- HALL, G.F. & OLSON, C.G., 1991. Predicting variability of soils from landscape models. In: M.J. MAUSBACH, orgs. *Spatial variabilities of soils and landforms*. Madison: Soil Science Society of America, pp. 9-24.
- HAMILTON, L.S., DUDLEY, N., GREMINGER, G., HASSAN, N., LAMB, D., STOLTON, S. & TOGNETTI, S., 2008 [acesso em 1 janeiro de 2017]. *Forest and water: a thematic study in the framework of the global Forest Resources Assessment 2005* [online]. Roma: FAO. 78 p. FAO Forestry Paper, no. 155. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i0410e.pdf>.
- HIGGINBOTTOM, T. P., FIELD, C. D., ROSENBURGH A. E., WRIGHT, A., SYMEONAKIS, E. & CAPORN, S. J. M., 2018. High-resolution wetness index mapping: a useful tool for regional scale wetland management. *Ecological Informatics*, vol. 48, pp. 89-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.08.003>.

- LEE, S., WOLBERG, G. & SHIN, S.Y., 1997. Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 3, no. 3, pp. 228-244.
- MACMILLAN, R.A. & SHARY, P.A., 2009. Landforms and landform elements in geomorphometry. In: T. HENGL & H.I. REUTER, orgs. *Geomorphometry: concepts, software, application*. Amsterdam: Elsevier, Developments in Soil Science, Chap. 9, pp. 227-254. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00009-3).
- MIKLÓS, L., KOČICKÁ, E., IZAKOVIČOVÁ, Z., KOČICKÝ, D., ŠPINEROVÁ, A., DIVIAKOVÁ, A. & MIKLÓSOVÁ, V., 2018. *Landscape as a geosystem*. Cham; Springer, pp. 11-42. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94024-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94024-3_2).
- MINELLA, J.P.G. & MERTEN, G.H., 2012. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. *Ciência Rural*, vol. 42, no. 9, pp. 1575-1582. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012000900010>.
- PENNOCK, D.J., ZEBARTH, B.J. & DE JONG, E., 1987. Landform classification and soil distribution hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, vol. 40, no. 3-4, pp. 297-315. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(87\)90040-1](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(87)90040-1).
- PLANCHON, O. & DARBOUX, F., 2002. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, vol. 46, no. 2-3, pp. 159-176. [http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3).
- POURALI, S.H., ARROWSMITH, C., CHRISMAN, N., MATKAN, A.A. & MITCHELL, D., 2016. Topography wetness application in flood-risk-based land use planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*, vol. 9, no. 1, pp. 39-54. <http://dx.doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>.
- RADUŁA, M.W., SZYMURA, T.H. & SZYMURA, M., 2018. Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecological Indicators*, vol. 85, pp. 172-179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.011>.
- SANTOS, R.M.P.P., SAIS, A.C. & LOPES-ASSAD, M.L.R.C., 2018. Caracterização morfométrica das microbacias hidrográficas de abastecimento hídrico de Bebedouro (SP). *Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente*, vol. 7, no. 1. <http://dx.doi.org/10.4322/2359-6643.07103>.
- SWANSON, S., KOZŁOWSKI, D., HALL, R., HEGGEM, D. & LIN, J., 2017. Riparian proper functioning condition assessment to improve watershed management for water quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 72, no. 2, pp. 168-182. <http://dx.doi.org/10.2489/jswc.72.2.168>.
- TAGIL, S. & JENNESS, J., 2008. GIS-Based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, pp. 910-921. <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2008.910.921>.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG, 2016a [acesso em 1 novembro 2016]. *Mapa interativo: camada de áreas remanescentes da Mata Atlântica* [online]. Goiás. Disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG, 2016b [acesso em 1 novembro 2016]. *Mapa interativo: camada de áreas remanescentes do Cerrado* [online]. Goiás. Disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG, 2016c [acesso em 1 novembro 2017]. *Mapa interativo: camada de chuvas do Brasil* [online]. Goiás. Disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>
- ZEVENBERGEN, L. & THORNE, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, no. 1, pp. 47-56. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290120107>.