

ANÁLISE MORFOMÉTRICA E SIMULAÇÕES DA VAZÃO MÁXIMA NO RIO BANDEIRA E AFLUENTES, MUNICÍPIO DE CAMPO BONITO, OESTE DO ESTADO DO PARANÁ – SUL DO BRASIL

Oscar Vicente Quinonez Fernandez¹

RESUMO

No estado do Paraná, inúmeras cidades vêm sofrendo inundações em decorrência da combinação de condicionantes naturais e antrópicos. Os objetivos do trabalho são: analisar o papel das características morfométricas sobre as inundações do rio Bandeira e seus afluentes, os córregos Santa Maria e Campo Bonito, na cidade de Campo Bonito, Oeste do Paraná, e simular as vazões máximas para diversos tempos de recorrência. As variáveis e parâmetros morfométricos das bacias foram obtidos a partir de cartas topográficas (escala 1:50.00) com auxílio do aplicativo *Global Mapper*. As estimativas de vazões máximas foram realizadas pelo método I-Pai-Wu modificado, um modelo hidrológico de transformação de chuvas em vazões. Foram destacadas as características morfométricas das bacias que favorecem a geração de enchentes, aplicando o Índice de Influência da Enchente (IIE). Nas bacias do Bandeira e Santa Maria, as variáveis mais sobressalentes são a área de contribuição (27,9 e 22,3 km², respectivamente), a amplitude altimétrica da bacia e o índice de rugosidade. Embora o córrego Campo Bonito apresente características morfométricas favoráveis às enchentes (forma oval e maior densidade de drenagem), a sua pouca área de drenagem (9,17 km²) o coloca numa posição secundária na geração de enchentes na área urbana. As vazões estimadas para o rio Bandeira podem alcançar 120 m³/s para o tempo de retorno de 2 anos e 209 m³/s para o tempo de retorno de 100 anos, causando inundações, apesar do ligeiro grau de entalhamento do canal fluvial.

Palavras-chave: Inundações; Modelo Hidrológico; Planalto basáltico; Vazão máxima.

MORPHOMETRIC ANALYSIS AND PEAK DISCHARGE SIMULATIONS IN BANDEIRA RIVER AND TRIBUTARIES AT CAMPO BONITO, PARANA STATE, BRAZIL

ABSTRACT

In the state of Parana, countless cities have been flooded due to the combination of natural and anthropogenic conditions. The objectives of this work are: to analyze the role of morphometric characteristics on the floods of the Bandeira River and its tributaries Santa Maria and Campo Bonito streams in the city of Campo Bonito, Western Parana, and to simulate the peak discharge for several times of recurrence. The variables and morphometric parameters of the basins were obtained from topographic maps (scale 1: 50.00) with the aid of the *Global Mapper* software. Peak discharge estimates were made using the modified I-Pai-Wu method, a hydrological model of transforming rainfall into discharge. The morphometric characteristics of the basins that favor the generation of floods were highlighted, applying the Flood Influence Index. In the Bandeira and Santa Maria basins, the most prominent variables are the area (27.9 and 22.3 km² respectively) in addition to the basin altimetric amplitude and the roughness index. On the other hand, the Campo Bonito stream, despite its favorable morphometric characteristics for flooding (round oval basin shape and higher drainage density), its small drainage area (9.17 km²), puts it in a secondary position in flood generation. Estimated peak discharge for the Bandeira River can reach 120 m³/s for the 2-years interval recurrence and 209 m³/s for the 100-years interval recurrence, causing flooding despite the slight incised of the river channel.

Keywords: Floods; Hydrologic model; Basaltic plateau; Peak discharge.

¹ Professor do curso de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Marechal Cândido Rondon. Email: oscar.fernandez@unioeste.br

INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas alteram as condições naturais de infiltração das águas pluviais nas bacias hidrográficas, diminuindo a infiltração e causando aumento do escoamento superficial, que resulta em inundações nas áreas próximas às margens dos rios. O crescimento descontrolado de áreas urbanas ao longo das faixas ribeirinhas tem multiplicado os efeitos das inundações sobre a população (TUCCI, 1999).

No estado do Paraná, várias cidades sofrem o flagelo das inundações em consequência das chuvas causadas pelas frentes frias no inverno e as precipitações do tipo convectivas na primavera (HOFFMANN et al., 2014). As inundações nas cidades de Curitiba (ZANELLA, 2012), Porto União/União da Vitória (ROCHA, 2014) e Francisco Beltrão (MINUZZO, 2016) entre outras, são eventos recorrentes e com grande destaque nas mídias.

Entretanto, muitos outros núcleos urbanos também sofrem do mesmo problema, fato que ensejou a produção pela ANA – Agência Nacional de Águas (2012) do Atlas de Vulnerabilidade a Inundações referente ao estado do Paraná. Neste estudo foram identificados 385 trechos inundáveis em 99 cursos de água. Deste total, 29% foram considerados de alta vulnerabilidade a inundações graduais, 39% de média e 32% de baixa. O trecho superior do rio Bandeira, localizado no município de Campo Bonito, região oeste do Paraná, é um dos pontos classificados no citado Atlas como de baixa vulnerabilidade. Apesar desta classificação, a área urbana do município tem sofrido repetidas inundações nas últimas décadas, com destaque para os eventos registrados em 26 de abril de 2007 e 8 de junho de 2014, causados por intensas chuvas que trouxeram inúmeras dificuldades para toda a região.

Amaral e Ribeiro (2009) enumeram os condicionantes naturais e antrópicos que, combinados, causam as inundações. Entre os condicionantes naturais figuram: a) formas do relevo; b) características da rede de drenagem da bacia hidrográfica; c) intensidade, quantidade, distribuição e frequência das chuvas; d) características do solo e o teor de umidade; e) presença ou ausência da cobertura vegetal. Entre os condicionantes antrópicos os autores citam: a) uso e ocupação irregular nas planícies e margens de cursos d'água; b) disposição irregular de lixo nas proximidades dos cursos d'água; c) alterações nas características da bacia hidrográfica e dos cursos d'água (vazão, retificação e canalização de cursos d'água, impermeabilização do solo, entre outras); d) intenso processo de erosão dos solos e de assoreamento dos cursos d'água.

As inundações também são causadas pela presença de obras de transposição de talvegue (ponte e bueiros). Estas estruturas causam a sobrelevação do nível d'água durante as cheias em razão do estrangulamento da seção transversal do rio, que por sua vez provoca o efeito de remanso à

montante do rio principal. Também erros no planejamento e execução destas obras geram estruturas subdimensionadas com capacidade de fluxo abaixo do requerido (TUCCI, 1995).

Nas bacias hidrográficas brasileiras, o número de estações pluviométricas instaladas é amplamente superior à quantidade de postos fluviométricos, razão pela qual os métodos que transformam dados de chuva em dados de vazão são de ampla difusão. Os modelos chuva-vazão mais difundidos para obtenção de vazões máximas de projeto são os métodos Racional (área < 2 km²), I-Pai-Wu (2 a 200 km²), Uehara (200 a 600 km²) e o método Hidrograma Unitário proposto pelo SCS (área > 600 km²) (DAEE, 2005).

O presente trabalho analisa o papel dos condicionantes naturais referentes às características morfométricas sobre as enchentes no rio Bandeira e afluentes, registradas em Campo Bonito, e simula as vazões máximas para diversos tempos de recorrência, aplicando o método I-Pai-Wu.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Campo Bonito está situado na mesorregião geográfica Oeste Paranaense (Figura 1). O município foi criado em 31 de outubro de 1986, pela Lei Estadual nº 8.403, com território desmembrado de Guaraniaçu (PIERUCCINI *et al.*, 2003). A área do município é de 433,8 km², a população estimada para 2019 é de 3.833 habitantes (IBGE, 2019) e a economia é baseada na produção agrícola (soja e milho), pecuária e aves (IPARDES, 2018).

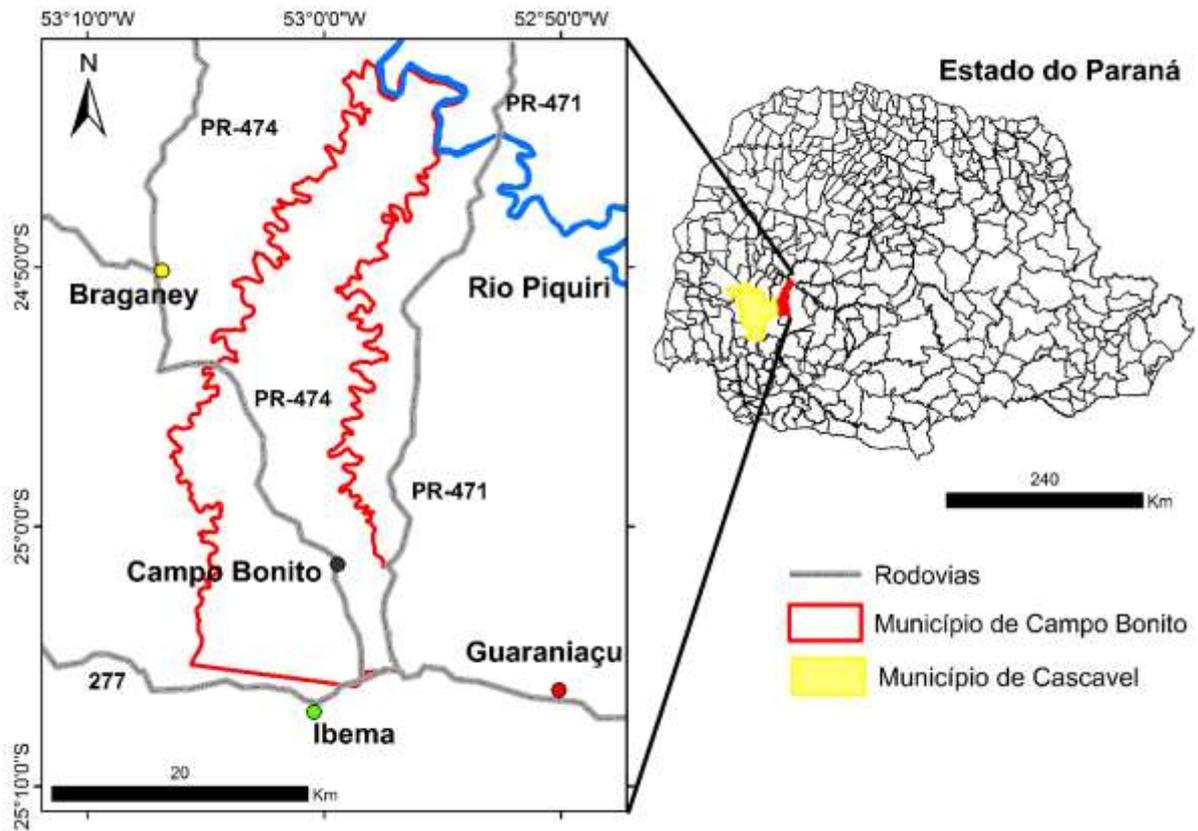


Figura 1: Limites do município de Campo Bonito e localização da sede urbana do município.

A sede do município está localizada em ambas as margens do rio Bandeira, no seu trecho superior. O Bandeira é afluente da margem esquerda do rio Piquiri e abarca os municípios de Campo Bonito e Guaraniaçu. Neste trabalho, são analisadas a bacia do rio Bandeira (até a área urbana do município) e as bacias dos córregos Santa Maria e Campo Bonito, que desembocam no rio Bandeira dentro do perímetro urbano de Campo Bonito (Figura 2).

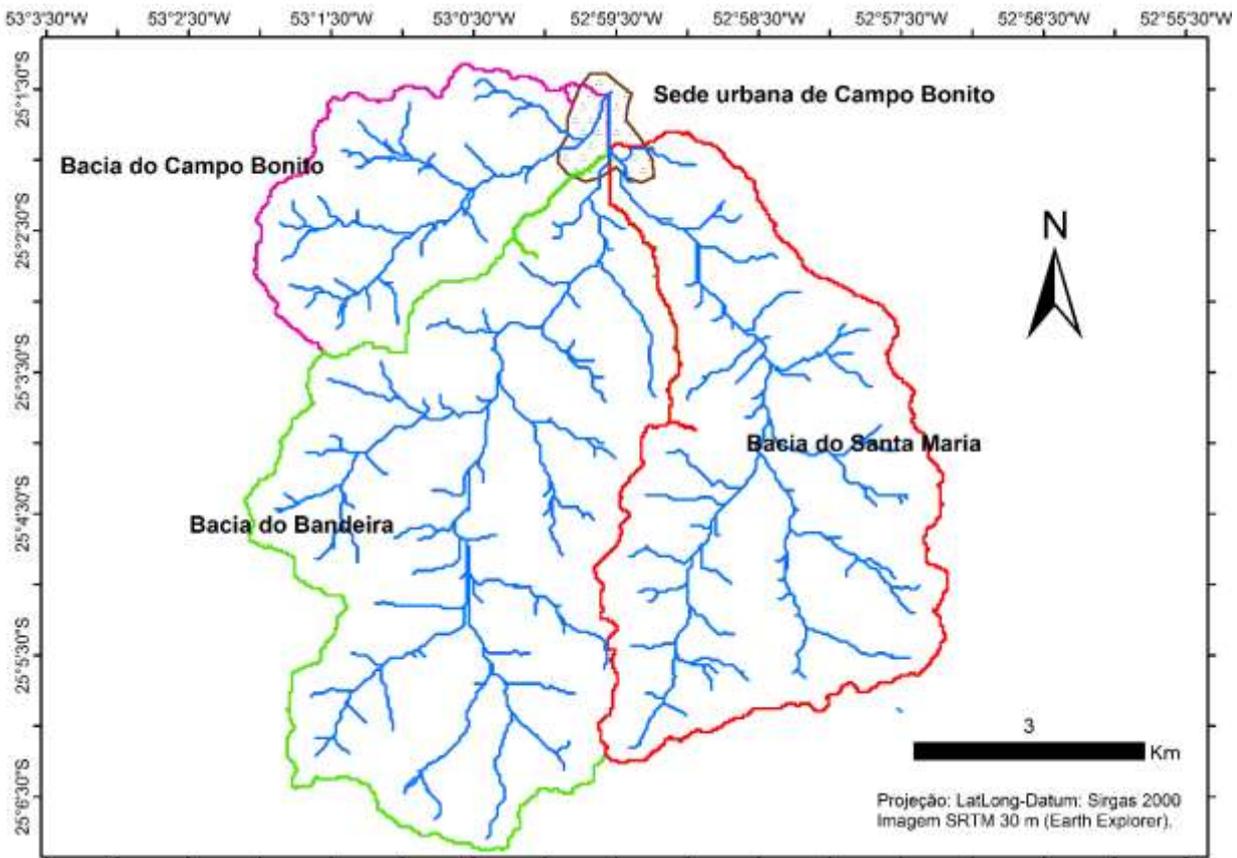


Figura 2: Delimitação das bacias estudadas no presente estudo e localização da sede urbana de Campo Bonito.

Nas bacias em estudo afloram rochas basálticas de idade Cretácea agrupadas na Formação Serra Geral (NARDY et al., 2002) e, mais recentemente, no Grupo Serra Geral (MINEROPAR, 2013), questão esta que ainda não é amplamente aceita pela comunidade científica. De acordo com o mapa geológico da Mineropar, nas áreas das nascentes do rio Bandeira e seu afluente Santa Maria aflora a Formação Barracão e, à jusante, entorno da cidade de Campo Bonito, a Formação Candói. Ambas as Formações são constituídas por rochas basálticas.

Em termos geomorfológicos, o oeste paranaense está inserido na unidade morfoescultural denominada Terceiro Planalto Paranaense (MAACK, 2012), dividida em 18 subunidades por Santos et al. (2006). O município de Campo Bonito está localizado na subunidade Planalto de Cascavel, cujo relevo é caracterizado por um grau de dissecação média, topos alongados e aplainados, e vertentes convexas. A altitude média é de 692 m.

O clima no município de Campo Bonito, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfa - clima subtropical; temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C (IAPAR, 2000). Segundo o Atlas Pluviométrico do Brasil, disponibilizado no site da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil (PINTO *et al.*, 2011), a pluviosidade média anual é de aproximadamente 1900 mm.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo morfométrico das bacias hidrográficas foi realizado com base em cartas topográficas, escala 1:50.000, folhas Catanduvás e Guaraniáçu (BRASIL, 1998). As variáveis calculadas, como área, perímetro e eixo da bacia, além do comprimento dos canais, foram obtidas com auxílio do aplicativo *Global Mapper* (15). Quanto à hierarquização dos canais, foi utilizada a técnica de Strahler (1952), por ser a mais difundida e de simples aplicação. Com base na área da bacia e as variáveis lineares supracitadas, foram calculados os parâmetros morfométricos das bacias referentes às suas características geométricas, padrão de drenagem e aspectos do relevo (Quadro 1). Os perfis longitudinais do talvegue ao longo dos cursos principais das três bacias, foram traçados com base na carta topográfica, escala 1:50.000.

A estimativa do tempo de concentração das bacias em estudo foi realizada pelo método morfométrico com a aplicação das formulas do Corps Engineers, Ven Te Chow e Kirpich (Quadro 2). Estas fórmulas foram selecionadas a partir do trabalho de Silveira (2005), no qual o autor sugere o emprego destas para bacias rurais, a partir do bom desempenho estatístico alcançado por estes métodos dentre 23 fórmulas analisadas.

Quadro 1: Variáveis e parâmetros morfométricos selecionados para descrever as bacias.

Variável/Parâmetro	Descrição	Fórmula	Fonte
Características geométricas			
Área da bacia (A)	Área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída (exutório) (TUCCI, 1997)	-	-
Perímetro da bacia (P)	Extensão do limite da bacia	-	-
Comprimento do curso d'água principal (Lc)	Extensão do curso d'água desde a nascente até o exutório.	-	-
Comprimento axial da bacia (Lb)	Extensão da bacia medida ao longo do talvegue do canal principal	-	-
Razão de alongação (Re), adimensional.	Re é a razão entre o diâmetro de um círculo com a mesma área da bacia e o comprimento axial da bacia	$Re = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{Lb}$	Schumm (1956)
Índice de compacidade (Kc), adimensional	Relaciona o perímetro da bacia com o perímetro de uma bacia de igual área de forma circular.	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Villela e Mattos (1975)
Características do padrão de drenagem			
Hierarquização dos canais	Categorização das linhas de drenagem de acordo com sua posição (ordem) dentro da bacia	-	Strahler (1952)
Comprimento total dos canais (Lt)	Extensão dos canais fluviais de 1ª, 2ª, 3ª e 4ª ordens	-	Strahler (1964)

Densidade de drenagem (Dd)	Relação entre o comprimento total dos segmentos fluviais de uma bacia hidrográfica (Lt, km) e a área da mesma (A, km ²).	$Dd=Lt/A$	Horton (1945)
Coefficiente de manutenção (Cm)	Representa a área necessária (km ²) para a manutenção de um km de canal permanente	$Cm= 1/Dd$	Schumm (1956)
Extensão média de percurso superficial (Eps)	É a distância média que o escoamento superficial percorre até alcançar um curso de água principal.	$Eps=1/(2Dd)$	Horton (1945)
Sinuosidade total	Relação entre o comprimento do canal e a distância em linha reta entre a nascente e o exutório.	$S=Lc/Lb$	Schumm (1963)
Características de relevo			
Altimetria absoluta (Hmax)	Ponto da bacia com maior altitude.	Hmax	-
Amplitude altimétrica da bacia (ΔHb)	Diferença entre o ponto de maior altitude da bacia (Hmax) e o ponto de menor altitude (Hmin).	$\Delta Hb=Hmax-Hmin$	Strahler (1952)
Amplitude altimétrica do canal principal (ΔHc)	Diferença entre a altitude da nascente do córrego principal e o exutório.	$\Delta Hc=Hnac-Hfoz$	Strahler (1952)
Razão de relevo (Rr)	Relação entre a amplitude altimétrica da bacia (m) e o comprimento axial da bacia (m)	$Rr=\Delta Hb/Lb$	Schumm (1956)
Índice de rugosidade (Ir), adimensional	Produto da amplitude altimétrica da bacia (ΔHb) (m) e a densidade de drenagem (Dd).	$Ir=\Delta Hb.Dd$	Schumm (1956)
Índice de dissecação (Id), adimensional	Relação entre a amplitude altimétrica da bacia (m) e o ponto com maior altitude (Hmax) (m)	$Id=\Delta Hb/Hmax$	Singh; Dubey (1994)
Declividade do talvegue (S)	Relação entre a amplitude altimétrica do canal principal (ΔHc) (m) e o comprimento do canal principal (Lc) (km).	$S=\Delta Hc/Lc$	-

Organização: o autor.

Quadro 2: Fórmulas adotadas para estimar o tempo de concentração (Tc, horas). Nas formulas, **L** é o comprimento do canal principal (km) e **S** a declividade do canal principal (m/m).

	Fórmulas
Corps Engineers	$Tc = 0,191 L^{0,76} S^{-0,19}$
Ven te Chow	$Tc = 0,160 L^{0,64} S^{-0,32}$
Kirpich	$Tc = 0,0663 L^{0,77} S^{-0,385}$

Fonte: Silveira (2005)

A influência que cada bacia pode exercer na ocorrência da enchente na cidade foi calculada por meio de um índice proposto por Oliveira et al., (2010), denominado de Índice de Influência da Enchente (IIE), que consiste na soma de variáveis morfométricas que colaboram positivamente (área da bacia-A, amplitude altimétrica do canal principal- ΔHc , índice de rugosidade-Ir, densidade de drenagem-Dd) e na subtração de variáveis que influenciam negativamente no processo de enchente (comprimento do canal principal-Lc, índice de compacidade-Kc, índice de sinuosidade-Is).

Oliveira et al., (2010) atribuíram, de forma empírica, peso 3 para a área de drenagem (A) e peso 2 para o comprimento do curso d'água principal (Lc), por serem as variáveis que incorporam a superfície a ser drenada e o tempo de concentração, ambas essenciais para o entendimento das enchentes.

O Índice de influência da enchente (IIE) é definido pela equação (1)

$$IIE = \Delta Hc + Ir + Dd + 3.A - Kc - Is - 2.Lc \quad (\text{Equação 1})$$

Para aplicar a equação 1, as variáveis morfométricas devem ser padronizadas, transformando os valores absolutos das variáveis, que possuem qualquer média e qualquer variância (X), numa distribuição normal padrão com média zero e variância 1 (Z), mediante a seguinte equação:

$$Z = X - \mu/\sigma \quad (\text{equação 2})$$

Onde μ e σ correspondem à média e ao desvio padrão do conjunto de valores da variável X, respectivamente.

A estimativa da vazão máxima para cada bacia foi realizada empregando o método I-Pai-Wu modificado. O método I-Pai-Wu foi desenvolvido em estudos realizados no estado de Indiana (EUA) por Wu (1963). As modificações implementadas por Costa (1964) e Uehara (1969) *apud* Genovez (1991), deu origem ao método de I-Pai-Wu modificado. O método constitui um aprimoramento do método Racional, através da adição de fatores como armazenamento da bacia, distribuição da chuva e forma da bacia, e seu uso é recomendado pelo Departamento de Estrada e Rodagem do Estado de São Paulo, para bacias com área de drenagem entre 2 a 30 km² (DER/SP, 2001).

A vazão máxima foi estimada pela equação (3):

$$Q = 0,278.C.I.A^{0,9}K \quad (\text{equação 3})$$

Onde: C=coeficiente de escoamento superficial (adimensional), I=intensidade da precipitação (mm/h); A=área de drenagem da bacia (km²) e k=coeficientes de distribuição especial da precipitação (adimensional).

O coeficiente de escoamento superficial (C) é estimado pela equação:

$$C = \frac{C2}{C1} \cdot \frac{2}{1+F} \quad (\text{equação 4})$$

A obtenção dos coeficientes da equação 4 é explicada a seguir. O valor do coeficiente de escoamento volumétrico (C2) representa o grau de impermeabilidade da superfície e é obtido em tabelas disponíveis na literatura (MORANO, 2006).

Os valores de C1 (coeficiente de forma) são calculados pela fórmula sintética:

$$C1 = \frac{2}{1+F} \quad (\text{equação 5})$$

O fator de forma da bacia (F) (adimensional) é calculado pela equação (6).

$$F = \frac{Lc}{2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde Lc=comprimento do curso d'água principal (km) e A=área da bacia (km²).

A intensidade da precipitação (I, mm/h) foi calculada pela equação fornecida pelo Programa PLUVIO 2.1 para a cidade de Campo Bonito (equação 7) (GPRH, 2019). O Programa citado foi elaborado pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, MG.

$$I = \frac{1235,574 \cdot Tr^{0,142}}{(td + 7,009)^{0,792}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde td é a duração da chuva (min) equivalente ao tempo de concentração da bacia e Tr é o tempo de retorno da precipitação (anos). Foram calculados valores de I para períodos Tr de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Finalmente, os coeficientes de distribuição espacial da precipitação (K) para cada bacia foram estimados no ábaco da Figura 3. Nesta figura, lança-se em abscissa a área da bacia em função do tempo de duração da chuva, equivalente ao tempo de concentração (Tc em horas calculado pela fórmula de Kirpich, ver Quadro 5) para obter em ordenada o valor de K (%).

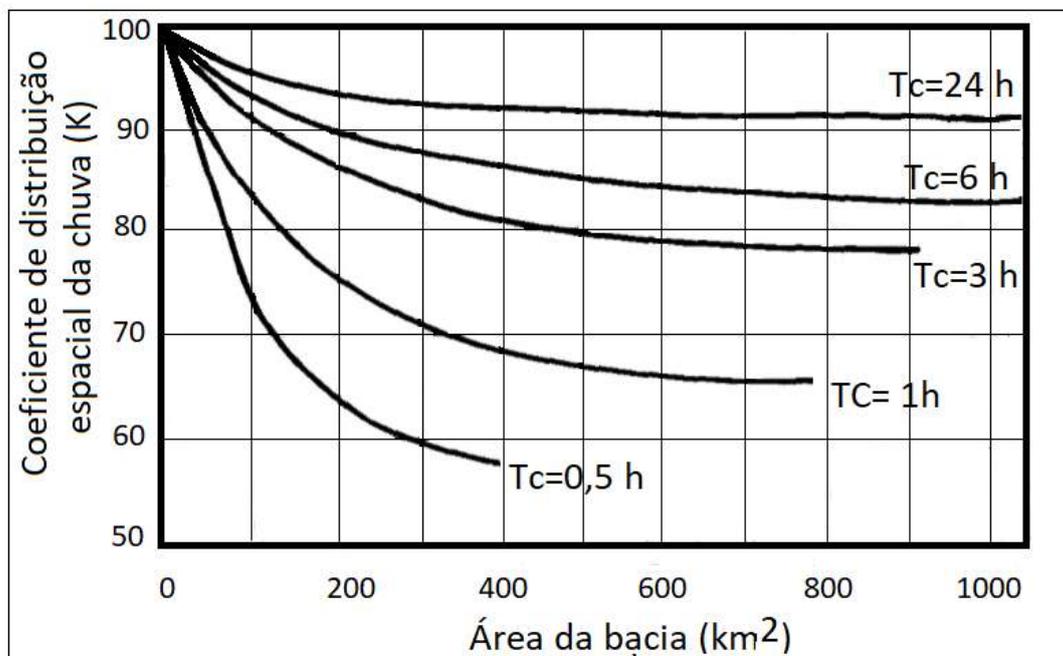


Figura 3: Relação do coeficiente de distribuição espacial da chuva (K) com a duração da precipitação (igual ao Tc da bacia) e a área da bacia.
Fonte: CETESB (1986).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Morfométrica

As variáveis e os parâmetros morfométricos referentes às características geométricas, padrão de drenagem e relevo das bacias do Bandeira, Santa Maria e Campo Bonito são listados no Quadro 3. As bacias estudadas são de 3ª e 4ª ordens e suas áreas variam de 9,17 km² (Campo Bonito) a 27,90 km² (Bandeira até a sede urbana de Campo Bonito).

Na análise da forma das bacias, foram utilizados os índices de compacidade (K_c) e a razão de alongação (R_e). No índice K_c , o valor mínimo corresponde à 1,0 e representa uma bacia circular, enquanto que as bacias mais alongadas possuem valores de K_c mais distantes de 1. Uma bacia será mais suscetível a enchentes quanto mais sua forma se aproxima de um círculo. Segundo Silva e Mello (2006), as bacias hidrográficas podem ser classificadas em função do valor de K_c nas seguintes categorias: bacias circulares ($K_c = 1$); bacias quase redondas a ovais ($1 < K_c < 1,25$), as quais são propensas a grandes enchentes; bacias ovais redondas a ovais oblongas ($1,25 < K_c < 1,50$), com tendência mediana a grandes enchentes; e bacias ovais oblongas a retangulares ($K_c > 1,50$) as quais não estão sujeitas a grandes enchentes. No presente estudo, as bacias dos córregos Campo Bonito e Bandeira possuem forma oval redonda ($K_c=1,30$ e $1,36$) e, portanto, propensas às enchentes moderadas e a bacia do Santa Maria ($K_c=1,46$) com forma próxima a categoria de oval oblonga, é menos suscetível a enchentes.

Quanto à razão de alongação (R_e), este parâmetro varia de 0 (bacia muito alongada) a 1 (bacia circular) e definem bacias com as seguintes formas: muito alongada ($R_e < 0,50$), alongada ($0,50 < R_e < 0,70$), pouco alongada ($0,70 < R_e < 0,80$), ovalada ($0,80 < R_e < 0,90$) e circular ($R_e > 0,90$) (SCHUMM, 1956). Nas bacias estudadas, o valor de R_e varia de 0,73 no córrego Campo Bonito (bacia pouco alongada) a 0,63 e 0,60 nos córregos Bandeira e Santa Maria, respectivamente (bacias alongadas). Analisando ambos os índices referentes à forma da bacia (K_c e R_e), o córrego Campo Bonito é o curso d'água que apresenta maior propensão a enchentes.

Na análise da textura de drenagem foram empregados vários índices. A primeira delas, a densidade de drenagem (D_d) indica a eficiência do sistema de drenagem em remover o excesso da precipitação que se transforma em escoamento superficial na bacia (PATTON e BAKER, 1976). Este parâmetro depende do clima, condições geológicas, cobertura vegetal, capacidade de infiltração do substrato rochoso e do solo, e os aspectos do relevo e da declividade da bacia (HORTON, 1932; STRAHLER, 1964). Os valores de D_d são semelhantes nas bacias estudadas, sendo maior no Campo Bonito (1,54 km/km²) e menor na bacia do Santa Maria (1,39 km/km²).

A extensão média de percurso superficial (Emps) é definida como a distância média em linha reta que o escoamento superficial teria que percorrer para alcançar o curso principal da bacia (VILLELA; MATTOS, 1975). O valor de Emps é mais baixo no Córrego Bonito e mais alto no Santa Maria (Quadro 3). O coeficiente de manutenção (Cm) depende da litologia, permeabilidade e capacidade de infiltração do solo e das condições climáticas e tipo de vegetação (SCHUMM, 1956). Baixos valores de Cm indicam maior densidade de drenagem e por tanto é necessário menos área para a manutenção de uma unidade de canal permanente. Nas bacias estudadas, os valores de Cm oscilam numa estreita faixa, variando de 0,65 (Campo Bonito) a 0,72 km²/km (Santa Maria) (Quadro 3).

No estudo morfológico do relevo nas bacias em apreço foram adotadas a razão de relevo e os índices de rugosidade e dissecação. A razão de relevo (Rr), proposta por Strahler (1957), é a relação entre a amplitude altimétrica da bacia e seu comprimento axial, e indica o declive total de bacia. O valor mínimo de Rr obtido nas bacias em estudo corresponde ao rio Bandeira (Rr=0,0255 m/m) e o máximo ao córrego Campo Bonito (Rr=0,0350 m/m).

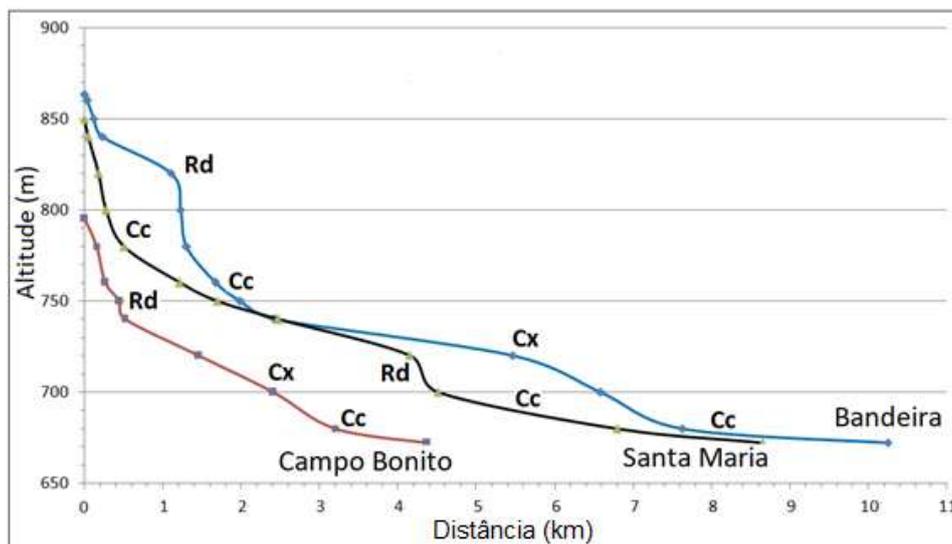
Índice de rugosidade (Ir) é um parâmetro que pode ser utilizado como indicador de eventos geomórficos extremos (SLAYMAKER, 2010). O autor comenta que bacias com valores de Ir inferiores a 300 são menos propensas a eventos geomórficos extremos, como quedas de blocos, deslizamentos e avalanches de rochas. Por outro lado, bacias com Ir > 3000 apresentam alta probabilidade para ocorrência de eventos extremos e são características de regiões montanhosas em áreas de clima tropical e alto índice pluviométrico (SCHUMM, 1956). Nas bacias estudadas, o Ir varia de 231,00 na bacia do Campo Bonito a 341,92 na bacia do Bandeira, portanto constituem áreas menos suscetíveis a movimentos de massa.

O índice de dissecação (Id) é um parâmetro que expressa o grau de erosão vertical imperante na bacia hidrográfica (SINGH; DUBEY, 1994). Os valores de Id variam de 0 (terreno plano) a 1 (terreno com encosta escarpada). Nas bacias em apreço, a bacia com menor valor Id é a do córrego Campo Bonito (0,180), enquanto que as bacias com maiores índices de dissecação constituem os córregos Santa Maria (0,237) e Bandeira (0,257).

Os perfis longitudinais dos córregos, exibidos na figura 4, mostram segmentos convexos, côncavos e rupturas de declive (*knickpoints*). Nas bacias em estudo, os *knickpoints* formam cachoeiras como a do Bandeira, Sbaraini e Santana. A morfologia escalonada dos perfis em rochas basálticas foi atribuída a fraturas dos níveis de derrames (BARCHA e ARID, 1975). Mais recentemente, a origem de segmentos convexos e rupturas de declive em perfis de rios que atravessam basalto vesicular-amigdaloidal na Formação Serra Geral foi associada com atividades neotectônicas por Lima e Binda (2013) e Lima (2014).

Quadro 3: Características morfométricas das bacias do Bandeira, Santa Maria e Campo Bonito.

Variáveis/Parâmetros	Bacias hidrográficas em estudo		
	Bandeira (cabeceira)	Santa Maria	Campo Bonito
Área da bacia (A), km ²	27,90	22,28	9,17
Perímetro da bacia (P), km	25,40	24,47	13,96
Comprimento do curso d'água principal (Lc), km	10,257	8,657	4,372
Comprimento axial da bacia (Lb), km	9,128	7,717	4,280
Razão de alongação (Re), adimensional	0,63	0,60	0,73
Índice de compacidade (Kc), adimensional	1,36	1,46	1,30
Hierarquização dos canais	4 ^a	4 ^a	3 ^a
Comprimento total dos canais (Lt), km	41,13	30,93	14,17
Densidade de drenagem (Dd), km/km ²	1,47	1,39	1,54
Coefficiente de manutenção (Cm), km ² /km	0,68	0,72	0,65
Extensão média de percurso superficial (Eps) (km)	0,34	0,36	0,32
Sinuosidade total	1,12	1,12	1,02
Altimetria max. (Hmax) e min. (Hmin) da bacia (m)	905 e 672,4	882 e 672,4	832 e 672
Altimetria max (Hnac) e min. (Hmin) do canal principal (m)	863 e 672,4	850 e 672,4	795 e 672
Amplitude altimétrica da bacia (ΔH_b), m	232,6	209,6	150
Amplitude altimétrica do canal principal (ΔH_c), (m)	190,4	177,6	123
Razão de relevo (Rr) (m/m)	0,0255	0,0272	0,0350
Índice de rugosidade (Ir), adimensional	341,92	291,34	231,00
Índice de dissecação (Id), adimensional	0,257	0,237	0,180
Declividade do canal principal (S) (m/m)	0,0186	0,0205	0,0281

**Figura 4:** Perfis longitudinais dos córregos em estudo. Na figura são indicados os trechos côncavos (Cc), convexos (Cx) e com rupturas de declive (Rd).

No Quadro 4 são apresentados os valores absolutos e padronizados das variáveis morfométricas, empregados para calcular os Índices de Influência da enchente (IIE) das bacias. A bacia do rio Bandeira apresentou o maior índice (5,58), principalmente, em virtude da maior área de

contribuição, maior amplitude altimétrica e maior índice de rugosidade. O segundo maior índice IIE (2,72) foi observado na bacia do córrego Santa Maria, que apresentou valores inferiores na maioria das variáveis quando comparada com a bacia do Bandeira. O índice correspondente ao córrego Campo Bonito alcança alto valor negativo (-8,60), indicando a grande distância numérica das duas primeiras bacias citadas, demonstrando a contribuição moderada desta bacia nas enchentes da cidade.

Quadro 4: Discriminação dos valores absolutos e padronizados das variáveis morfométricas usadas para calcular o índice de influência da enchente (IIE) nas bacias em estudo.

	ΔHb	A	Kc	Ir	Is	Lc	Dd	IIE
Valores absolutos das variáveis (X)								
Rio Bandeira	232,6	27,9	1,36	341,92	1,18	9,128	1,47	
Córrego Santa Maria	209,6	22,28	1,46	291,34	1,24	7,717	1,39	
Córrego Campo Bonito	150	9,17	1,3	231	1,12	4,28	1,54	
Média (μ)	197,40	19,78	1,37	288,09	1,18	7,04	1,47	
Desvio padrão (σ)	42,63	9,61	0,08	55,53	0,06	2,49	0,08	
Valores das variáveis padronizadas ($Z=X-\mu/\sigma$)								
Rio Bandeira	0,83	0,84	-0,16	0,97	0,00	0,84	0,04	5,58
Córrego Santa Maria	0,29	0,78	1,07	0,06	1,00	0,27	-1,02	2,72
Córrego Campo Bonito	-1,11	-1,10	-0,91	-1,03	-1,00	-1,11	0,98	-8,60

ΔHb =Amplitude altimétrica da bacia; **A**=área da bacia; **Kc**= Índice de compacidade; **Ir**= índice de rugosidade; **Lc**= Comprimento do curso d'água principal e **Dd**=densidade de drenagem.

Tempo de Concentração das Bacias

O tempo de concentração da bacia é uma característica hidrológica relevante no comportamento do escoamento superficial. Esta variável é definida pelo tempo necessário para uma gota d'água se deslocar superficialmente do ponto mais distante da bacia até o seu exutório ou seção de referência (McCUEN *et al.*, 1984). Com o emprego de três formulas empíricas listadas no Quadro 2, obtiveram-se os valores do tempo de concentração para cada uma das bacias (Quadro 5).

Quadro 5: Tempos de concentração estimados para as bacias em estudo com base nas suas características fisiográficas.

Equação	Tempo de concentração (horas)		
	Rio Bandeira (até a cidade de C. Bonito)	Córrego Santa Maria	Córrego Campo Bonito
Corps Engineers	2,12	1,83	1,04
Vente Chow	2,54	2,21	1,29
Kirpich	1,85	1,56	0,82
Tempo médio	2,17	1,87	1,05

Estimativa das Vazões Máximas pelo método I-Pai-Wu modificado

Para estimar as vazões máximas pelo método I-Pai-Wu, é necessário calcular inicialmente os parâmetros C1 (coeficiente de forma), C2 (coeficiente volumétrico de escoamento), F (fator de forma da bacia), C (coeficiente de escoamento superficial), Tc (tempo de concentração da bacia) e K (coeficiente de distribuição espacial da chuva). Os valores destes parâmetros para cada bacia são sumariados no Quadro 6. Finalmente, são calculados, para cada bacia, os valores da Intensidade da precipitação (I) e as vazões máximas com tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos (Quadro 7).

Quadro 6: Lista dos coeficientes C1, C2 e F utilizados para estimar os coeficientes de escoamento superficial (C) e os valores do tempo de concentração Tc empregados para estimar o coeficiente de distribuição espacial da chuva (K) para cada bacia.

Bacias	C1	C2	F	C	Tc (h) (método de Kirpich)	K
Bandeira (até a cidade de C. Bonito)	1,08	0,40	1,72	0,205	1,85	0,95
Santa Maria	1,10	0,40	1,62	0,207	1,56	0,96
Campo Bonito	1,22	0,40	1,28	0,216	0,82	0,98

Quadro 7: Valores estimados da intensidade da precipitação (I) e da vazão máxima (Q) pelo método de I-Pai-Wu para diferentes tempos de retorno nas bacias em estudo.

Tempo de retorno (anos)	Valores de I e Q	Rio Bandeira (até a cidade de Campo Bonito)	Exutório do córrego Santa Maria	Exutório do córrego Campo Bonito
2	I (mm/h)	31,13	35,29	56,14
	Q ₂ (m ³ /s)	44,97	42,49	32,34
5	I (mm/h)	35,45	40,19	63,94
	Q ₅ (m ³ /s)	51,22	48,39	36,86
10	I (mm/h)	39,12	44,35	70,55
	Q ₁₀ (m ³ /s)	56,52	53,40	40,64
25	I (mm/h)	44,56	50,51	80,36
	Q ₂₅ (m ³ /s)	64,37	60,92	46,29
50	I (mm/h)	49,16	55,74	88,67
	Q ₅₀ (m ³ /s)	71,03	67,11	51,07
100	I (mm/h)	54,25	65,50	97,84
	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	78,38	74,05	56,35

As estimativas das vazões mostram que com a contribuição dos córregos Santa Maria e Campo Bonito, a vazão máxima do Bandeira pode alcançar entorno de 120 m³/s para o tempo de retorno de 2 anos a 209 m³/s para o tempo de retorno de 100 anos. Os valores de vazões máximas estimados devem ser considerados com a devida precaução, tendo em conta que o método I-Pai-Wu é baseado em fórmulas empíricas que tendem a proporcionar valores de vazões sobrestimados, como foi constatado por Genovez (1991) e Teixeira *et al.* (2011).

O rio Bandeira e seus afluentes que atravessam a área urbana possuem canais entalhados. Em média, a largura do rio Bandeira no centro da cidade é de 8,50 m e a profundidade alcança 4,50 m. Apesar da razoável dimensão da seção transversal do canal (média de 38,25 m²), o nível das águas durante as cheias ultrapassa, em intervalos de dois a três anos, os limites do leito menor e inundam as partes mais baixas do fundo de vale, afetando ruas e moradias (Figura 5).



Figura 5: Registro fotográfico do pontilhão sobre o rio Bandeira na rua Getúlio Vargas, cidade de Campo Bonito (PR) após a inundação de 8 de junho de 2014.

Fonte: Portal Cantu ([youtube.com/c/PortalcantuBr/videos](https://www.youtube.com/c/PortalcantuBr/videos)).

Para unir os diversos bairros da cidade, foram construídos diversos pontilhões e bueiros. Estas obras, aparentemente subdimensionadas, podem ajudar a incrementar os problemas das inundações pela sua baixa capacidade de fluxo, dificultando o escoamento das águas durante as fortes precipitações e constitui mais um fator na formação do fenômeno de remanso (*backwater effect*). O estreitamento do canal de drenagem nos pontilhões e bueiros causa perda da energia do fluxo. Para superar esta perda, o nível da água se eleva à montante, formando o remanso (HAMILL, 1999).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo forneceu as principais características fisiográficas do rio Bandeira e seus afluentes, Santa Maria e Campo Bonito. Foram destacadas as características morfométricas das bacias que favorecem a geração de enchentes. As bacias do Bandeira e Santa Maria, além de possuírem maiores áreas de contribuição, apresentam maiores índices de rugosidade e dissecação e formas alongadas (oval oblonga). Estas características morfométricas, favoráveis às enchentes, colocam ambas as bacias como as principais contribuintes nos eventos de enchentes. Por outro lado, o córrego Campo Bonito, apesar de apresentar características morfométricas favoráveis às enchentes (forma oval redonda, maior densidade de drenagem e talvegue mais declivoso), a sua

pequena área de drenagem o coloca na última posição na geração de enchentes na área urbana. O Índice de Influência da Enchente (IIE) calculado para as citadas bacias mostram em termos quantitativos a contribuição de cada curso d'água nas inundações urbanas, indicando o rio Bandeira como principal causador destes eventos e o córrego Santa Maria numa posição secundária.

Com a adoção do método I-Pai-Wu modificado foi possível estimar, numa primeira aproximação, as vazões máximas no exutório das bacias para diversos tempo de retorno. As vazões obtidas devem ser consideradas com a devida cautela, tendo em conta que o método utilizado é baseado em fórmulas empíricas. Uma análise mais criteriosa de cálculo da vazão poderá ser feita com a instalação de postos fluviométricos e a aplicação de modelos hidráulicos integrados a programas SIG.

REFERÊNCIAS

AMARAL, R.; RIBEIRO, R.R. Inundação e enchentes. In: TOMINAGA, L.K; SANTORO, J; AMARAL, R. (Orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 40-53.

ANA (Agência Nacional de Águas) **Atlas de vulnerabilidade a inundações – Paraná**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2012. Escala 1:800.000.

BARCHA, S.F.; ARID, F.M. Origem das cachoeiras da Bacia do Alto Paraná. **Revista Brasileira Geociências**, São Paulo, 5 (2): 120-135. 1975.

BRASIL. Ministério do Exército. Folhas topográficas. Escala 1:50.000. 1998.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) **Drenagem Urbana - Manual de Projeto**. 3ª ed., 452 p. 1986.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo: DAEE, 2005, 116 p.

DER/SP (Departamento de Estrada e Rodagem do Estado de São Paulo). **Estudos hidrológicos**. 16 p., 2001.

GENOVEZ, A.M. **Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do estado de São Paulo**. 1991. 245f. Tese (Livre docente em Engenharia), Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). 1991.

GPRH (Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos). **Programa PLUVIO 2.1. Chuvas intensas para o Brasil**. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG. Disponível em: <http://ftp.ufv.br/dea/GPRH/Pluvio/PluviInstall.EX>. Acesso: maio 2019.

HAMILL, L. **Bridge hydraulics**. Londres: E & Fn Spon, 367 p. 1999.

HOFFMANN, T.C.P.; MENDONÇA, F.; GOUDARD, G. Eventos climáticos extremos: inundações e gestão de riscos no Paraná. In: Francisco de Assis Mendonça (Org.). **Riscos climáticos – Vulnerabilidades e resiliências associados**. 1ª Edição, Jundiaí: Paco Editorial, 2014, p. 223-260.

HORTON, R.E. Drainage basin characteristics. **Transaction of American Geophysics Union**, 13: 350-361. 1932.

_____. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society America Bulletin**, 56 (3): 275-370. 1945.

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1 CD-ROM. 2000.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) **Censo populacional**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/campo-bonito.html>> Acesso em: outubro de 2019.

IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Social e Econômico) Caderno Estatístico - Município de Campo Bonito. Curitiba 45 p. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85450>> Acesso em: novembro/2018.

LIMA, A. G.; BINDA, A. L. Lithologic and structural controls on fluvial knickzones in basalts of the Paraná Basin, Brazil. **Journal South America Earth Science**, 48: 262-270. 2013.

LIMA, A.G. Uso da relação declive-área para avaliação de interferências neotectônicas em perfil longitudinal de rio. **Boletim de Geografia**, Maringá, 32 (2): 158-172. 2014.

MAACK, R. **Geografia Física do Paraná**. 4ª edição. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012.

McCUEN, R.H.; WONG, S.L.; RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, 110 (7): 887-904. 1984.

MINEROPAR (Minerais do Paraná S.A.) **O Grupo Serra Geral no estado do Paraná**. Curitiba. Editora Mineropar, 2013. 2 v.

MINUZZO, S. **Análise das características do solo de Francisco Beltrão-PR e suas influências nas inundações do perímetro urbano**. 2016. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* de Pato Branco, 184 p. 2016.

MORANO, J.R. **Pequenas barragens de terra**. Metodologia para projetos e obras. Edição Codasp, 103 p., 2006.

NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F.; BETANCOURT, R.H.S.; VERDUGO, D.R.H; MACHADO, F.B. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. **Revista Geociências**, São Paulo, 21 (1/2): 15-32. 2002.

OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A.; SALDANHA, D.L. Influência de variáveis morfométricas e da distribuição das chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí, RS. **Revista de Geografia**. Recife v. especial, n. 3, 140-155. 2010.

PATTON, P.C.; BAKER, V.R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water Resources Research**, 12 (5): 941-952. 1976.

PIERUCCINI, M.A.; TSCHÁ, O. da C.P.; IWAKE, S. Criação dos municípios e processos emancipatórios. In: Fonseca Peris, Alfredo. (Org.). **Estratégias de Desenvolvimento Regional**. 1a ed. Cascavel: EDUNIOESTE, 2003, v. 1, p. 105-178.

PINTO, E. J. de A.; AZAMBUJA, A. M. S. de; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. P. de B.; PICKBRENNER, K. (Coords.). **Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos**. Brasília: CPRM, 2011. 1 DVD. Escala 1.5:000.000. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em: 21 dez. 2018.

ROCHA, P.S.M. **Gestão ambiental - Gestão em Áreas de Riscos de Enchentes: Um Estudo de Caso de União da Vitória**. 2ª. ed., União da Vitória: Editora UNIPORTO, 2014. 172p

SANTOS, L.J.C.; FIORI, C.O. CANALI, N.E. FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T. da; SILVA, J.M.F. da; ROSS, J.L.S. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 7 (2): 3-12. 2006.

SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society American Bulletin**, 67: 597-646. 1956.

SCHUMM, S.A. **A tentative classification of alluvial river channels**. US Geological Survey Circular 477. 10 p. 1963.

SILVA, A.M.; MELLO, C.R. **Apostila de Hidrologia**. Universidade Federal de Lavras, 2008.

SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 10 (1), p.5-23. 2005.

SINGH, S.; DUBEY, A. **Geo-environmental planning of watersheds in India**, 28, Chugh Publication, India. 28, 69 p. 1994. Disponível: <<https://wizzwoo.com/download.php?q=geoenvironmental-planning-of-watersheds-in-india>>. Acesso 20 dez. 2018.

SLAYMAKER, O. Mountain hazards. In: Alcántara-Ayala, I.; Goudie, A.S. (Eds.) **Geomorphological hazards and disaster prevention**. Cambridge University Press, p. 33-49, 2010.

STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society America Bulletin**, 63: 1117-1142. 1952.

_____. Quantitative analysis of watershed Geomorphology. **Transaction of American Geophysics Union**, 38: 913-920. 1957.

_____. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow, V.T. (Ed.) **Handbook of Applied Hydrology**. New York, McGraw Hill Book Company, Section 4–11. 1964.

TEIXEIRA, C.F.A.; DAMÉ, R.C.F.; SIQUEIRA, G.A.; SALGUEIRO, L.C.; BACELAR, D. Vazão máxima de projeto: metodologia para dimensionamento de bueiros em áreas agrícolas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, 17: 49-56. 2011.

TUCCI, C.E.M. Inundações urbanas. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.; BARROS, M.T. (Orgs.) **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS) e ABRH Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1., 15-36 p. 1995.

_____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

_____. Drenagem Urbana e Controle de Inundações. In: CAMPOS, H. e CHASSOT, A. (Orgs). **Ciências da Terra e Meio Ambiente**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 1999.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

WU, I-P. Design hydrographs for small watersheds in Indiana. **Journal of the Hydraulics Division. American Society of Engineers**, 89 (6), p. 35-66, 1963.

ZANELLA, M.E. **Inundações em Curitiba: Impacto, risco e vulnerabilidade socioambiental**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2012. 194 p.