

ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE ÁREAS AFETADAS POR INUNDAÇÃO URBANA EM MANAUS (AM)

Rogério Ribeiro Marinho

Mestre em Sensoriamento Remoto - Universidade Federal do Amazonas
rogeo@ufam.edu.br

Elaine Cristina Maia da Silva

Graduanda em Geografia - Universidade Federal do Amazonas
lany.tina10@gmail.com

Recebido: 26/10/15; Aceito para publicação: 29/04/16

RESUMO

Atualmente a disponibilização de dados topográficos orbitais possibilitam realizar caracterizações morfométricas sobre grandes áreas de forma rápida e precisa. No entanto, poucas são as pesquisas na Amazônia que correlaciona produtos derivados de modelo digital de elevação com eventos de inundações em áreas urbanas. Este artigo analisa as características morfométricas de áreas afetadas por inundação em duas importantes bacias hidrográficas da cidade de Manaus (AM), a bacia do Mindú e a bacia dos Franceses. Dados topográficos e temáticos foram analisados em ambiente de sistemas de informações geográficas. A caracterização morfométrica de áreas inundadas possibilitou identificar a localização de regiões planas com baixa elevação, bem como áreas com maior convergência e alta velocidade dos fluxos de água. Os dados morfométricos em conjunto com o mapa de uso e cobertura do solo urbano auxiliaram na identificação de áreas suscetíveis à inundações em diferentes partes nas duas bacias.

Palavras-chave: Inundação; Morfometria; Geoprocessamento.

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF URBAN FLOODED AREAS IN MANAUS (AM)

ABSTRACT

Currently the availability of orbital topographic data allow performing morphometric characterization over large areas quickly and accurately. However, few researches relate data derived from digital elevation model with flood events in Amazon urban areas. This paper analyzes the morphometric characteristics of areas affected by flooding in two important basins in urban area of Manaus (AM), the Mindú and Franceses river basins. Topographic and thematic data were analyzed in geographical information system (GIS). The morphometric characterization of flood areas made possible to identify the location of flat areas with low elevation, as well as areas with high convergence and high velocity of water flows. Morphometric data with land use and land cover map aided to the identification of susceptible areas to flooding in both basins.

Keywords: Flash flood; Morphometry; Geoprocessing.

INTRODUÇÃO

Eventos de inundações em áreas urbanas muitas vezes são relacionadas ao crescimento desordenado das cidades, devido ao aumento demográfico e falta de políticas públicas adequadas, que ocasiona vários problemas sociais e ambientais. Parte da população dos grandes centros urbanos não possuem condições de estabelecer sua moradia em áreas adequadas, e acabam ocupando as margens dos rios ou áreas de encostas, áreas suscetíveis a desastres naturais. A ocupação urbana desordenada nas margens de rios cria um cenário de grande risco para a população, muitas vezes com ocorrências periódicas de inundações, acúmulo de lixo, entulhos e o risco a doenças de veiculação hídrica (HORA e GOMES, 2009).

Episódios de inundação estão se tornando cada vez mais frequentes nos grandes centros urbanos, causando grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais. De acordo com Min. Cidades/IPT (2007), inundação representa o transbordamento das águas de um canal de drenagem, atingindo a planície de inundação ou área de várzea. Segundo UNISDR (2002), eventos de inundações são problemas geoambientais derivados de fenômenos hidrometeorológicos, muitas vezes associados a um intenso e grande volume de precipitação. Conforme Amaral e Ribeiro (2009), a magnitude e a frequência de inundações sobre uma área varia em função da distribuição espacial dos elementos da paisagem (precipitação, taxa de infiltração, tipo de solo, etc.), bem como em função das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem.

Até início da década de 1970 a população urbana de Manaus era de aproximadamente 300.000 habitantes, mas a partir da implantação da Zona Franca de Manaus a cidade teve um elevado crescimento demográfico, chegando a 1,8 milhões de habitantes no ano de 2010. Na cidade o problema de fenômenos hidrometeorológicos extremos são principalmente relacionados à enxurradas, inundações bruscas e alagamentos. Por outro lado, a enchente ou inundação gradual do Rio Negro ocorre anualmente, por volta do meses de junho e julho, situação que afeta a vazão dos principais canais de drenagem urbanos que deságua no Rio Negro devido ao barramento hidráulico deste grande rio. A variabilidade anual dos principais canais de drenagem urbana na cidade fica em torno de 10 metros entre o período de cheia e seca (AMAZONAS, 2013).

Atualmente grande parte das margens dos igarapés (denominação local para os pequenos cursos de água) da área urbana de Manaus são ocupadas por moradores de baixa renda. Estimativa realizada por SEMDEC e CPRM (2012) indica que 12.579 edificações estão localizadas em áreas com risco à inundações bruscas ou gradual na área urbana de Manaus. Este fato mostra a existência de áreas suscetíveis à inundação, em que muitas vezes não são desenvolvidas medidas preventivas pelo poder público, apenas medidas assistenciais pós-evento, decorrentes da debilidade da Defesa Civil e falta de cultura de risco nas instituições públicas (CRUZ et al., 2009; CRUZ e COSTA, 2012). A ocupação das margens dos igarapés acontece devido ao aumento da espacialidade urbana, fazendo com que a população ocupem locais vulneráveis à riscos naturais (COSTA, 2012). Outra circunstância que contribui para as ocupações em áreas de risco, conforme observado por Cruz e Costa (2012), é o preço do solo urbano, pois quem não pode pagar para morar em áreas mais bem servidas de serviços públicos, constroem suas casas nos declives dos tabuleiros ou na margem dos igarapés.

Segundo Florenzano (2008), a morfometria refere-se aos aspectos quantitativos do relevo, tais como altitude, declividade e formas de terreno, o que possibilita aplicações em estudos de avaliação de fragilidade e vulnerabilidade dos ambientes. Estes aspectos do terreno podem ser analisados através das técnicas de geoprocessamento disponíveis em diversos sistemas de informações geográficas (SIG), que possibilita espacializar informações e gerar modelos de previsão, como os mapas de suscetibilidade e de risco (CRISTOFOLETTI, 1999). As características morfométricas de uma bacia permite estimar seu comportamento hidrológico em eventos de inundações bruscas ocasionado por fortes chuvas (PERUCCA e ANGILIERI, 2011), neste sentido, Wilford *et al*, (2004) destacam que informações morfométricas básicas sobre bacias hidrográficas devem ser usadas para identificar áreas de perigo.

Considerando o problema das inundações urbanas em Manaus, este trabalho teve como objetivo analisar as características morfométricas de áreas afetadas por inundações bruscas nas bacias hidrográficas do igarapé dos Franceses e do igarapé do Mindú a partir de técnicas

de geoprocessamento. Esta pesquisa visa contribuir com o entendimento da resposta hidrogeomorfológica de vertentes e de canais de drenagens em casos de precipitação extremas, devido à ausência de dados hidrológicos nessas bacias, bem como na identificação de impactos do tipo de uso do solo em ambientes urbanos.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

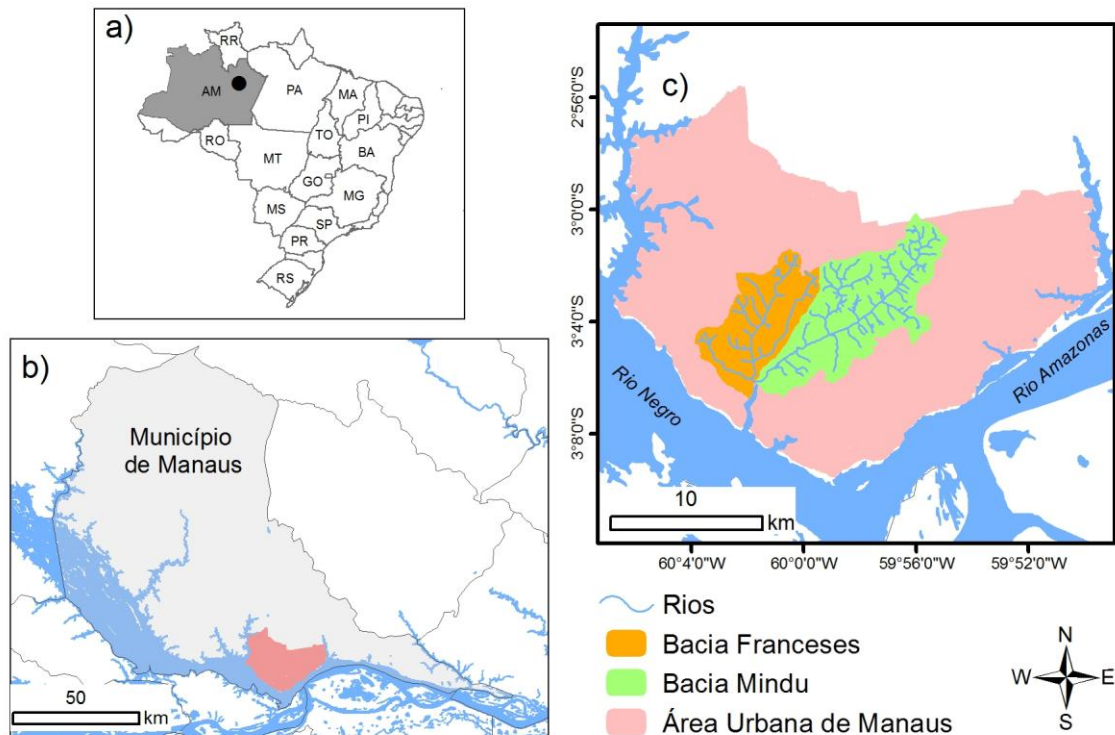
Manaus é a capital do estado do Amazonas e concentra mais de 50% da população do estado, em sua maior parte na área urbana da cidade. A cidade teve sua ocupação iniciada no século XVII com a criação da Fortaleza de São José pelos Portugueses, se estabelecendo nas margens do Rio Negro próximo da confluência com o Rio Solimões. A área urbana é limitada ao sul pelo Rio Negro, a oeste pelo Rio Tarumã-Açu e a Leste pelo Rio Puraquequara. As bacias do igarapé do Mindú e do igarapé dos Franceses localizam-se na região central da cidade. A bacia dos Franceses possui uma área de 39 km² e envolve parte das zonas Centro-Sul, Centro-Oeste, Oeste e Norte da área urbana. Já a bacia do Mindú possui uma área de 65 km² e envolve parte das zonas Centro-Sul, Sul, Norte e Leste de Manaus (Figura 1).

Na região do estudo a geologia é constituída de depósitos quaternários, com afloramentos da Formação Alter do Chão, composta por argilitos, folhelhos, siltitos, arenitos e conglomerados. O domínio geomorfológico é classificado como Planalto Dissecado dos Rios Negro-Uatumã (IBGE, 2009), representado pela presença de pequenas e médias colinas dissecadas, vales fechados e drenagem com padrão dendrítico.

O clima de Manaus pode ser caracterizado como equatorial com período de subseca - um a dois meses secos (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007). Na região Amazônica a dinâmica da atmosfera, principalmente a produção de chuvas, é fortemente influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), células de circulação de Walker e Hadley, pela Alta da Bolívia (MOLION, 1987) e por linhas de instabilidade (NIMER, 1989). Devido à proximidade com a linha do equador, a região recebe uma constante e elevada quantidade de radiação solar ao longo do ano, que resulta pouca variação nas temperaturas mensais, com valor médio de 26,7° C, mínimo de 22,8° C e máxima de 31,5° C.

A precipitação registrada em Manaus apresenta uma considerável variação ao longo do ano, sendo o período chuvoso de março a abril, regionalmente conhecido como inverno ou de cheia dos rios, e o período menos chuvoso entre agosto e setembro, regionalmente conhecido como verão ou de seca dos rios. A climatologia de chuva em Manaus observada entre 1961-1990 mostra que a precipitação anual é de 2.290 mm. O mês mais chuvoso é março com 310 mm, e o mês menos chuvoso é agosto com 60 mm (MASCARENHAS JUNIOR; et al., 2009).

Figura 1. Localização das áreas de estudo. a) Estado do Amazonas em relação ao mapa do Brasil, ponto indica a cidade de Manaus; b) Limite municipal de Manaus com indicação da área urbana e; c) bacias hidrográficas analisadas dentro da área urbana de Manaus.



DADOS

Foram utilizados nesta pesquisa: (a) 832 pontos de inundação registrados entre os anos 2005 e 2010, coletados com base nos boletins de ocorrências de edificações afetadas por inundações, levantados pela Secretaria Municipal de Defesa Civil de Manaus (SEMDEC); (b) base cartográfica digital vetorial com limite das bacias, rede de drenagem e arruamento; (c) registros fotográficos de áreas afetadas por inundação; (d) variáveis morfométricas do terreno oriundas do projeto Topodata (INPE, 2015) disponibilizadas em formato matricial, no sistema de projeção UTM, Datum WGS 1984, com tamanho de *pixel* de 1 arco de segundos (~30 metros); (e) imagens do satélite RapidEye com resolução espacial de 5 metros adquiridas no ano de 2011. Os dados pontuais fornecidos pela Defesa Civil de Manaus correspondem a coordenadas geográficas espacializadas em base cartográfica com datum horizontal WGS 1984.

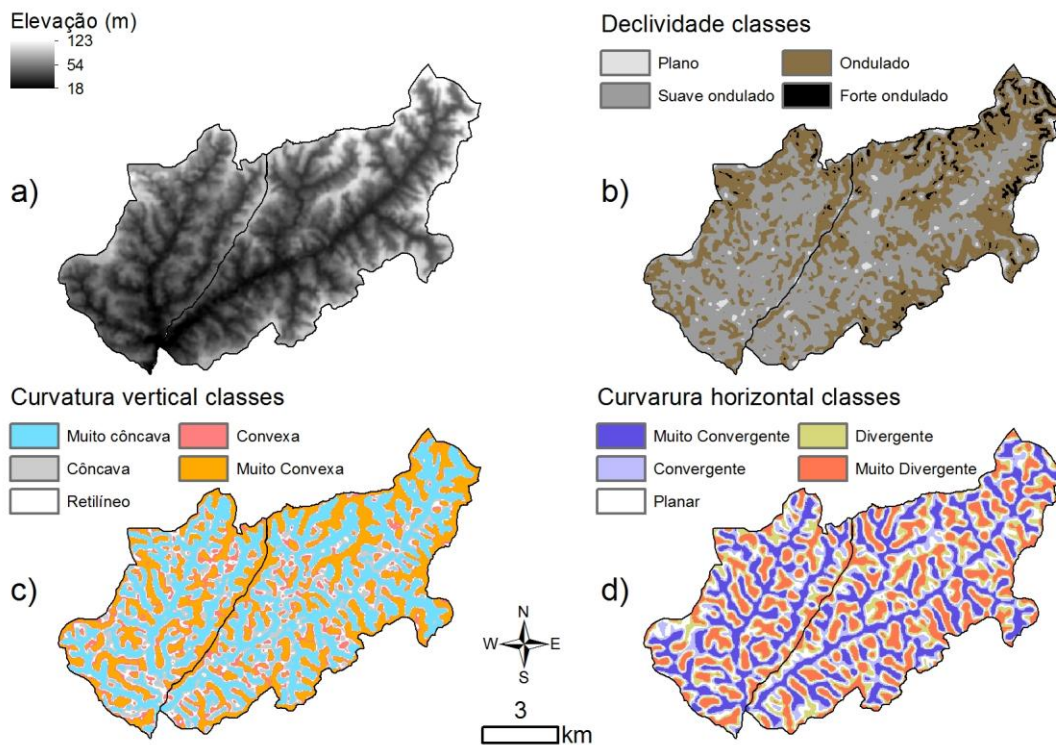
As variáveis morfométricas foram derivadas do modelo digital do terreno produzido pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). Os dados SRTM apresentam precisão altimétrica com erro absoluto de 6,2 m para a América do Sul (RODRÍGUEZ et al., 2006). Uma avaliação realizada por Oliveira e Paradella (2008) verificaram que a exatidão altimétrica de dados SRTM na Amazônia está dentro da classe A conforme as definições do Padrão de Exatidão Cartográfico vigente no Brasil, sendo possível utilizar estes dados em trabalhos na escala de até 1:100.000.

A partir de técnicas de geoprocessamento e a disponibilidade de dados derivados de sensoriamento remoto, como os disponíveis no projeto Topodata que utilizou os dados SRTM para concessão de variáveis morfométricas de todo território nacional (VALERIANO, 2008b), caracterizações morfométricas se tornaram mais viáveis e de imediata aplicação. Isto contribuiu para identificar processos decorrentes da dinâmica geomorfológica e hidrológica, como eventos de inundações.

Para análise do terreno foram selecionadas as seguintes variáveis morfométricas: (a) elevação - altitude do relevo em relação ao nível do mar; (b) declividade - ângulo de inclinação da superfície local em relação ao plano horizontal, expressa em graus ou porcentagem; (c) curvatura vertical - referente a forma convexo, côncavo e retilínea do terreno analisado em perfil vertical; e (d) curvatura horizontal - referente ao caráter divergente, convergente e planar dos fluxos de matéria sobre o terreno, quando analisado em projeção horizontal. Para a variável declividade nesta pesquisa, foi utilizado valores em porcentagem agrupadas nas classes sugeridas por Embrapa (1999). A descrição detalhada sobre estas variáveis morfométricas podem ser obtidas em Valeriano (2008a). A Figura 2 apresenta a distribuição espacial das variáveis morfométricas oriundas do Topodata utilizadas neste trabalho.

Dentre as diversas variáveis morfométricas existentes, duas se destacam pela sua relação com o escoamento fluvial, a curvatura horizontal e a curvatura vertical. A curvatura horizontal refere-se ao caráter divergente, planar ou convergente dos fluxos de matéria, ou seja, determina se o escoamento convergirá ou se dissipará no terreno. Já a curvatura vertical se refere à forma convexa ou côncava do terreno analisado em perfil. As formas côncavas tendem a concentração e acumulação dos fluxos de escoamento e as formas convexas apresentam o predomínio da dispersão dos fluxos de escoamento (VALERIANO, 2008a).

Figura 2. Variáveis morfométricas utilizadas no estudo.



Fonte: INPE (2015).

PROCESSAMENTOS E ANÁLISES

A manipulação dos dados foi realizada utilizando o SIG ArcGIS, versão 10.1. Inicialmente foi realizada uma análise pontual através da sobreposição dos dados de inundação com as variáveis morfométricas do Topodata. Em seguida, foi realizada a caracterização morfométrica das bacias em estudo. Para identificar as principais características de terreno, foram identificados alguns parâmetros morfométricos em cada bacia. Nesta pesquisa, três grupos de parâmetros morfométricos foram considerados: (a) parâmetros lineares que quantificam a rede de drenagem por meio de seus atributos como comprimento dos canais e sinuosidade; (b)

parâmetros zonais que quantificam os atributos da bacia hidrográfica correlacionando-os a valores ideais e à rede de drenagem da mesma área de estudo; (c) parâmetros hipsométricos que correlacionam a variação altimétrica em relação a área e/ou rede de drenagem da bacia. No Quadro 1 estão listados os parâmetros morfométricos analisados nas áreas de estudo.

Quadro 1. Relação dos parâmetros morfométricos analisados.

Análise	Parâmetro/Unidade	Definição	Equação
Linear	Comprimento do canal principal (km)	Distância entre nascente e a foz do canal de drenagem.	
	Comprimento vetorial do canal principal (km)	Distância vetorial entre os pontos extremos do canal.	
	Índice de sinuosidade do canal principal - I_s	Relação entre o comprimento do canal principal e o comprimento em linha reta do canal principal. Valores próximo de 1 indicam um canal principal retilíneo, indicando uma elevada velocidade da água.	$I_s = L/D_v$ em que L é o comprimento do canal principal; e d_v é o comprimento vetorial entre os pontos extremos do canal.
Zonal	Área da bacia (km ²)	Área drenada pelo sistema fluvial, projetada em plano horizontal. Quanto maior a área da bacia, maior é a o volume de água que passará pelo seu exutório.	
	Índice de circularidade - IC	O índice de circularidade tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna alongada. Quanto mais circular for a bacia, mais suscetível à inundações ela será.	$IC = 12,57 \times A/P^2$ em que A é a área da bacia; e P é o perímetro da bacia.
	Coeficiente de Compacidade - K_c	Relaciona a forma da bacia a um círculo. Quanto mais próximo a 1, mais circular e mais suscetível à inundações é a bacia. Quanto mais distante de 1, mais alongada a bacia será.	$K_c = 0,28 \times P/A$ em que P é o perímetro da bacia; e A é a área da bacia.
	Fator Forma - F	Relaciona a forma da bacia a um retângulo. É dada pela razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Segundo Cardoso et al. (2006), uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a inundações.	$F = A/L^2$ em que A é a área da bacia de drenagem; e L é o comprimento do eixo da bacia.
Hipsométrica	Amplitude altimétrica (m)	É a diferença entre o ponto de maior altitude para o ponto de menor altitude da bacia.	Altitude máxima menos altitude mínima.
	Declividade média (porcentagem)	Expressa a energia e a intensidade de atuação dos processos morfogenéticos, incluindo a dinâmica dos escoamentos superficiais concentrados e difusos (laminar) nas vertentes.	

Fonte: CHRISTOFOLETTI (1974) e VEIGA (2013)

Trabalhos de campo para reconhecimento da área de estudo e para avaliar a precisão dos dados de localização das ocorrências de inundação registradas pela Defesa Civil foram realizado entre os dias 20 de abril e 08 de maio de 2015. A aquisição das coordenadas em UTM foi executada com equipamento de GPS de navegação da marca Garmim, modelo eTrex.

RESULTADO E DISCUSSÃO

ANÁLISE DOS REGISTROS DE INUNDAÇÕES

Dos 832 pontos de inundação registrados entre 2005 e 2010 pela Defesa Civil nas áreas em estudo, a bacia do Mindú com 523 registros teve o maior número de ocorrências de inundação, em comparação aos 309 registros na bacia dos Franceses (Figura 3). O ano com maior número de ocorrências na bacia do Mindú foi em 2007, com um total de 129 registros, e o menor número de registros foi observado em 2010, com 54 no total. Para a bacia dos Franceses os anos com maiores registros foram 2005 e 2007 com 70 ocorrências, já o menor número de registros nesta bacia ocorreu em 2009, com 39 no total (Figura 4).

Figura 3. Distribuição espacial e temporal dos registros de inundações.

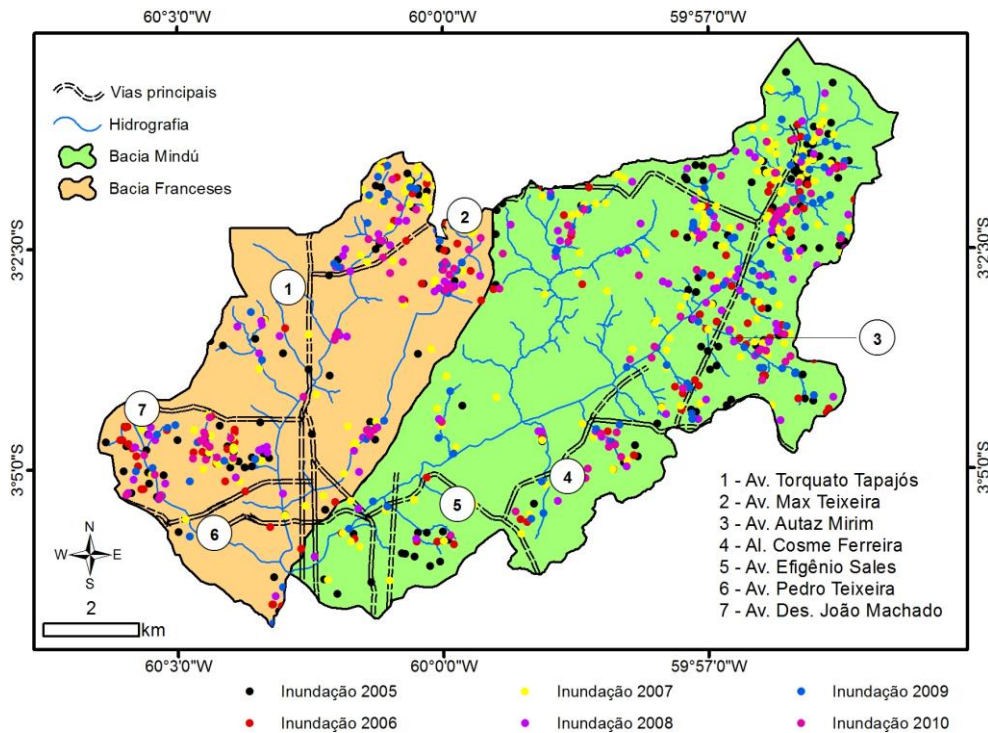
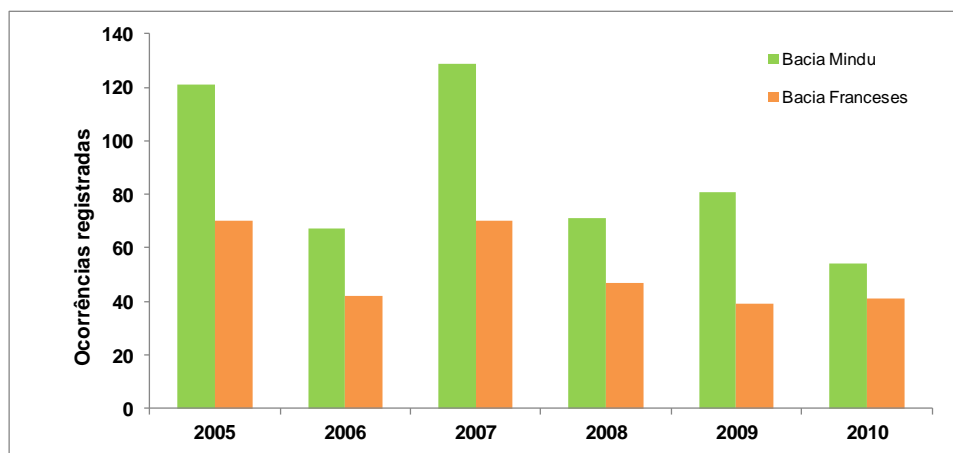


Figura 4. Evolução temporal dos registros de inundações para a Bacia do Mindu e Bacia dos Franceses.

No ano de 2005 o total de precipitação na cidade de Manaus ficou 81 mm abaixo da normal climatológica, no entanto, no trimestre fevereiro, março e abril a precipitação registrada ficou acima dos valores esperados, e foi observado três dias com precipitação acima de 50 mm em 24 horas. No ano de 2007 a precipitação total registrada ficou 116 mm acima da normal climatológica, apresentando nos meses de janeiro a maio seis dias com precipitação acima de 50 mm em 24 horas. Cassiano (2013) ao analisar os episódios pluviais em abril de 2007 apontou a ocorrência de 85 áreas de inundações brusca na cidade, que desalojou aproximadamente 577 famílias.

A análise pontual das áreas afetadas por inundações no período de 2005 a 2010 indicou que os locais afetados localizam-se em diferentes faixas de elevações em ambas as bacias, onde 42% dos pontos de inundação estão em áreas acima de 50 metros de elevação. Quanto as classes de declividade, 43% das áreas inundadas estão em terrenos do tipo suave ondulado e 53% em terrenos ondulados, fato que pode estar relacionado ao maior número de ocorrências registradas em locais com declividade entre 8% e 20%. Terrenos com escoamento convergente representam 65% dos pontos, já os terrenos com características côncavas, ou seja, de concentração de fluxo, representam 72% dos pontos observados. Destacamos que 15% dos pontos de inundação foram registrados em terrenos convexos. Os dados na Tabela 1 apresentam os resultados detalhados da análise pontual.

Tabela 1. Variáveis morfométricas e número de ocorrências de inundações registradas.

VARIÁVEL	CLASSE	ÁREA DA BACIA (%)		NÚMERO DE OCORRÊNCIAS
		BACIA MINDU	BACIA FRANCESES	
Elevação (metros)	18-40	17	23	226
	41-51	29	35	288
	52-65	25	26	190
	66-81	16	13	80
	82-120	12	4	48
Declividade (classes)	Plano	02	02	17
	Suave ondulado	50	61	442
	Ondulado	44	36	359
	Forte Ondulado	04	01	14

Curvatura Vertical	Muito côncava	37	33	500
	Côncava	14	15	104
	Retilíneo	09	10	40
	Convexa	11	14	65
	Muito Convexa	29	28	123
Curvatura Horizontal	Muito Convergente	23	24	363
	Convergente	19	20	185
	Planar	17	17	119
	Divergente	19	17	86
	Muito Divergente	22	22	79

Conforme observado por Cassiano e Costa (2012), as áreas mais afetadas por inundações e escorregamentos estão localizadas nas zonas norte e leste de Manaus, principalmente na bacia do Mindú, área de maior densidade habitacional, alguns pontos em terrenos mais elevado, com locais de cotas superiores à 100 metros e próximo dos divisores das bacias.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO RELEVO DAS BACIAS EM ANÁLISE

A declividade média na bacia dos Franceses é de 7% e na bacia do Mindú é de 8%, e as classes de declividade predominante em ambas as bacias é do tipo suave ondulado e do tipo ondulado. A elevação máxima observada na bacia do Mindú foi 123 metros e na bacia dos franceses foi de 101 metros. A altitude mínima para a bacia do Mindú é de 19 metros e para a bacia dos Franceses é de 18 metros. Estes valores mostram que a amplitude altimétrica na bacia do Mindú (104 metros) é maior que na bacia dos Franceses (85 metros), onde podemos supor que a energia potencial sobre a bacia do Mindú pode ser maior que na bacia dos Franceses. Conforme dados apresentados na Tabela 2, a bacia do Mindú apresenta maior área do que a bacia dos Franceses e conseqüentemente também apresenta maior perímetro. Segundo Brubacher et al., (2011) a análise da área é importante sobre o efeito de inundações, pois quanto maior for a área da bacia, maior poderá ser o volume de água que poderá ser escoado na bacia e que pode incrementar o efeito de uma inundação a jusante.

Tabela 2. Parâmetros morfométricos da bacia do Mindú e bacia dos Franceses.

PARÂMETRO	BACIA DO MINDÚ	BACIA DOS FRANCESSES
Área (km ²)	64,70	38,95
Perímetro (km)	47,96	31,66
Comprimento do canal principal (km)	17	10
Comprimento vetorial do canal principal (km)	16	9
Índice de Sinuosidade	1,09	1,09
Índice de circularidade	0,35	0,49
Coefficiente de compacidade	1,67	1,42
Fator forma	0,22	0,42
Declividade média (%)	8	7
Altitude máxima (m)	124	101
Altitude mínima (m)	19	18
Amplitude altimétrica	105	83

O comprimento do canal principal e o comprimento vetorial do canal principal também foram maiores para a bacia do Mindú. Estas variáveis serviram para definir o índice de sinuosidade. O resultado do índice de sinuosidade teve o valor de 1,09 em ambas bacias. Valores próximos a 1 indicam alta energia, e conseqüentemente, maior velocidade de propagação de fluxo na bacia. Um fator externo que pode contribuir para esse resultado é a retificação dos canais, presente em vários trechos nos canais nas duas bacias observado em campo (Figura 5).

Figura 5. Trecho do igarapé dos Franceses (a) e do Mindú (b) retificado.



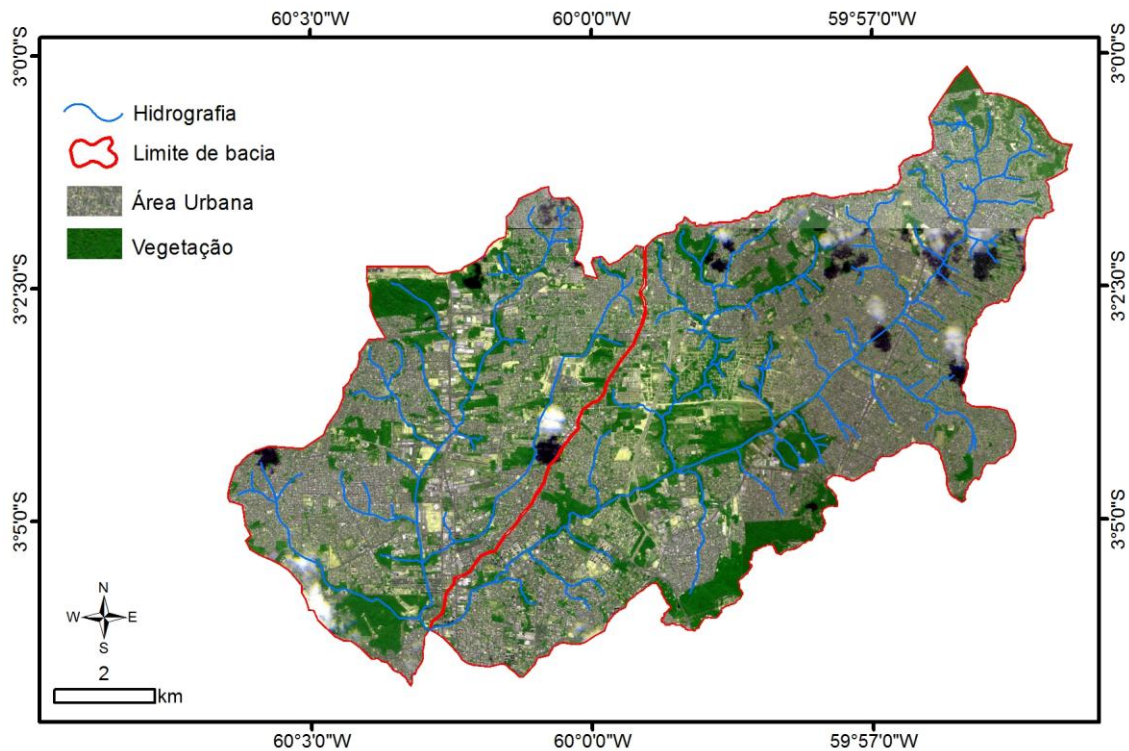
Quanto ao índice de circularidade, as duas bacias indicaram tendência para a forma alongada, com valor 0,35 na bacia do Mindú e 0,49 na bacia dos Franceses. Segundo Veiga (2013) valores abaixo de 0,51 favorecem o escoamento superficial de forma rápida sobre bacias. O resultado indicado pelo índice de circularidade também pode ser corroborado pelo fator forma e pelo coeficiente de compacidade. O fator forma apresentou valores baixos para ambas bacias, com 0,22 na bacia do Mindú e 0,42 na bacia dos Franceses. Já o coeficiente de compacidade apresentou valores de 1,67 na bacia do Mindú e 1,42 na bacia dos Franceses, ambos coeficientes foram maiores do que 1, o que indica uma bacia mais circular e mais suscetíveis à inundação (CARDOSO et al., 2006). Com base nesses resultados dos parâmetros morfométricos, podemos supor que a bacia dos Franceses se mostrou naturalmente mais suscetível à inundação em relação a bacia do Mindú.

A análise dos parâmetros morfométricos zonais mostraram que a bacia do Mindú escoar um volume maior de água. A bacia do Mindú possui relevo mais suave e uma amplitude de elevação maior em relação a bacia dos Franceses. A bacia dos Franceses apresenta relevo mais ondulado em relação a bacia do Mindú. No entanto, a amplitude altimétrica é menor na bacia dos Franceses, o que pode indicar um escoamento mais lento, e em alguns casos, aumentar a suscetibilidade à inundação nessa bacia. Neste sentido, os índices morfométricos coeficiente de compacidade e índice de circularidade também indicaram que a bacia dos Franceses possui maior suscetibilidade natural à inundação em relação a bacia do Mindú.

Os resultados obtidos na análise morfométrica sobre a bacia dos Franceses apontam suscetibilidade natural a inundação maior inclusive em relação a outras bacias próximo da área em estudo, as bacias do Tarumã e Puraquequara, conforme resultados obtidos por Costa et al. (2013). No entanto, os registros de habitações afetadas por inundações foram maiores na bacia do Mindú para o período analisado.

Para auxiliar na análise dos resultados, um mapa de uso do solo urbano e da cobertura da vegetação foi elaborado com imagens de alta resolução espacial adquiridas em agosto de 2011 (Figura 6). As duas bacias em análise localizam-se sobre uma região fortemente urbanizada da cidade de Manaus, e com a presença de grandes vias de circulação. A região com menor cobertura vegetal e de maior número de registros de inundações é no alto da bacia do Mindú, onde existe uma grande densidade habitacional com elevada vulnerabilidade ambiental e áreas em situação de emergência socioecológica (SCHOR e ALVES-GOMES, 2011).

Figura 6. Mapa de uso do solo urbano e cobertura da vegetação para a área em estudo. Composição Colorida: R(3) G(4) B(1).



Inundações em áreas urbanas são processos complexos, apesar dos fatores morfométricos serem utilizados como uma referência na análise de áreas suscetíveis à inundações, o grau de alteração antrópica em uma bacia hidrográfica urbana pode em alguns casos ter maior influência em relação aos atributos do terreno. Áreas verdes em cidades têm função importante na drenagem urbana por diminuir a velocidade do escoamento superficial. Devido ao elevado grau de urbanização destas bacias, a recuperação e criação de áreas verdes são iniciativas que podem reduzir os casos de inundação, uma vez que atualmente existem poucas áreas verdes preservadas nestas bacias, como por exemplo, o parque municipal do Mindú no médio curso desta bacia, e na região do alto curso do igarapé dos Franceses na área do Aeroporto Eduardo Gomes. Desta forma percebe-se que a relação entre o clima local, atributos morfométricos, ausência de vegetação e a compactação do solo urbano contribui de forma significativa para ocorrência de inundações bruscas nas margens dos igarapés de Manaus.

Considerando somente a configuração do terreno analisada por parâmetros morfométricos, foi possível verificar que ambas as bacias, Mindú e Franceses, possuem áreas naturalmente suscetíveis para ocorrer eventos de inundação. Por outro lado, a ocupação desordenada observada nessas bacias eleva o risco para a população, geralmente uma população carente. Desta forma, dados morfométricos em conjunto com dados sobre uso e cobertura do solo urbano podem auxiliar na produção de mapas de suscetibilidade à inundação, que constituem dado fundamental para auxiliar na prevenção e mitigação dos impactos ocasionados por estes eventos.

Mapas de suscetibilidade indicam áreas que devem ter mais atenção dos gestores públicos, principalmente em ações de mitigação, como na recuperação de áreas naturais ocupadas pela população, preservação de áreas verdes existentes, ou em obras de drenagem urbana. De forma complementar, dados como os aqui apresentados podem ser integrados a dados pluviométricos e hidrométricos, e com isso contribuir em sistemas de monitoramento, alerta ou alarme de inundações em áreas urbanas (SAUSEN e NARVAES, 2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um exemplo de uso integrado de dados morfométricos e registros da Defesa Civil na análise de áreas urbanas afetadas por inundação bruscas. Foi possível verificar em campo a qualidade na espacialização dos registros de inundação observados entre o período de 2005 a 2010 pela Defesa Civil de Manaus.

As principais características do relevo nas áreas onde ocorreram inundações são relacionadas à declividade do tipo suave ondulado, terrenos com curvatura vertical muito convexa que acarreta uma velocidade de escoamento baixa, curvatura horizontal muito convergente, onde o escoamento superficial tende a concentrar para um mesmo ponto, e nas áreas de baixa elevação. Adicionalmente a estas características morfométricas, áreas a montante e a jusante de ambas as bacias sofreram grandes alterações em sua cobertura natural, o que pode aumentar a suscetibilidade à inundações bruscas nessas áreas, principalmente nas cabeceiras das bacias.

Considerando somente os parâmetros morfométricos analisados, a bacia dos Franceses apresentou maior suscetibilidade natural à inundação, no entanto, devido ao elevado grau de alteração, a bacia do Mindú apresenta um risco maior a população. Assim, consideramos que este tipo de estudo pode ser aplicado em outras áreas urbanas, contribuindo na elaboração de planos de emergência, no zoneamento e na estimativa de prejuízos ambientais, sociais ou econômicos. Com base nas informações morfométricas das áreas afetadas sugere-se o desenvolvimento de mais pesquisas para produção de mapas de suscetibilidade e de risco a inundação em cidades Amazônicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo e Pesquisas do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro, a Secretaria Municipal de Defesa Civil do Município de Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Ministério do Meio Ambiente pela disponibilização dos dados espaciais, e a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo apoio ao projeto de iniciação científica PIB-E/0014/2014. Agradecemos a revisão do manuscrito feito por Édipo Henrique Cremon. Os autores agradecem aos revisores por suas críticas e sugestões que ajudaram a melhorar a qualidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R.; RIBEIRO, R.R. Inundações e Enchentes. In.: TOMINAGA, L. K. et al. (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 39-52.
- AMAZONAS (Estado). Defesa Civil Estadual. **Risco de Desastres Naturais em Manaus**. Manaus, 2013. 34 p.
- BRUBACHER, J.P.; OLIVEIRA, G.G.; GUASELLI, L.A. Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011. p. 1279- 1286.
- CARDOSO, C.A.; DIAS, H.C.T.; SOARES, C.P.B.; MARTINS, S.C. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v.30, n. 2, p. 241-248, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622006000200011>
- CASSIANO, K.R.M. **Análise geográfica de áreas de risco na bacia hidrográfica no igarapé do Mindú - Manaus (AM)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Florianópolis, SC: UFSC.
- CASSIANO, K.R.M.; COSTA, R.C. Análise geográfica de áreas de risco em bacias hidrográficas urbanizadas: a bacia do Mindú em Manaus (AM). **territorium**, v, 19, p. 155-160, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, Ed. da Universidade de São Paulo, 1974.

_____. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

COSTA, E.B.S.; SILVA, C.L.; SILVA, M.L. Caracterização Física de Bacias Hidrográficas na Região de Manaus – AM. **Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 46, p. 93-100, 2013.

COSTA, R.C. Áreas de Risco: processos da natureza e produção da sociedade. **Revista Geonorte**, v. 4, n. 4, p.89-104, 2012.

CRUZ, D.R.; CASSIANO, K.R.M.; COSTA, R.C. Áreas de Risco em Manaus: Inventário preliminar. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. 123, 2009.

CRUZ, D.R.; COSTA, R.C. Inundações em Bacias Hidrográficas Urbanas de Manaus – Comunidades Bairro União e N. S. de Fátima. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 4, p. 759-771, 2012.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999.

FLORENZANO, T.G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2008.

HORA, S.B.; GOMES, R.L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**, v. 21 n. 2, p. 57-75, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132009000200005>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de Geomorfologia da Amazônia Legal** - Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Março de 2009.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA - Banco de Dados Morfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 03 de março de 2015.

MASCARENHAS JÚNIOR, T.A.; SARAIVA, J.M.B.; AGUIAR, F.E.O. Comparação entre a normal climatológica de 1961-1990 e o período de 1991-2007 para a precipitação na cidade de Manaus – AM. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 5, p. 165-175, 2009.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MOLION, L.C.B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 107-117, 1987.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

OLIVEIRA, C.; PARADELLA, W.R. An Assessment of the Altimetric Information Derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. **Sensors**, v. 8, p. 3819-3829, 2008. <http://dx.doi.org/10.3390/s8063819>

PERUCCA, L.P.; ANGILIERI, Y.E. Morphometric characterization of del Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina. **Quaternary International**, v. 233, p. 81-86, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2010.08.007>

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J.E. A Global Assessment of the SRTM Performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>

SAUSEN, T.M.; NARVAES, I.S. Sensoriamento remoto para inundação e enxurrada. In SAUSEN, T.M.; LACRUZ, M.S.P. **Sensoriamento remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 119-148.

SECRETARIA DE DEFESA CIVIL DE MANAUS - SEMDEC; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapeamento das áreas de risco geológico da zona urbana de Manaus (AM)**. Manaus, 2012. 68 p.

SCHOR, T.; ALVES-GOMES, J.A. Vulnerabilidade socioecológica em Manaus. **Revista GEONORTE**, v. 1, n. 2, p. 57-78, 2011.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UN-ISDR) - **Living With Risk - A Global Review of Disaster Reductions Initiatives**. Geneva: Unated Nations, 2002.

WILFORD, D.J.; SAKALS, M.E.; INNES, J.L.; SIDLE, R.C.; BERGERUD, W.A. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. **Landslides**, v. 1, p. 61-66, 2004. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>

VALERIANO, M.M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008a. p. 72-104.

_____. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008b. 72 p.

VEIGA, A.M.; SANTOS, C.C.P.; CARDOSO, M.R.D.; LINO, N.C. Caracterização hidromorfológica da bacia do rio Meia Ponte. **Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 46, p. 126-138, 2013.