

Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias

Wagner Fernando Silva¹
Gustavo Souto Fontes Moller¹
Marcio Bomfim Pereira Pinto¹
Geraldo José Lucatelli Doria de Araújo Júnior¹

¹ Agência Nacional de Águas - ANA
Setor Policial, área 5, quadra 3, blocos B, L, M e T – CEP 70610-200 - Brasília - DF, Brasil
{wagner.silva, gustavo.moller, marcio.bomfim, geraldo.lucatelli}@ana.gov.br

Abstract. In this study, the HAND (Height Above the Nearest Drainage) algorithm was applied to ASTER-GDEM and SRTM data in order to determine susceptible flood areas at Paraíba do Sul river basin. The four class (waterlogged, ecotone, slope, plateau) proposed by the algorithm's authors were compared with inundation areas delimited by hydrologic-hydraulic model at various recurrence times. An alternative synthetic hydrography was applied to the algorithm, ensuring equality between its streams and the reference hydrography. HAND proved to be a promising method for indicating susceptible flood areas. Most of the inundation area indicated by hydrologic-hydraulic model was superimposed by the waterlogged class. The ASTER-HAND had better contour of classes, but more confusion. The SRTM-HAND had a higher percentage of waterlogged class, but tended to overestimate the susceptible flood areas.

Palavras-chave: inundation, hydrology, hydrography, inundação, hidrologia, hidrografia, MDE, SRTM, ASTER

1. Introdução

Nos últimos anos, o governo brasileiro tem dado maior importância aos desastres causados por eventos extremos, investindo em a es mitigadoras e em pesquisas científicas sobre o tema. Essa importância tornou-se notória com a implanta o de dois grandes centros: o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, cuja missão   desenvolver, testar e implementar um sistema de previsão de ocorrência de desastres naturais, possibilitando indicar vulnerabilidades no uso e ocupa o do solo (CEMADEM, 2012); e o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD, cujo objetivo   possibilitar o gerenciamento de a es preventivas e de respostas, bem como mobilizar recursos humanos, materiais e equipamentos, evitando ou reduzindo danos e prejuízos   sociedade (CENAD, 2012).

De acordo com o Informe 2011 da Secretaria Nacional de Defesa Civil – SEDEC (<http://www.integracao.gov.br/solicitacoes-de-reconhecimento>) e dados da Agência Nacional de  guas - ANA (ANA, 2012a), o número de decretos de situa o de emergência e de estado de calamidade pública motivados por eventos críticos de cheia, ocorridos entre os anos de 2003 a 2011, totalizaram 4.392, divididos entre alagamentos, enchentes, enxurradas e inunda es.

A localiza o das áreas mais suscetíveis a eventos críticos de cheia   uma informa o essencial, tanto para o monitoramento eficiente desse tipo de desastre, quanto para o planejamento de a es de preven o e de melhor ocupa o e uso do solo. Nesta linha, técnicas e dados provindos de sensoriamento remoto, modelagem hidrológica e geoprocessamento contribuem de forma relevante na identifica o dessas áreas.

O modelo HAND - *Height Above the Nearest Drainage* ou Altura Acima da Drenagem mais Próxima utiliza a diferença entre a altitude extraída de Modelos Digitais de Eleva o - MDE e a rede de drenagem de referência para calcular alturas relativas, que possuem correla o com a profundidade do lençol freático e com a topografia do terreno (Rennó et al., 2008 e Nobre et al., 2011). Regiões com baixas alturas relativas (HAND) podem indicar regiões mais suscetíveis às cheias. A qualidade do modelo HAND gerado   diretamente proporcional   qualidade, precisão e representatividade de dois dados de entrada, o MDE e a hidrografia de referência, como foi destacado nos trabalhos de Pinheiro et al. (2009), Guarari et al. (2011) e Rodrigues et al. (2011).

Por outro lado, modelos hidráulicos-hidrológicos clássicos utilizam equações, séries históricas de chuva e vazão e podem simular o regime de rios em eventos de cheias, extraíndo perfis de linha d'água e áreas suscetíveis à inundação ao longo dos rios.

Este trabalho teve como objetivo analisar os dados provindos do modelo HAND visando à indicação de áreas suscetíveis à inundação em áreas urbanas, comparando com áreas inundáveis geradas por modelo hidráulico-hidrológico na bacia do rio Paraíba do Sul.

2. Metodologia de Trabalho

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul possui área de drenagem de 62.074 km², estendendo-se pelos estados de São Paulo - SP, Rio de Janeiro - RJ e Minas Gerais - MG (Figura 1). O rio Paraíba do Sul percorre 1150 km, passando por importantes cidades como Jacareí, São José dos Campos e Taubaté em SP; Resende, Volta Redonda e Campos dos Goytacazes no RJ até desaguar no oceano Atlântico no município de São João da Barra – RJ (CEIVAP, 2012). Essa bacia foi escolhida porque nela estão sendo desenvolvidos, pela ENGEORPS adjudicado pela ANA, estudos para concepção de um sistema de previsão de eventos críticos e de um sistema de intervenções estruturais para mitigação dos efeitos de cheias. No referido estudo, foram determinadas áreas inundáveis nas margens dos rios Paraíba do Sul, Paraíbauna, Pomba e Muriaé por meio de modelo hidráulico-hidrológico. Nesse trabalho serão utilizadas, como referência, as áreas inundáveis do rio Paraíba do Sul.

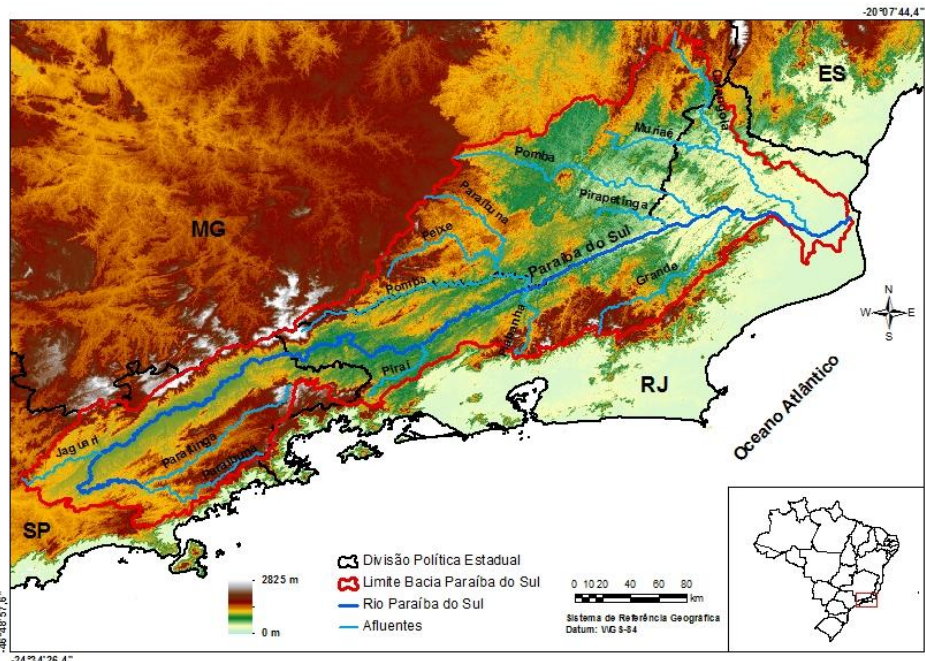


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica, do rio Paraíba do Sul e de seus principais afluentes, sobrepostos ao Modelo Digital de Elevação do SRTM.

As áreas inundáveis foram obtidas com a modelagem HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*). Dados de 109 estações pluviométricas foram empregados na obtenção de chuvas máximas diárias e interpolação por krigagem para toda a bacia, obtendo isoietas de máxima precipitação para os tempos de recorrência de 2, 10, 25, 50, 100 e 500 anos. A transformação chuva-vazão foi feito pelo método de Clark, considerando o diagrama tempo-área adimensional desenvolvido pelo HEC. A propagação da vazão foi simulada por modelo hidrodinâmico, incluindo uma componente de simulação da operação de reservatórios. Foram simuladas vazões referentes a cheias históricas e dos tempos de recorrência.

Em um SIG, o resultado da modelagem e um MDT, produzido com a fusão de seções topobatemétricas da calha dos rios e do ASTER-GDEM para o restante da bacia, foram utilizados para a determinação das áreas inundáveis para cada período de recorrência. Essas áreas foram interpretadas e editadas com base nas imagens do GoogleEarth e serão denominadas nesse

trabalho como curvas de recorrência e referidas como “tx”, em que x é o intervalo de tempo de recorrência. Todos os detalhes para a determinação das curvas de recorrência podem ser obtidos em ANA (2012b).

As etapas de pré-processamento para a geração do HAND, como descrito em Rennó et al., (2008) consistem inicialmente na correção de depressões/pixels espúrios, obtendo um MDE hidrológicamente coerente. Posteriormente, é obtido um arquivo matricial com as direções de fluxo. O próximo passo consiste em identificar a hidrografia de referência para obtenção das altitudes relativas.

Neste trabalho foram testadas duas abordagens de pré-processamento para geração do HAND, conforme fluxograma contido na Figura 2:

(1) correção de topologia do MDE, sugerido por Rennó et al., (2008), utilizando consistência topológica da direção de fluxo, excluindo e/ou alterando pixels incoerentes. Hidrografia sintética de referência (HIDRO-1), extraída com base em limiar de área de drenagem aplicado ao raster de fluxo acumulado, produto da direção de fluxo.

(2) correção do MDE por afundamento com uma hidrografia vetorial de referência na escala 1:50.000, da Agência Nacional de Águas, e posterior correção de depressões, conforme Araújo Júnior et al. (2011). Utilização de nascentes, extraídas da hidrografia de referência, como marco inicial da drenagem e o modelo de direção de fluxo para obter a hidrografia sintética de referência (HIDRO-2).

Após análise visual das hidrografias sintéticas HIDRO-1 e HIDRO-2, a que apresentou melhor correspondência com as imagens Geocover 2000 e as curvas de recorrência, foi utilizada para cálculo das altitudes relativas, gerando o modelo HAND. O modelo consiste em um arquivo matricial onde todas as drenagens possuem cota zero e a altura representada em cada pixel é a diferença relativa entre a altitude do ponto/pixel e drenagem mais próxima.

Na geração do HAND foram testados dois MDE, o ASTER GDEM com resolução de 1 arco-segundo (~30m) (<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/>) e o SRTM com resolução de 3 arco-segundo (~90m) (Habus et al., 2003).



Figura 2. Fluxograma comparativo entre as metodologias para geração do HAND.

Os modelos ASTER-HAND e SRTM-HAND foram classificados semelhantemente às classes estabelecidas por Rennó et al., (2008) e Nobre et al., (2011): i) ≤ 5 m \rightarrow baixo, áreas alagadas ou suscetíveis à alagamento; ii) 6 a 15 m \rightarrow áreas de transição ou de ecótono; iii) 16 a 50 m \rightarrow encostas e iv) > 50 m \rightarrow topo de morro. Devido o trabalho não ter foco em riscos de deslizamentos, a declividade não foi utilizada na definição das duas últimas classes.

Os modelos HAND foram analisados visualmente e por meio da extração de seus dados (recorte), tendo como base os vetores das curvas de recorrência.

3. Resultados e Discussão

A Figura 3 ilustra as hidrografias sintéticas HIDRO-1 e HIDRO-2 sobrepostas ao MDE-ASTER e ao Geocover. A HIDRO-2 teve melhor correspondência com o percurso real dos rios, motivado pela imposição do trajeto dos rios pelo afundamento com a hidrografia de referência. Essa correspondência é essencial para a correta indicação das áreas suscetíveis à inundação.

Como foi descrito anteriormente, a HIDRO-1 foi extraída com base na direção de fluxo do MDE e corresponde aos pixels com menores valores/altitude. Entretanto, os MDE ASTER e SRTM apresentam imprecisões relativas no valor altimétrico (Miceli et al., 2011), o que faz que os pixels de menor altitude e consequentemente a hidrografia resultante não coincidam com o percurso real dos rios em trechos com baixa declividade. Além disso, a densidade de trechos da HIDRO-1 é dependente de um limiar, o qual não deve ser o mesmo para toda localidade, pois a densidade é inerente à morfologia do terreno (Pinheiro et al., 2009).

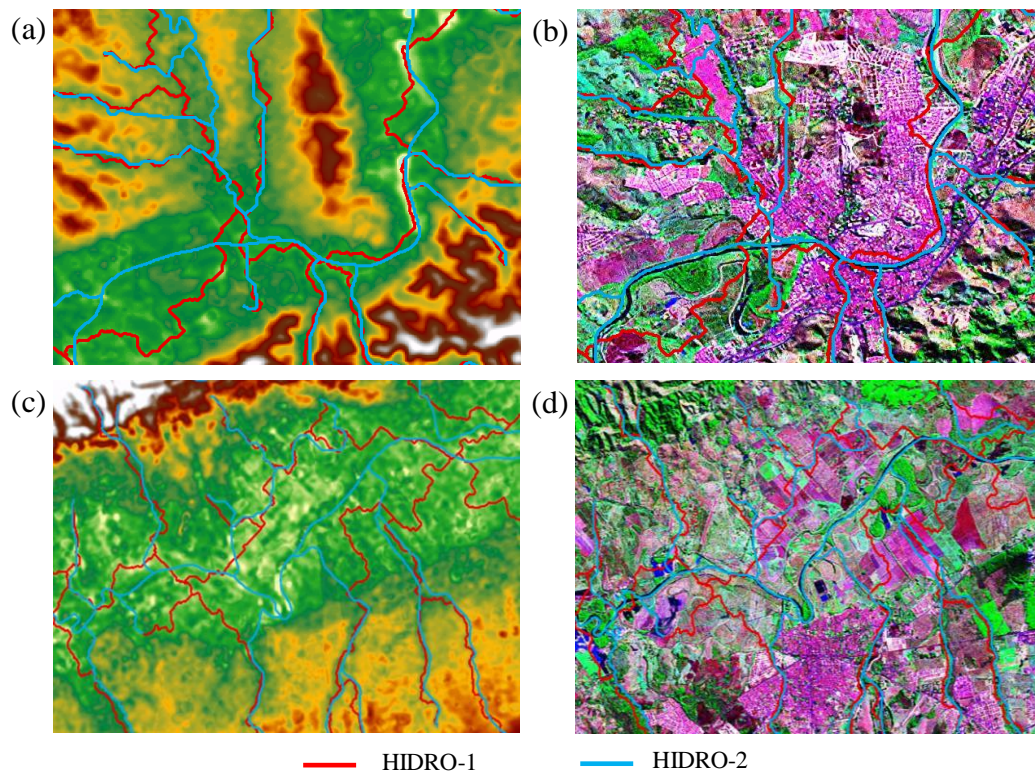


Figura 3. Imagens ASTER GDEM (a, c) e Geocover (b, d) sobrepostas pelas hidrografias sintéticas HIDRO-1 e HIDRO-2.

Por outro lado, por não coincidir com os pixels mais baixos do MDE, a HIDRO-2 acarretou em valores negativos de HAND, os quais devem ser tratados com algum critério, como o uso de máscara das massas d'água. Nesse trabalho, após verificar que esses valores ocorreram nas margens e dentro de rios, eles foram considerados como uma inversão do minuendo e do subtraendo na operação de subtração dos valores do MDE, e portanto, considerou-se o módulo da diferença para a geração do HAND.

A Figura 4 ilustra parte dos MDE-ASTER e MDE-SRTM e os correspondentes modelos HAND divididos em classes. Há boa correspondência entre o relevo e as classes HAND. Visualmente, os modelos HAND são semelhantes, mas há melhor definição e suavização dos contornos das classes no ASTER-HAND por causa do menor tamanho de pixel. Em algumas pequenas áreas é possível verificar a não correspondência entre as classes dos dois modelos, o que foi ocasionado pela diferente precisão altimétrica relativa (Miceli et al., 2011). A não correspondência é bem visualizada na classe Ecótono, que ocorre em algumas áreas do ASTER-HAND, mas não no SRTM-HAND.

As Tabelas 1a e 1b contêm, respectivamente, a frequência dos valores (pixels) do ASTER-HAND e do SRTM-HAND extraídos com as curvas de recorrência, referentes a 23 áreas urbanas das margens do rio Paraíba do Sul. Nessa análise, os valores 0 foram excluídos por representarem áreas que estão no mesmo nível da água. O número total de pixels contido em cada classe aumentou com o aumento do tempo de recorrência para os dois modelos, consequência do aumento da área inundada. Entretanto, não houve uma relação direta entre as classes HAND e os tempos de recorrências, por exemplo, um decréscimo diretamente proporcional da classe Baixo e

um crescimento diretamente proporcional da classe Ecótono com o aumento do tempo de recorrência, o que indicaria que as áreas da segunda classe poderiam ser inundadas com um tempo de recorrência maior. A maior frequência de pixels ocorreu para a classe 1 a 5 (Baixio) e decresceu para as classes mais altas, chegando a quase irrepresentatividade na última classe. Esse comportamento teve maior ênfase no SRTM-HAND, indicando que esse modelo delimitou mais áreas suscetíveis à inundação do que o ASTER-HAND.

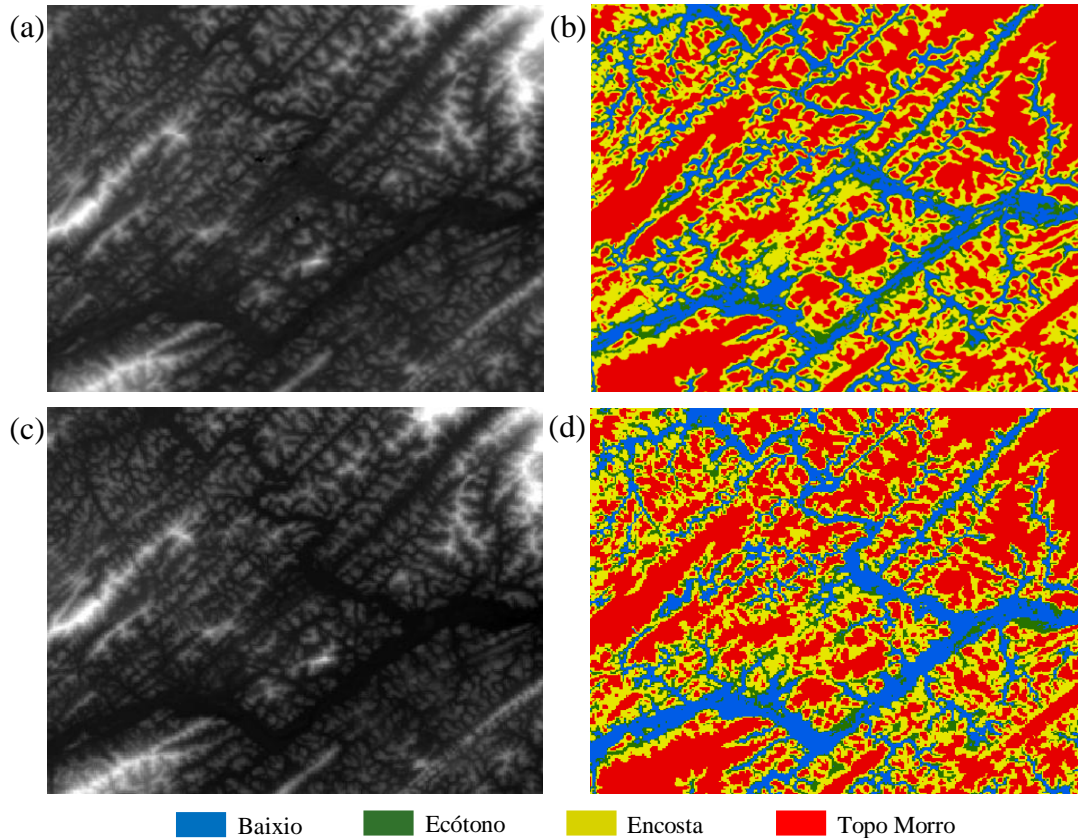


Figura 4. Imagens MDE-ASTER (a), ASTER-HAND (b), MDE-SRTM (c) e SRTM-HAND (d), da confluência dos rios Paraíba do Sul e Pombo.

Tabela 1. Frequência dos valores (pixels) do ASTER-HAND (a) e SRTM-HAND (b) extraídos com as curvas de recorrência determinadas com a modelagem hidráulica-hidrológica.

(a)	t2		t10		t25		t50		t100		t500	
Classes	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)
HAND												
1 a 5	11788	79,96	29170	62,53	41826	57,81	61568	57,77	63587	57,47	68267	56,12
6 a 15	2283	15,49	13930	29,86	22819	31,54	35205	33,03	36946	33,39	41500	34,12
16 a 50	671	4,55	3548	7,61	7704	10,65	9737	9,14	10056	9,09	11776	9,68
> 50	0	0,00	3	0,01	8	0,01	59	0,06	59	0,05	97	0,08
Total	14742		46651		72357		106569		110648		121640	

(b)	t2		t10		t25		t50		t100		t500	
Classes	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)	Frequência	(%)
HAND												
1 a 5	1097	80,48	3697	82,16	5706	81,29	8471	82,05	8735	81,45	9486	79,92
6 a 15	240	17,61	739	16,42	1176	16,75	1678	16,25	1798	16,76	2121	17,87
16 a 50	26	1,91	64	1,42	137	1,95	175	1,70	192	1,79	258	2,17
> 50	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	4	0,03
Total	1363		4500		7019		10324		10725		11869	

Como pode ser visto nas Figuras 5a e 5c, a composição porcentual das classes HAND nas diversas curvas de recorrência é semelhante para um mesmo modelo, com exceção da t2 do ASTER-HAND que teve porcentagem da classe Baixio maior que as outras curvas, o que condiz com a realidade, uma vez que essas áreas inundam com maior frequência. A inclinação das linhas nas Figuras 5b e 5d indicam o acréscimo do número de pixels nas classes a cada curva de

recorrência. Para o ASTER-HAND as classes Baixo e Ecótono crescem semelhantemente, enquanto que para o SRTM-HAND a classe Baixo tem um acréscimo mais acentuado do que todas as outras classes, sendo que para os dois modelos o acréscimo é maior até a curva t50. O acréscimo nas curvas t100 e t500 é menor, indicando menor acréscimo de área inundada, o que foi diretamente influenciado pela topografia do terreno.

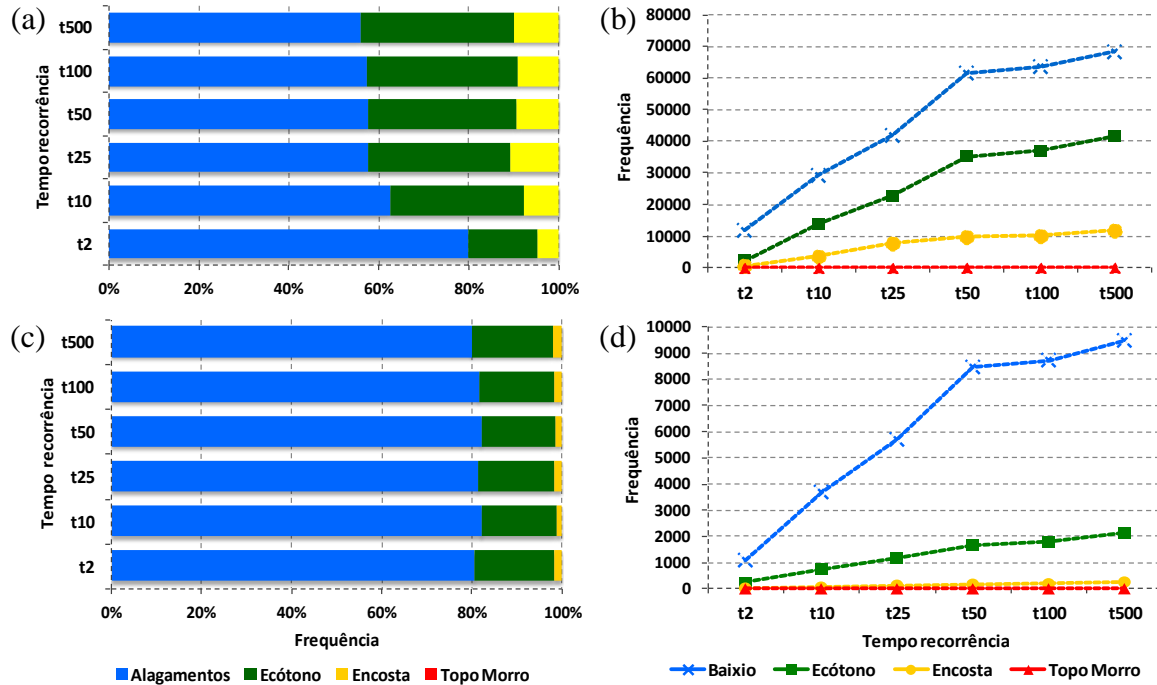


Figura 5. Composição percentual e acréscimo de pixels nas classes dos modelos ASTER-HAND (a, b) e SRTM-HAND (c, d), com base nas curvas de recorrência.

A Figura 6 ilustra, para algumas áreas urbanas, a comparação entre a delimitação das áreas suscetíveis à inundação pelo modelo hidráulico-hidrológico e pelos modelos ASTER-HAND e SRTM-HAND. Na Figura 6.1, grande parte da área urbana de Cachoeira Paulista, nas duas margens do rio, foi indicada como inundável a partir da curva t10. A suscetibilidade à inundação teve indicação semelhante nos dois modelos HAND, para os quais a classe Baixo compôs a maior área entre as curvas, exceto algumas bordas que foram inseridas na classe Ecótono, consequência do rápido aumento da declividade, o que é corroborado pela proximidade das curvas de recorrência. Entretanto, o ASTER-HAND (Figura 6.1b) teve melhor contorno e detalhes por causa da maior resolução espacial.

A área urbana de Guaratinguetá suscetível à inundação foi crescente a partir da curva t10 (Figura 6.2). Para esse município, o ASTER-HAND mostrou muita confusão, muitas áreas entre as curvas foram inseridas em classes HAND mais altas, principalmente na parte norte da cidade (Figura 6.2b). Por outro lado, o SRTM-HAND indicou quase a totalidade da área delimitada pelas curvas como Baixo, tendo melhor indicação das áreas suscetíveis à inundação, mas sem fazer distinção ou relação entre as classes e os tempos de recorrência.

A Figura 6.3 ilustra as áreas suscetíveis à inundação na área urbana de Volta Redonda. Há áreas na curva do rio à esquerda, sentido de fluxo sul-norte, que são inundáveis com tempo de recorrência de dois anos - t2. Outras áreas a montante e a jusante deste ponto tem suscetibilidade a partir da curva t10 ou t50 (Figura 6.3a). Para esse município, o modelo ASTER-HAND teve melhor delimitação das áreas suscetíveis, porém algumas áreas localizadas na margem direita foram incluídas erroneamente na classe Ecótono a partir da curva t50. O SRTM-HAND superestimou a área suscetível, incluindo na classe Baixo muitas áreas externas às curvas. A ilha e áreas adjacentes não foram bem delimitadas por nenhum dos modelos. Pelo modelo hidráulico-hidrológico, apenas a parte sul da ilha foi indicada como suscetível a partir da curva t25. Entretanto, o SRTM-HAND incluiu toda ilha na classe Baixo. Além disso, toda área do aeroporto

e adjacentes também foram incluídas nessa classe. O ASTER-HAND incluiu erroneamente grande parte da ilha na classe Baixo e adjacências à classe Ecótono. Esses erros foram consequência da limitação da precisão altimétrica relativa dos modelos e da representação unifilar da hidrografia que prejudica a caracterização de ilhas.

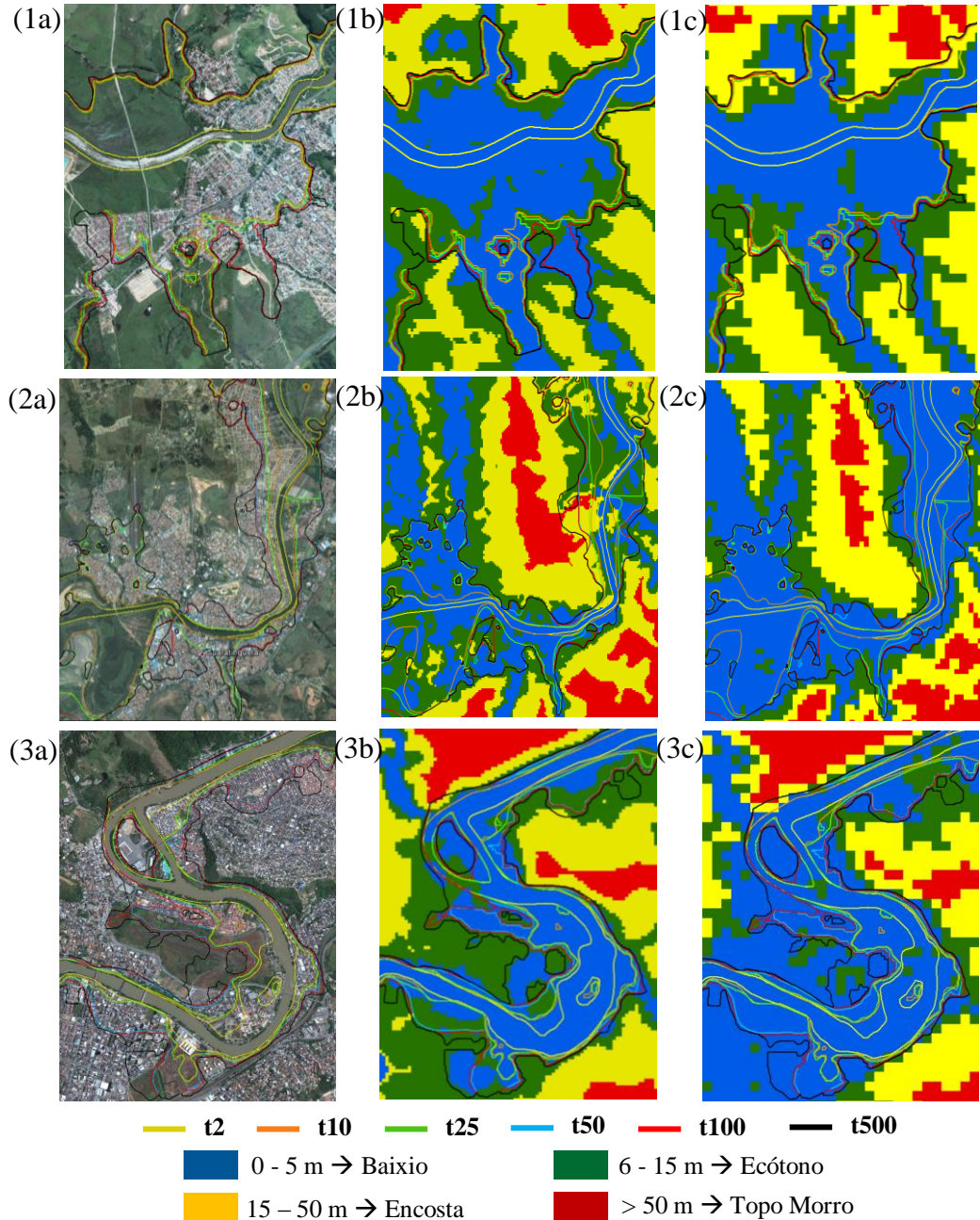


Figura 6. Indicação e comparação das áreas suscetíveis à inundação pelas curvas de recorrência determinadas por modelo hidráulico-hidrológico em imagens do Google Earth (a), no ASTER-HAND (b) e no SRTM-HAND (c), para os municípios de Cachoeira Paulista – SP (1), Guratinguetá – SP (2) e Volta Redonda – RJ (3).

4 – Conclusões

O modelo HAND mostrou ser um método promissor na indicação de áreas suscetíveis às cheias. Não foi possível fazer uma relação direta entre as classes HAND e as curvas dos diversos tempos de recorrência obtidas pelo modelo hidráulico-hidrológico. Entretanto, a maior porcentagem da classe indicadora de inundação foi incluída nos limites das curvas.

O afundamento do MDE com a hidrografia de referência garantiu o traçado da hidrografia sintética mais consistente com as imagens Geocover, utilizadas como referência. O ASTER-

HAND mostrou melhor delimitação/contorno das classes por causa do menor tamanho de pixel. Porém, teve maior confusão entre as classes, principalmente na Ecótono. O SRTM-HAND teve maior porcentagem da classe Baixo dentro das curvas, porém tendeu a superestimar a área suscetível à cheias.

Estudos mais detalhados devem ser realizados a fim de melhorar a delimitação das áreas suscetíveis, como o uso de MDE e hidrografia mais precisos, uso de máscara de massa d'água, dados de declividade e agregação de informações reais de cheias providas do CENAD e CEMADEN.

5 – Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Águas – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012**. Ed. Especial, Brasília: ANA, 2012. 215p.

Agência Nacional de Águas – ANA. **Elaboração de estudos para concepção de um sistema de previsão de eventos críticos na bacia do rio Paraíba do Sul e de um sistema de intervenções estruturais para mitigação dos efeitos de cheias nas bacias dos rios Muriaé e Pomba e investigações de campo correlatas**. R05 – Estudos e modelagem de cheias, previsão de vazões e estudos relacionados. Brasília: ENGECORPS, 2012. 153 p. Tomo I, vol. 1 (1069-ANA-RPS-RT-017).

Araújo Júnior, G. J. L. D.; Pinto, M. B. P; Trigo, A. J; Prado, A.; Teixeira, A. A.; Ferreira, F. V.; Borelli, A. J.; Silva, M. A.; Scherer-Warren, M.; Godinho, J. M. Metodologia de delimitação de áreas de drenagem por trecho de curso d'água coincidente com a cartografia em diferentes escalas utilizando modelo digital de elevação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15. 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 1256 – 1262.

CEMADEN – **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/missao.php>>. Acesso em 05 out. 2012.

CENAD – **Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres**. Disponível em: <<http://www.defesacivil.gov.br/cenad/index.asp>>. Acesso em 05 out. 2012.

CEIVAP – **Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul**. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/bacia_1_2.php>. Acesso em 23 out. 2012.

Gharari, S.; Hrachowitz, M.; Fenicia, F.; Savenije, H. H. G. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 3275 - 3291, 2011.

Miceli, B. S.; Dias, F. M.; Seabra, F. M.; Santos, P. R. A.; Fernandes, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/01, p. 191- 201, 2011.

Nobre, A. D.; Cuartas, L. A.; Hodnett, M. G.; Rennó, C. D.; Rodrigues, G.; Silveira, A.; Waterloo, M.; Saleska, S. 2011. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, n. 404, p. 13 - 29, 2011.

Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. The Shuttle Radar Topographic Mission – A New Class of Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57 (4), p. 241- 262, 2003.

Rennó, C. D.; Nobre, A. D.; Cuartas, L. A.; Soares, J. V.; Hodnett, M. G.; Tomasella, J.; Waterloo, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469 – 3481, 2008.

Rodrigues, G. O.; Nobre, A. D.; Silveira, A. C.; Cuartas, L. A. Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) – estudo de caso em Manaus/AM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15. 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 5769 - 5776.

Pinheiro, T. F.; Rennó, C. D.; Escada, M. I. S. Utilização de um novo algoritmo descritor de terreno para o mapeamento de ambientes de terra firme na Amazônia 2009. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14. 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 6069 - 6076.