

## NOTA TÉCNICA PARA ELABORAÇÃO DE MODELAGENS DE INUNDAÇÃO

Raimundo Almir Costa Conceição

Patrícia Mara Lage Simões

### 1. OBJETIVO

Orientar os usuários quanto aos procedimentos relativos à modelagem de inundação implementada nas Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações elaboradas pelo Serviço Geológico do Brasil - SGB, em atendimento às diretrizes específicas da Lei 12.608/2012 (BRASIL, 2012) que rege a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC)

### 2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os processos de inundação envolvem grande complexidade, uma vez que englobam diversos parâmetros pertencentes aos aspectos topográficos e hidrológicos de uma determinada região. Para modelar e estimar o alcance de uma mancha de inundação, podem ser utilizados diversos métodos e variáveis, onde destacam-se as variáveis topográficas e hidrológicas.

No âmbito das Cartas de Sustentabilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações, que têm a perspectiva de subsidiar a prevenção de desastres naturais, entende-se que a suscetibilidade estaria associada às condições naturais do terreno que favorecem a elevação do nível d'água no canal de drenagem com transbordamento, atingindo as planícies aluviais e os terraços fluviais (BITAR, 2014), logo os aspectos hidrológicos, relativos a períodos de retorno de chuva, volume hídrico e afins não serão abordados, pois são conceitos que têm maior relação com os temas Perigo e Risco.

Portanto, as orientações para elaboração da modelagem de inundação, refletem a utilização de dados essencialmente topográficos, culminando em um modelo estático da mancha de inundação, o qual não infere condições temporais e hidrológicas.

### 3. MATERIAIS UTILIZADOS

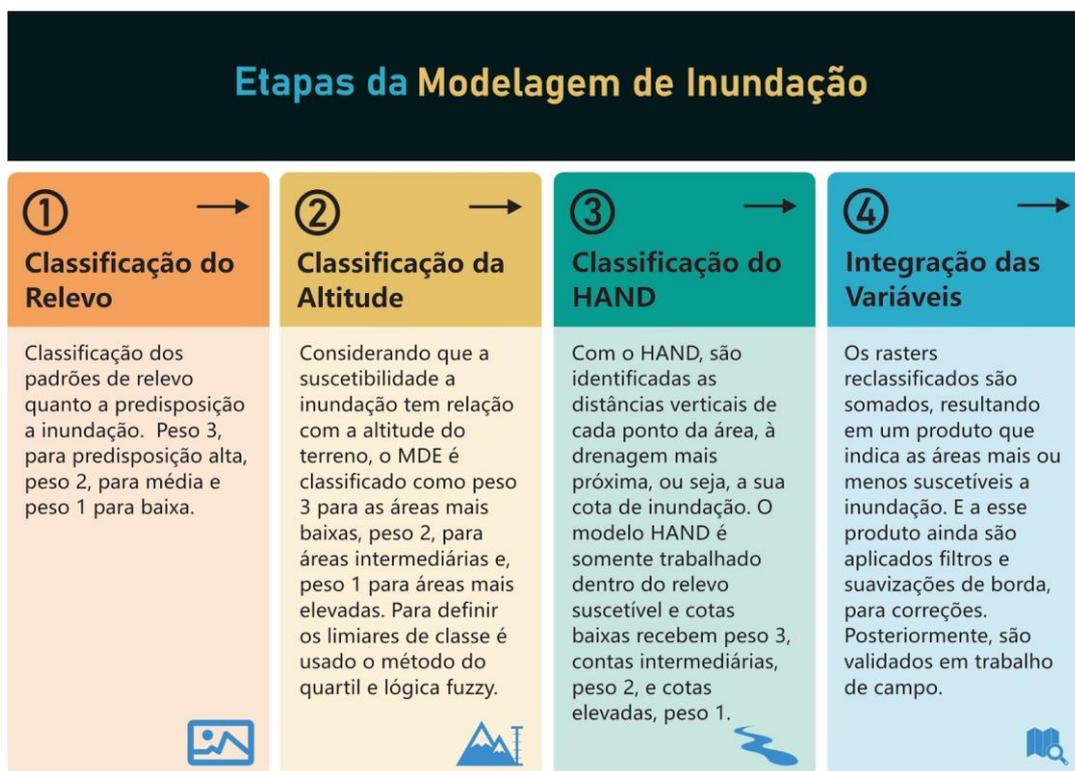
O modelo de inundação exige a entrada de dois tipos de dados:

(I) - Dados derivados de Modelos Digitais de Elevação (MDE) na melhor qualidade disponível. Para municípios onde não há modelos de elevação em alta resolução, geralmente adotam-se os dados SRTM utilizados na correção radiométrica das imagens ALOS PALSAR RTC, pré-processados pela *Alaska Satellite Facility*, com resolução espacial de 12,5 m (ASF, 2015).

(II) - Mapeamento dos padrões de relevo em escala adequada ao projeto (1:25.000). Este dado é fornecido pela equipe de geomorfologia do SGB. Na região amazônica, o mapeamento do relevo pode ser feito em escala 1:50.000, devido a qualidade dos MDE's disponíveis.

## 4. METODOLOGIA

A metodologia de modelagem a inundações adotada nas Cartas de Suscetibilidade passou por atualização e atualmente consiste na combinação de três variáveis: **relevo**, **altitude** e **distância vertical à drenagem mais próxima**. Esta última dada pelo modelo normalizado de terreno, denominado HAND - *Height Above the Nearest Drainage* (RENNÓ et al., 2008). Os procedimentos de geração da modelagem que comporá o mapa pré-campo de suscetibilidade, consiste em quatro etapas (**Figura 1**), demonstradas a seguir.



**Figura 1** – Fluxograma das quatro etapas de execução da análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a inundações.

### 4.1. Classificação dos Padrões de Relevo

O mapeamento do relevo é uma das etapas do Projeto Cartas de Suscetibilidade e é executado pela equipe de geomorfologia do SGB, através de fotointerpretação de imagens de satélite, auxiliada por produtos derivados de Modelos Digitais de Elevação (MDE), como hipsometria, curvas de nível, declividade e relevo sombreado.

A fotointerpretação segue a compartimentação geomorfológica proposta por DANTAS (2020), no escopo da Biblioteca de Padrões de Relevo criada especificamente para o Projeto, a partir de um desdobramento da Biblioteca de Padrões de Relevo do Programa Geodiversidade do Brasil. Basicamente, essas bibliotecas são uma reunião de mais de duas décadas de conhecimentos acumulados sobre o mapeamento do relevo brasileiro, feito em diferentes escalas, pelo SGB, desde 1997.

A modelagem de inundações se utiliza dessa biblioteca de padrões para identificar quais são os relevos mais suscetíveis, e a eles atribuir pesos, os quais indicam a predisposição ou potencialidade do processo de inundações (**Tabela 1**). As planícies, em geral, receberam **peso 3**, devido a sua alta suscetibilidade a inundações pois estão localizadas às margens dos canais de drenagem, são extremamente hidromórficas, e funcionam como uma área natural de extrapolação das águas do canal principal, em casa de chuvas intensas.

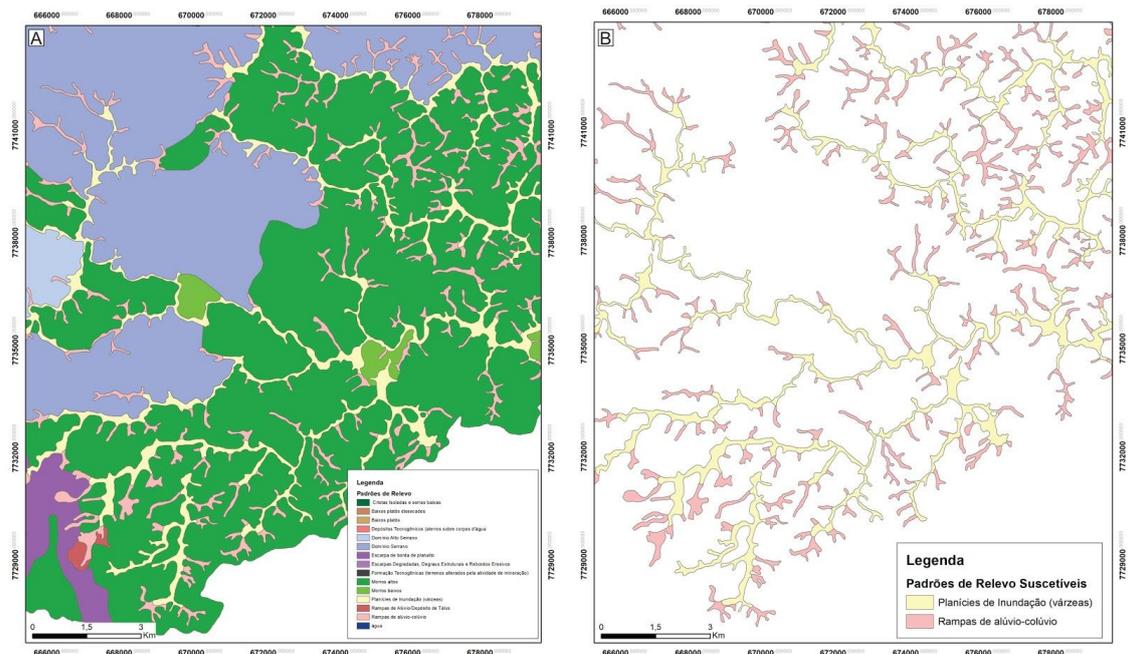
As baixadas alúvio-coluvionares e as feições cársticas recebem **peso 2**, pois apresentam características morfológicas que as enquadram como intermediárias diante a possibilidade de ocorrer inundação. As baixadas alúvio-coluvionares situam-se em uma posição altimétrica, um tanto quanto mais elevada do relevo, frequentemente, localizadas entre as planícies litorâneas e colinas. Já as feições cársticas, devido sua gênese marcada pela formação de condutos subterrâneos interligados com a superfícies por morfologias específicas deste ambiente, apresentam uma suscetibilidade a inundação muito específica e variada de acordo com o estágio desses processos em cada localidade.

Já os terraços de modo geral, rampas de alúvio-colúvio e depósitos tecnogênicos admitem **peso 1**, já que se localizam em uma posição mais elevada do relevo, só sendo atingidos por eventos hidrológicos, esporádicos, em condições de chuvas extremamente intensas. Na **Figura 2**, observam-se os padrões de relevo e os padrões de relevo suscetíveis a inundações no município de Mariana, MG. É importante ressaltar que o relevo fotointerpretado é validado em atividade de campo. Em caso de alterações, a modelagem também é modificada.

O produto dessa classificação é um raster onde, os pixels referentes as planícies de inundação recebem peso 3 e as rampas de alúvio e colúvio, peso 1.

**Tabela 1** – Classificação de suscetibilidade à inundação das classes de padrões de relevo.

<b>Padrões de Relevo</b>	<b>Código</b>	<b>Suscetibilidade</b>	<b>Peso</b>
Planícies de Inundação	R1a	Alta	3
Terraços Fluviais	R1b1	Baixa	1
Terraços Lagunares	R1b2	Baixa	1
Terraços Marinhos	R1b3	Baixa	1
Baixadas Alúvio-Coluvionares	R1b4	Média	2
Rampas de Alúvio-Colúvio	R1c1	Baixa	1
Recifes	R1g	Alta	3
Leques Aluviais	R1c3	Média	2
Planícies Fluviomarinhas (mangues)	R1d1	Alta	3
Planícies Fluviomarinhas (campos salinos ou apicum)	R1d1a	Alta	3
Planícies Fluviomarinhas (brejos)	R1d2	Alta	3
Planícies Fluvioacustres (brejos)	R1d3	Alta	3
Planícies Fluviodeltaicas (brejos)	R1d4	Alta	3
Planícies Lagunares (brejos)	R1d5	Alta	3
Planícies de Maré Lamosas (coroas de lama)	R1d6a	Alta	3
Planícies de Maré Arenosas (barras arenosas)	R1d6b	Alta	3
Planícies Marinhas (restingas)	R1e	Alta	3
Depósitos Tecnogênicos (aterros sobre corpos d'água)	R1h1	Baixa	1
Feições Cársticas (dolinas, uvalas, poliés, sumidouros)	R5a	Média	2



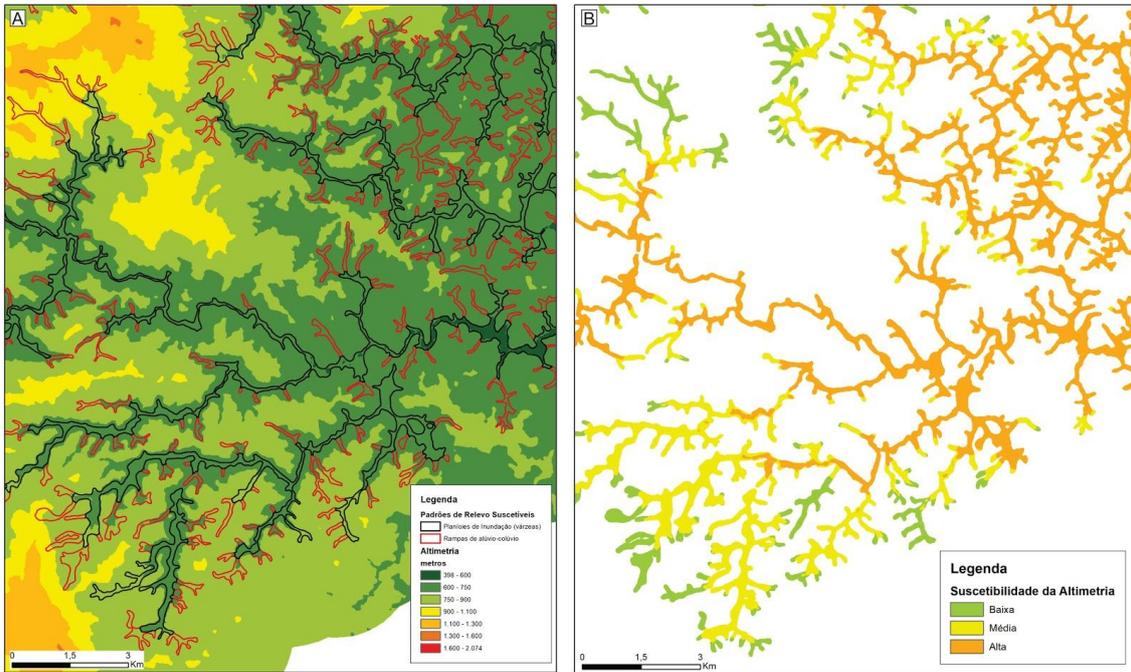
**Figura 2** – (A) Padrões de relevo extraídos através de fotointerpretação de imagens óticas. (B) Padrões de relevo suscetíveis a inundações utilizados na modelagem.

## 4.2. Classificação da Altitude

A altitude é uma das variáveis mais importantes na identificação da suscetibilidade e do risco a inundações. Assim como a declividade, uso da terra, e precipitação, a altitude influencia no nível de água alcançado por uma inundação (SANTOS et al, 2010), pois quanto menor a altitude, maior a tendência de inundação em uma determinada região devido à ação da lei da gravidade que direciona a água para as regiões mais baixas.

Na modelagem de inundação, a informação de altitude é extraída diretamente do MDE previamente recortado pelos Padrões de Relevo suscetíveis à inundação. Utilizando o algoritmo de Lógica Fuzzy, com classe MSSsmall (os valores menores tendendo a uma associação mais próxima de 1), os valores de altitude são classificados em uma escala de 0 - 1, em que os mais próximos a 1 tendem a pertencer a áreas mais baixas, portanto, inundáveis. Posteriormente, o dado é reclassificado para escala de 1 a 3, utilizando o método do Quartil.

O resultado é um raster onde as áreas mais baixas recebem peso 3, devido a sua alta suscetibilidade à inundação. Áreas intermediárias admitem peso 2 e áreas elevadas, peso 1, devido à baixa suscetibilidade (**Figura 3**).

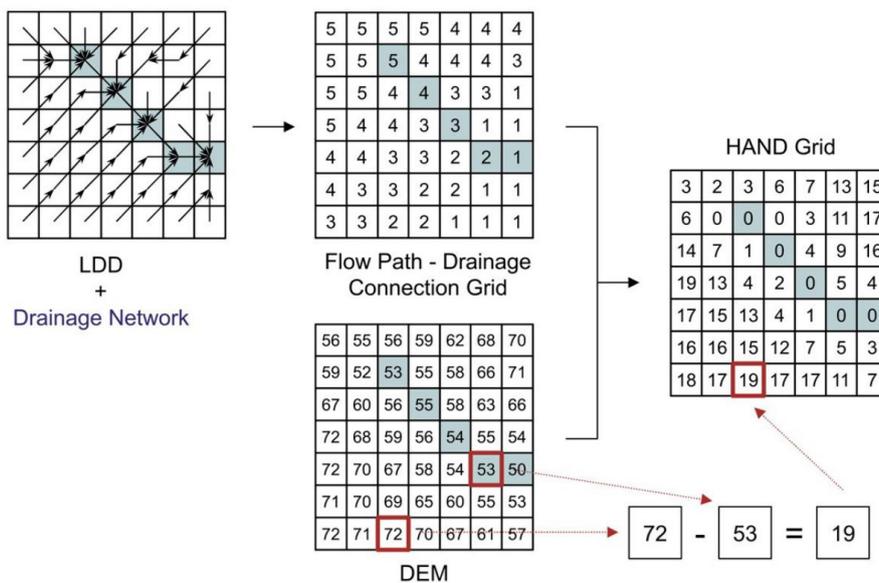


**Figura 3** - (A) Altimetria sob os limites do relevo suscetível à inundação. (B) Altimetria classificada de acordo com a suscetibilidade a inundações e recortada pelos padrões de relevo suscetíveis.

### 4.3. Classificação da Distância a Drenagem Mais Próxima - HAND

A variável mais relevante em cálculos de modelos hidrostáticos é a cota de inundação de uma determinada área. A identificação desta cota pode ser dada pelo modelo HAND - *Height Above the Nearest Drainage*.

Elaborado por RENNÓ et al. (2008), o HAND calcula a altura acima da drenagem mais próxima, utilizando a diferença entre a altitude extraída de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e a rede de drenagem de referência para calcular alturas relativas, que possuem correlação com a profundidade do lençol freático e com a topografia do terreno (**Figura 4**). Dessa forma, regiões com baixa altura relativa tendem a ter maior suscetibilidade a inundações.

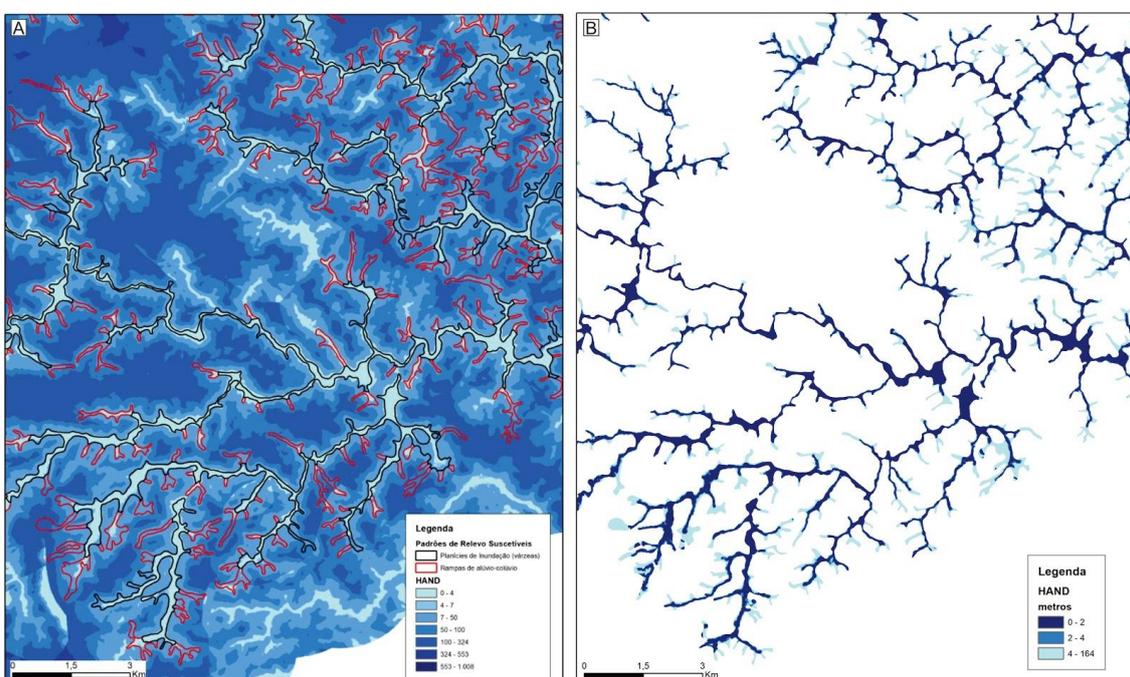


**Figura 4** - O modelo HAND identifica automaticamente a rede de drenagem e promove a subtração entre os valores dos pixels mais próximos e os correspondentes a drenagem. Fonte: RENNÓ et al. (2008).

Diversos trabalhos têm analisado e utilizado o modelo HAND como dado de entrada para realizar diversas comparações, modelagens de inundação estática e afins, obtendo bons resultados e afirmando que a qualidade do modelo é diretamente relacionada à qualidade do MDE (SILVA et al., 2013; PIRES e BORMA, 2013; NOBRE et al., 2015; MOMO et al., 2016; MILANESI et al., 2017; ZHENG et al., 2018; CONCEIÇÃO et al. 2019a; CONCEIÇÃO et al. 2019b; JOHNSON et al., 2019)

Na modelagem apresentada, o *HAND* é classificado, assim como as outras variáveis, em uma escala de 1 a 3, sendo que as áreas mais baixas (em relação a drenagem) recebem peso 3, por serem mais suscetíveis e as áreas mais altas, peso 1 (menos suscetíveis).

O limiar das classes é definido analisando os dados estatísticos do HAND e utilizando o método do Quartil. Neste método, a série de dados é dividida em quatro quartis, ou grupos, com mesma ocorrência, sendo cada um com 25% do total de valores de frequência dos dados (RAMOS & SANCHEZ, 2000). Os 2 primeiros quartis são classificados como peso 3. O 3º Quartil, admite peso 2 e o 4º Quartil, peso 1.



**Figura 5** - (A) Modelo HAND sob os limites do relevo suscetível. (B) HAND classificado de acordo com a suscetibilidade a inundações e recortada pelos padrões de relevo suscetíveis.

Ressalta-se ainda que, em modelos HAND elaborados a partir de MDE de baixa a média resolução, como SRTM, SRTM-ALOS/PALSAR e ASTER, não se admite limiar de peso 3 (alta suscetibilidade) com valor menor que 1, para preservar a acurácia do modelo. Logo, quando a soma dos 2 primeiros Quartis é menor que 1, o valor 1 é automaticamente atribuído.

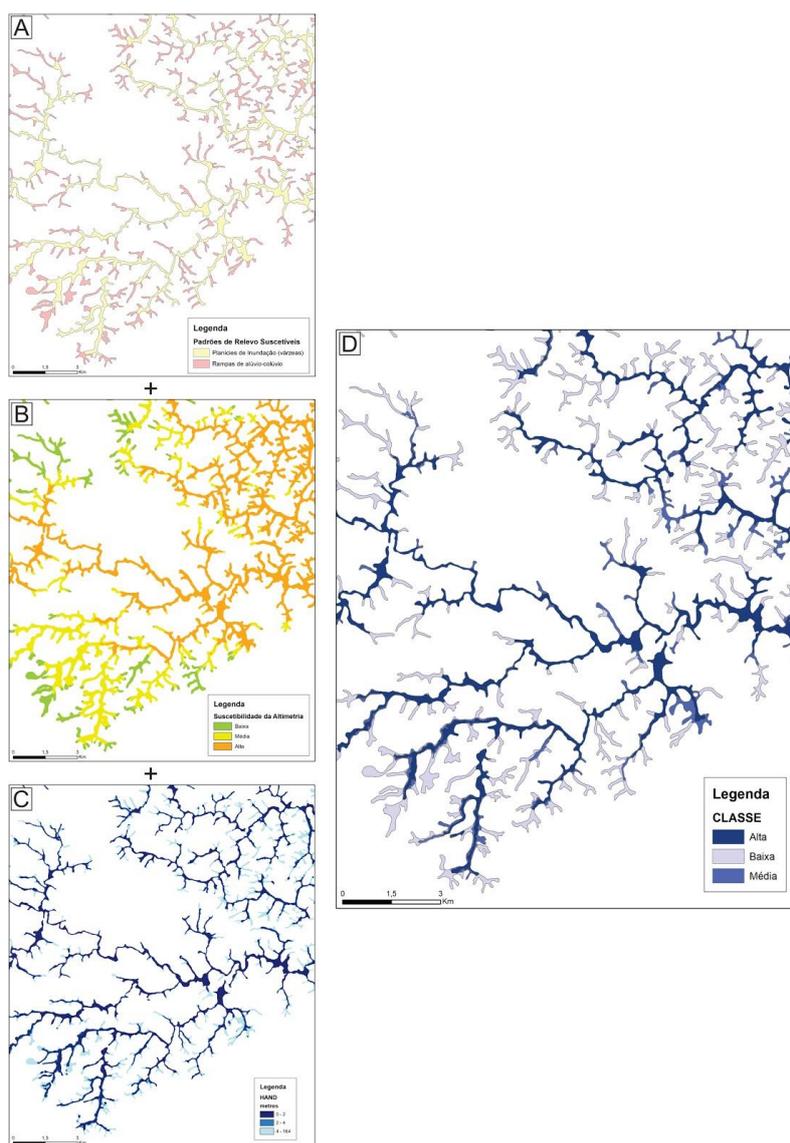
#### 4.4. Integração das variáveis suscetíveis

Nessa etapa as três variáveis reclassificadas (relevo suscetível, altitude suscetível e HAND) são somadas por álgebra de mapas, originando um raster com valores de 3 a 9. A esses valores são atribuídas as classes de suscetibilidade, como mostra a **Tabela 2**.

**Tabela 2** - Classificação da suscetibilidade a inundações, de acordo com o peso atribuído.

PESO	3	4	5	6	7	8	9
CLASSE	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Alta

A integração das variáveis (**Figura 6**) é essencial pois ela representa o acúmulo de suscetibilidades de diversas fontes, o que por si só, aumenta a qualidade do modelo resultante. Sendo tal integração, importante também para diminuir a superestimativa da inundação proveniente do modelo HAND, como demonstrado por NOBRE et al. (2015), em canais fora da área de inundação, os quais geralmente são canais de ordem 1, 2 ou 3 no método de Strahler, localizados às proximidades das cabeceiras de drenagem.



**Figura 6** - As variáveis suscetíveis: Relevô (A), Altitude (B) e HAND (C) são somadas para compor a modelagem pré-campo de inundação.

O modelo é então submetido a correções que filtram polígonos espúrios e suavizam os contornos das classes. Posteriormente, então, é validado em atividade de campo. Nos casos em que as classes não representem satisfatoriamente o contexto indicativo de suscetibilidade a inundações da região, o modelo é refeito, seguindo as orientações da equipe de campo.

## 5. CONSIDERAÇÕES

A modelagem de inundações representa uma simplificação da realidade, tendo em vista que existem inúmeras variáveis que influenciam nos processos de cheias, inundações e alagamentos. Dessa forma, não se recomenda utilizar o modelo, mesmo que validado em atividade de campo, para realizar análises que não são compatíveis com a escala de trabalho para o qual ele foi elaborado.

## 6. REFERÊNCIAS

ASF - Alaska Satellite Facility. (2015). Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products. **Product Guide**, revision 1.2. Fairbanks, Alaska: [s.n.]. Disponível em: <[https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc\\_product\\_guide\\_v1.2.pdf](https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf)>.

BITAR O. Y. (Coord.). (2014). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações-1:25.000: **Nota Técnica Explicativa**. 2014. São Paulo: IPT; Brasília, DF: CPRM (Publicação IPT 3016).

BRASIL. Câmara dos Deputados. Legislação Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres.

CONCEIÇÃO, A. R. C.; SIMÕES, P. M. L. (2019a) Modelagem de suscetibilidade a inundação utilizando processo analítico hierárquico (AHP) e lógico fuzzy. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIX**, 2019, Santos, Anais... Santos: INPE, 2019. P. 90-93.

CONCEIÇÃO, A. R. C.; SIMÕES, P. M. L.; DANTAS, M. E. (2019b) Using relief patterns and quartile deviation form modeling of flood susceptibility maps: examples from Presidente Kennedy and Conceição do Castelo, Espírito Santo, Brazil. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, v.2, p.75-86.

DANTAS, M. E., SHINZATO, E. D. G. A. R., RENK, J. F. C., MORAES, J. M., MACHADO, M. F., & NOGUEIRA, A. C. (2014). O emprego da geomorfologia para avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação—Mimoso do Sul/ES. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 4(2), 23-42.

DANTA, M. E. Biblioteca de Padrões de Relevô (Anexo II) In: ANTONELLI, T.; JESUS, D.; DANTAS, M. E.; SILVA, D. R. A. ; SILVA, S. F. (Org.) **Guia de procedimentos técnicos do Departamento de Gestão Territorial. Cartas municipais de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações (versão 1)** V.1. CPRM, 2020.

JOHNSON, J. M., MUNASINGHE, D., EYELADE, D., & COHEN, S. An integrated evaluation of the national water model (NWM) – height above nearest drainage (HAND) flood mapping methodology. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 19, n. 11, p. 2405-2420, 2019.

MENGUE, V. P. SCOTTÁ, F. C., SILVA, T. S., FARINA, F. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 1, p. 41, 2016.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L. DE; LAHM, R. A. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre / RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, p. 675–686, abr. 2017.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L. DE; LAHM, R. A. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre / RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 675–686, abr. 2017.

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; CUARTAS, L. A. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 200–208, 2016.

NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., MOMO, M. R. SEVERO, D. L., PINHEIRO, A., NOBRE, C. A. HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320–333, 2016.

PIRES, É. G.; BORMA, L. de S. Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrografias em ambiente de Cerrado. **Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1986, p. 6917–6922, abr. 2013.

RAMOS, C. Da S.; SANCHEZ, M. C. (2000). **Estudo Metodológico da Classificação de Dados para Cartografia**. **Geografia**, v. 25, n. 2, p. 23–52, ago.

RENNÓ C.D., NOBRE A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, 112 (9):3469-3481.

ROSS, J. L. S. - O registro cartográfico dos fatos Geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP**, n.º 6, 17-29, 1992.

SILVA, W. F., MOLLERI, G. S. F., PINTO, M. B. P., ARAÚJO JÚNIOR, G. J. L. D. Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR**, v. 16, 2013.

SANTOS, AR dos; LOUZADA, F. L. R. O.; EUGENIO, Fernando Coelho. **ARCGIS 9.3 total: aplicações para dados espaciais**. Alegre, ES: CAUFES, 2010.

ZHENG, X., TARBOTON, D. G., MAIDMENT, D. R., LIU, Y. Y., & PASSALACQUA, P. River channel geometry and rating curve estimation using height above the nearest drainage. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 4, p. 785-806, 2018.