

Uso da ferramenta HAND para a descrição do pulso de inundação na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM)

DANIEL SCHAFFER FERREIRA JORGE *

I. INTRODUÇÃO

1. Caracterização limnológica da planície de inundação da reserva de desenvolvimento sustentável Mamirauá

A bacia do Amazonas corresponde a maior bacia de drenagem do mundo, contemplando 7 países e mais de 6.8 milhões de km^2 (Neill et al., 2006). Aproximadamente 17% de sua bacia corresponde a áreas inundáveis (Hess et al., 2003), como mangues costeiros, regiões pantanosas de floresta aberta de palmeiras, savanas inundadas e por fim, planícies de inundação (várzea), que se situam a margem dos diversos rios amazônicos (Forsberg et al., 2000). Durante parte do ano, o nível das águas passa a ser superior a altura da calha do rio, de forma que a água sobressalente se distribui ao longo das áreas terrestres e inundáveis, sendo este evento chamado de pulso de inundação.

O pulso de inundação se refere a uma variação do nível de água no ambiente, podendo abranger diferentes tipos de solo, condições climáticas e origem das águas. O pulso de inundação permite que o mesmo ambiente possua características tanto terrestres quanto aquáticas, de acordo com a época do ano (Junk et al., 1997), possibilitando uma grande diversidade biológica e atuando como fonte de alimento e de abrigo contra predadores (Gouding et al., 1996; Araujo-Lima, 2001). Um outro fator importante para a ecologia desses ambientes, é a alta produtividade primária, contribuindo para a disponibilidade de energia para toda a cadeia trófica (Parolin et al., 2004; Forsberg et al., 1993; Arraut et al., 2010), principalmente durante o período de seca e vazante (Afonso, 2011). Durante o período de enchente e cheia, ocorre a homogeneização das propriedades ópticas dos ambientes lagunares próximos, enquanto que durante a seca e vazante, se espera um comportamento contrário, devido ao isolamento dos lagos.

De forma simplificada, as águas da bacia do Amazonas podem ser divididas em 3 grandes grupos, baseados no pH e na concentrações dos materiais particulados e dissolvidos. O primeiro grupo corresponde a águas pretas (Rio Negro), com um pH entre 3,8 e 4,9 e com grande concentração de matéria orgânica dissolvida. O segundo grupo corresponde a águas brancas (Rio Solimões), com um pH entre 6,2 e 7,2 e grande concentração tanto de materiais dissolvidos quanto particulados. O terceiro grupo corresponde a águas claras (Rio Tapajós), com um pH entre 4,5 e 7,8 e baixa concentração tanto de materiais dissolvidos quanto de particulados.

Na várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, no Baixo Solimões, Affonso et al. (2011) observaram que entre os anos de 2007 e 2011, os lagos são ocupados predomi-

*Email: danielsfj@dsr.inpe.br

nantemente por águas brancas no período da cheia (entre Junho e Julho). Durante a vazante (setembro e outubro) e a seca (Novembro e dezembro) os lagos apresentam maior amplitude nas suas propriedades químicas e física, com a ocorrência de ambientes dominados por água preta. A precipitação possui grande influência na entrada de sedimentos decorrente da descarga fluvial, com a predominância de partículas inorgânicas durante a seca e aumento na biomassa fitoplanctônica durante a vazante, devido a uma menor competição por recursos.

Quanto à biomassa fitoplanctônica da RDSM, Affonso et al. (2011) observaram que em condições extremas, quanto ao pulso de inundação, os lagos apresentavam condições oligotróficas durante a cheia e condições hiper-eutróficas durante a seca, com concentrações de clorofila-a de 5 g/l e 130 g/l, respectivamente. Os lagos possuem uma grande variância natural nos parâmetros de qualidade de água, e essa variabilidade se refere a uma resposta momentânea do ambiente ao pulso de inundação. A produtividade primária varia em função de diversas características do ambiente, e as condições oligotróficas observadas durante a cheia podem estar relacionadas à excessiva turbulência, ao aumento na concentração de CDOM, ao baixo tempo de residência da água e/ou baixa disponibilidade de luz (Kirk, 1994).

Casali et al. (2011) identificou o predomínio de três grupos distintos de fitoplâncton na região do Baixo Amazonas, com Criptofíceas (Flagelados) durante a cheia e Cianobactérias e Diatomáceas durante a seca. Costa et al (2013) observou, por meio de análise HPLC, que existe um padrão na distribuição dos pigmentos acessórios, presentes nos grupos fitoplanctônicos, em função do tipo de água presente, com o domínio de clorofila-a, zeaxantina e clorofila-b (Cianobactéria) em águas claras, clorofila-a e Aloxantina (Criptofíceas) em águas pretas e clorofila-a em águas brancas. Um outro fator relevante para a ecologia desses ambientes se refere a variabilidade dos grupos taxonômicos presentes, com maior variabilidade de pigmentos acessórios em águas claras e pretas, concordando com os resultados observados por Saliot et al. (2001).

A distribuição temporal e espacial dos grupos fitoplanctônicos possui grande relevância para a compreensão dos processos naturais e impactos das atividades antrópicas, e durante as últimas décadas, diversos trabalhos (e.g. Ciotti, 2002; Siswanto, 2013) tem correlacionado as propriedades ópticas da água com índices que quantificam e/ou detectam a presença de grupos fitoplanctônicos através de seus pigmentos acessórios. Em águas opticamente complexas, todos os componentes contribuem de forma significativa para a sua coloração, sendo necessário quantificar esses diferentes componentes para compreender melhor as propriedades biofísicas desses ambientes.

2. Uso do sensoriamento remoto para auxílio a modelagem hidrodinâmica

O uso de imagens ópticas e Modelos Digitais de Elevação (MDEs) aliados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é uma importante ferramenta para a caracterização limnológica de um ecossistema. Pode ser utilizada como uma alternativa para estudos *in situ*, permitindo a delimitação de área, quantificação de volume e análises espaço-temporais, com um custo relativamente baixo (RENNÓ, 2008; VALERIANO, 2011).

No mapeamento de áreas alagáveis, podem ser utilizados dados de sensores ópticos (MERTES et al., 1995; SHIMABUKURO et al., 2002), sensores ativos como o radar (HESS et al., 2003) e/ou o Modelo Digital de Elevação (MDE), derivado de dados ópticos ou de sistemas SAR, tais como o SRTM (RABUS et al., 2003). Os dados topográficos obtidos do SRTM, disponíveis gratuitamente

para quase todo o planeta, tem sido utilizados com diversas abordagens.

A elaboração de cenários que descrevem o pulso de inundação nas planície de inundação é importante para diferentes áreas do conhecimento, como geomorfologia, desflorestamento (RENÓ et al., 2011), circulação da água (BARBOSA, 2005; JUNK, 1996), produção pesqueira e qualidade da água (JUNK, 1996), entre outros. Entretanto, a criação destes requer a utilização de algoritmos precisos para estimar o processo de inundação e um conhecimento prévio do ambiente a ser estudado.

A partir dos dados SRTM, Rennó et al. (2008) propuseram o algoritmo HAND (Height Above the Nearest Drainage), que gera um MDE tal que rios e lagos possuem altura zero, normalizando o terreno em função da rede de drenagem. Desta forma, valores acima de um indicam qual a variação do nível de cota necessária para alagar este determinado pixel e assim, possibilitam o desenvolvimento de um mapa de inundação de referência, e a partir deste, simular diferentes cenários.

II. OBJETIVOS

Elaborar mapas de inundação para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) e verificar como o pulso de inundação se comporta ao longo de séries temporais de um ano.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

1. Área de estudo

A área de estudo é a RDSM, no Estado do Amazonas, e corresponde a planície de inundação dos Rios Solimões e Japurá, próximo a cidade de Tefé, a cerca de 600 km a montante de Manaus (Figura 1). A região é formada por uma planície de inundação, com uma variação anual do nível da água de aproximadamente de 10 m, sendo que durante a cheia, os canais, lagos, canos, ressacas e rios permanecem interconectados, e durante a seca, somente os rios principais, alguns canais de conexão e os lagos contêm água (Ayres, 1993).

O período de cheia começa em maio e termina em meados de julho, quando ocorrem as maiores cotas médias registradas. O período de seca se estende de setembro até novembro, quando ocorrem as menores cotas médias e a maior frequência de cotas mínimas, sendo no mês de Novembro o pico da seca. A enchente começa em Janeiro indo até o início de maio, e a vazante começa em meados de julho, estendendo-se até o mês de setembro. O pulso de inundação apresenta um padrão anual mono-modal, apesar da variabilidade interanual ser determinada pelo regime de chuvas na região e nos Andes. O período da enchente e cheia pode ser caracterizado pela baixa radiação solar, resultante da maior nebulosidade e alta precipitação. Durante a vazante e seca a radiação solar é bem mais elevada do que durante a cheia ou a enchente e no caso da precipitação, o padrão é o inverso (Afonso, 2011).

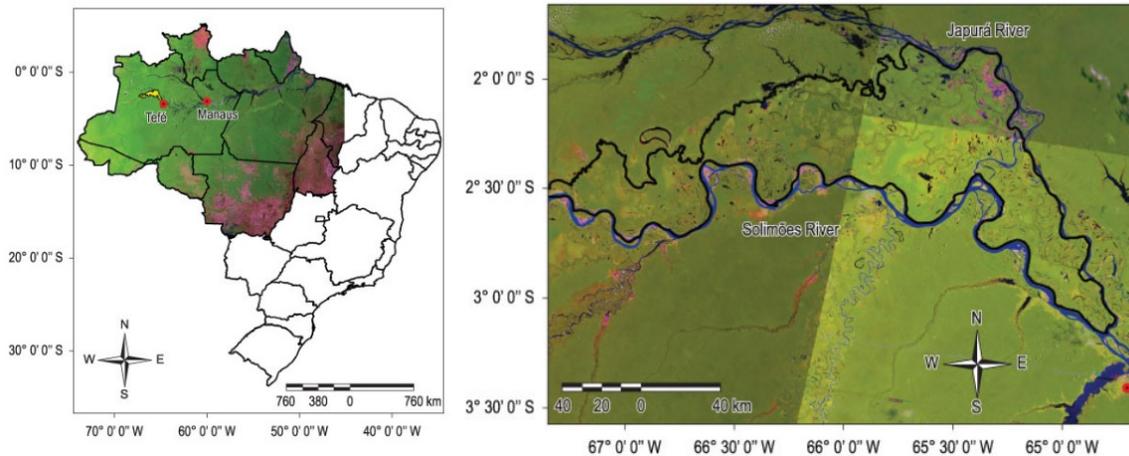


Figure 1: Mapa do Brasil, enfatizando a RDSM em amarelo, próximo a cidade de Tefé e mapa da respectiva área da RDSM.

2. Modelo de Elevação Digital (DEM)

Para o desenvolvimento do trabalho foram selecionadas quatro imagens da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Estas foram obtidas de forma gratuita através da plataforma Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e abrangem a área sudeste da RDSM (Figura 1).

Os produtos obtidos foram SRTM 1 Arc-Second Global (com resolução espacial de 30m) e SRTM Void Filled, com resolução de 90m. As resoluções distintas se devem aos testes realizados para a obtenção de uma bacia de drenagem adequada aos objetivos apresentados.

3. Dados In situ

Os dados fluviométricos medidos in situ correspondem a cota diária para o lago de Mamirauá, próximo ao Flutuante Mamirauá, uma das bases de campo mantidas pelo Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá – IDSMM, e estão disponível de forma gratuita pelo site <http://www.mamiraua.org.br/fluviometrico>.

4. Processamento dos mapas SRTM

Para realizar o processamento das imagens e gerar o modelo de inundação, utilizou-se a plataforma TerraHidro versão 4.2.2. O processamento seguiu os seguintes procedimentos:

1. Mozaico das imagens SRTM
2. Grid de direção de fluxo
3. Grid de área de contribuição
4. Grid de área de drenagem
5. HAND

Por fim, os dados foram importados no software Matlab para a simulação dos cenários e plotados na forma de mapas.

A fase de processamento 1 se refere a criação de um mosaico a partir das 4 imagens SRTM originais (Figura 2).

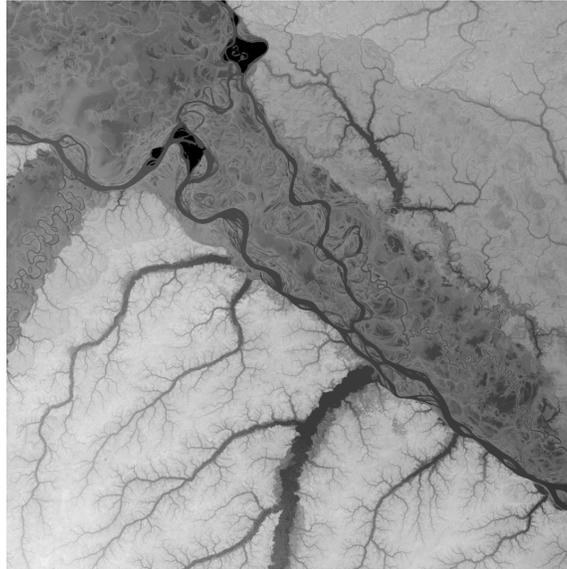


Figure 2: *Imagem SRTM utilizada durante o trabalho*

As fases de pré processamento 2 e 3 foram feitas de forma automática pela plataforma TerraHidro, utilizando como dado de entrada o mozaico criado previamente (Figura 3).

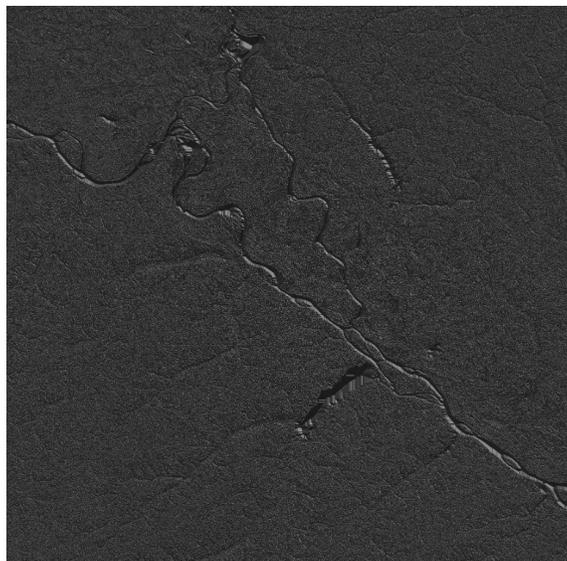


Figure 3: *Grade de direção de fluxo gerada automaticamente*

Durante o pré processamento para a utilização do HAND tanto o grid de direção de fluxo quanto o grid de área de contribuição são obtidos de forma automática e sem entrada do usuário, entretanto durante a obtenção automática do grid de área de drenagem (fase 4), o usuário deve delimitar qual o limiar estabelecido para a sua criação, seccionando qual o número mínimo de pixels de contribuição necessários para caracterizar um local como área de drenagem. Para o presente trabalho, algumas abordagens foram testadas, utilizando as imagens com 30 e 90m de resolução e diferentes limiares diversos mapas foram obtidos, e através de análise visual e conhecimento prévio sobre a área de estudo, o limiar selecionado foi de 150.000.

5. Elaboração de cenários

Os cenários foram elaborados visando detectar se a variabilidade da intensidade dos pulsos de inundação afeta o processo de inundação na RDSM. Para isso, foi feita a seleção de três anos para representar o conjunto de dados, utilizando como referência a média anual da cota. O ano 2013 representa a intensidade mínima (29.78 m), o ano 2001 representa a intensidade mediana (31.05) e o ano 2009 representa a intensidade máxima (33.28). Além destas cotas, foi estabelecido que a cota média entre os dias 11 e 22 de Fevereiro de 2000 representaria a cota durante a passagem da SRTM, e o mapa base obtido pela algoritmo HAND possui esta cota para os pixels contendo o valor 0. Por fim, o cálculo do valor de cota para cada dia utilizado na simulação foi feito por meio de subtração, e o valor resultante foi subtraído do mapa de inundação original (figura 4). Assim, um aumento na cota resulta na diminuição no valor dos pixels, inundando uma maior área. Como o valor mínimo para a cota é zero, valores negativos foram considerados como zero.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o trabalho pressupõe que as áreas com valores próximos de zero são indicativos de áreas inundadas, o mapa de inundação da RDSM, observado na figura 4, mostra que o algoritmo HAND permite identificar as áreas inundadas ao longo da RDSM, considerando os rios, lagos e áreas alagadas, de pequeno a grande porte. Além disso, pela variação dos tons de cinza, podemos notar quais as áreas são mais suscetíveis a inundação (pixels escuros) em função da variação da cota média. De forma mais detalhada, notamos que o algoritmo descreve de forma satisfatória pequenos rios, indicando que a resolução de 30 m é adequada aos objetivos apresentados. Entretanto, alguns rios não são observados de forma clara, indicando que a utilização de uma rede de drenagem obtida de forma automática pode não ser a metodologia mais indicada para um ambiente com rios estreitos e sob a influência de vegetação densa.

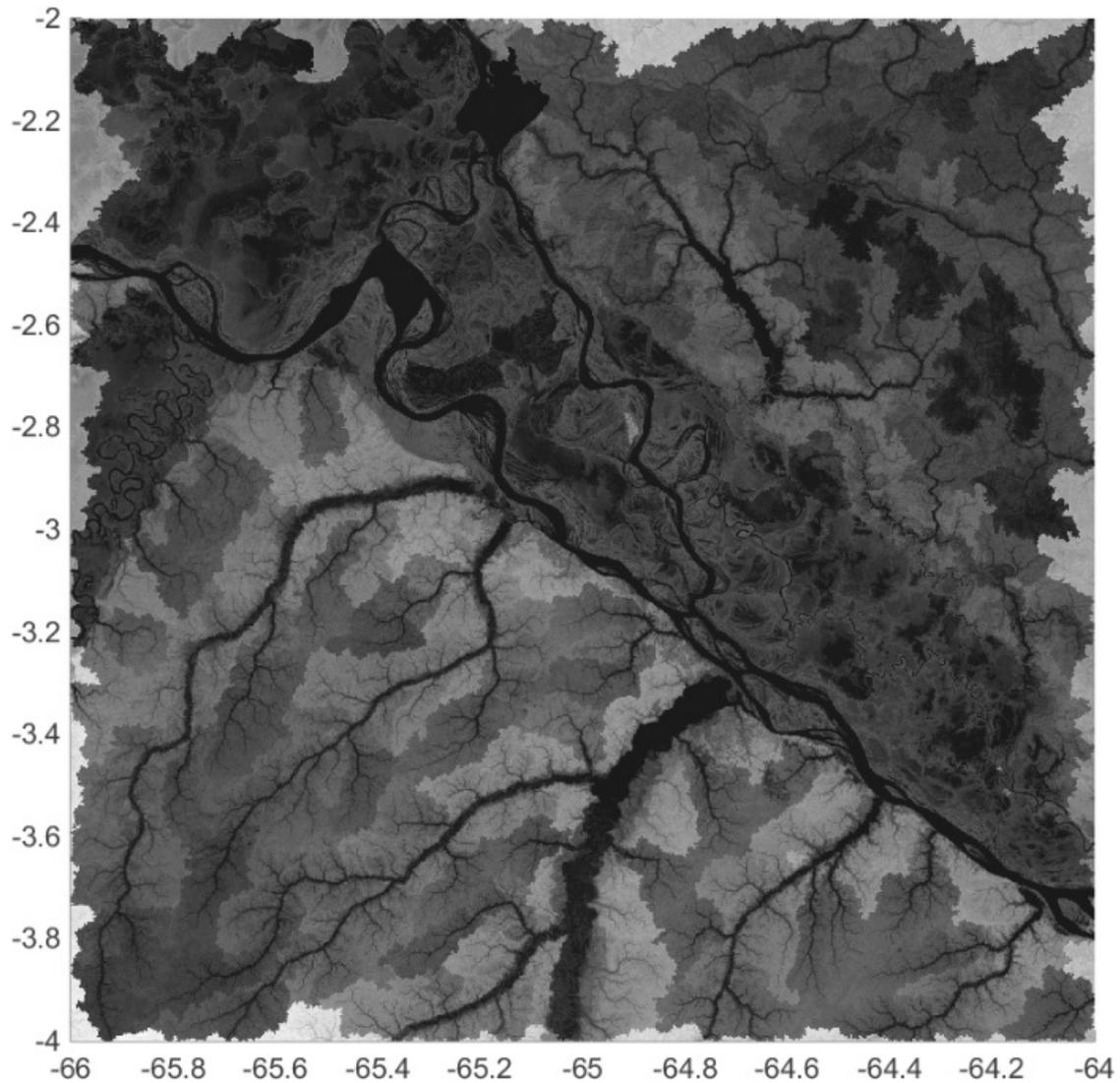


Figure 4: Mapa da RDSM gerado a partir do algoritmo HAND. Pixels escuros indicam áreas inundadas ou propícias a inundação e pixels claros indicam áreas mais não inundáveis.

Para ampliar o escopo do trabalho e entender como o pulso de inundação afeta a RDSM, foi feito um pós processamento a partir do mapa de inundação inicial, estabelecendo três cenários distintos, caracterizando anos de baixa, média e alta precipitação. Esa seleção foi feita através do valor da cota média anual para o lago Mamirauá para uma série temporal de 15 anos. Para resumir estes, a figura 5 descreve os três cenários em 3 situações, seca, enchente, cheia, entretanto o período da seca não pode ser descrito de forma completa, utilizando o mínimo obtido pelo algoritmo HAND. Para simplificar a visualização, pixels pretos representam áreas inundadas e pixels brancos representam áreas não inundadas.

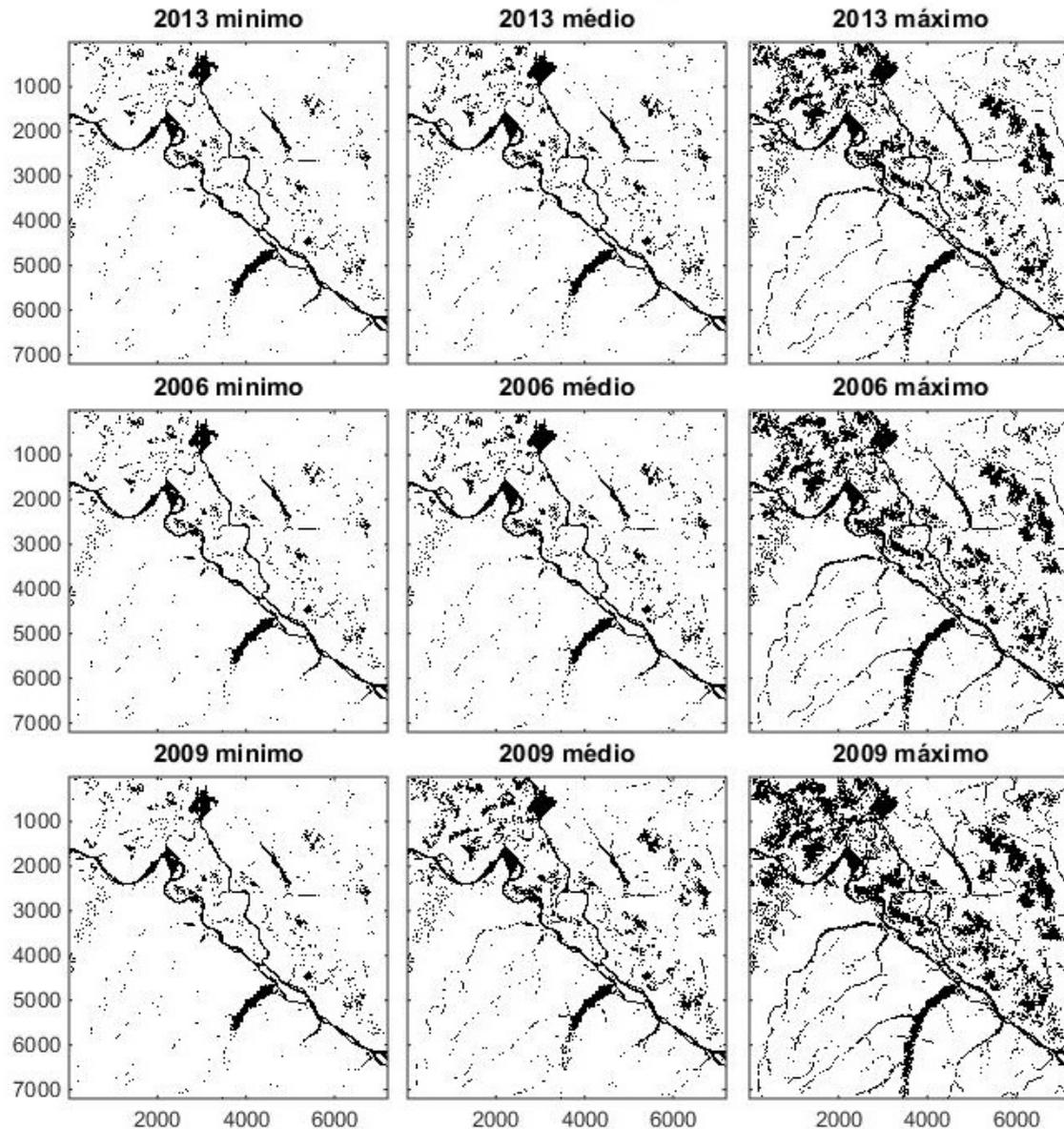


Figure 5: Mapas gerados a partir dos cenários pré estabelecidos. Considerando a distribuição original. Os 3 mapas superiores se referem ao ano com a menor cota média, os 3 mapas centrais se referem ao ano com cota mediana e os 3 mapas abaixo se referem ao ano com a cota média máxima. Considerando a distribuição vertical, os títulos de mínimo, médio e máximo, se referem ao valor da cota diária em relação ao seu respectivo ano.

Ao analisarmos a figura 5 podemos notar que existe um grande impacto do pulso de inundação da RDSM, assim como uma grande variabilidade interanual, com a formação de grandes áreas inundadas dentro da RDSM durante a cheia, enquanto que durante a seca estas áreas desaparecem, podendo inclusive influenciar no tamanho e acessibilidade dos rios desta região. Considerando a alta precipitação nestes ambientes, o uso de sensores ópticos para compreender estes ciclos sazonais pode se tornar inviável, uma vez que os sensores que possuem uma resolução espacial adequada possuem um tempo de revista longo, e em conjunto com a cobertura de nuvens, pode

produzir longos períodos sem imagens propícias. Portanto, considerando as vantagens do uso de técnicas de modelagem hidrológica (permite a modelagem para o período determinado) e radar (desconsidera a presença de nuvens), esta abordagem pode ter grande importância no estudo ao relacionarmos o impacto do pulso de inundação nas diferentes variáveis ambientais obtidas *in situ*.

Para a abordagem adotada neste trabalho, a obtenção de medidas *in situ* de cota é de extrema importância, uma vez que toda a inferência é feita a partir desta referência e esta deve ser precisa. Além disso para a validação desta abordagem, seria necessário a obtenção de cotas para diversos pontos da área de estudo, permitindo verificar se o algoritmo responde de forma adequada as diferentes condições, e em quais situações podemos indentificar eventuais erros.

Uma deficiência identificada na implementação deste algoritmo em conjunto as imagens SRTM, se refere a variação no nível de cota. A imagem SRTM foi obtida durante o período de 11 a 22 de Fevereiro de 2000, período de enchente para a RDSM. Assim, o algoritmo não permite estabelecer cenários com cotas inferiores a este valor, portando a cota mínima impelmentavel no desenvolvimento dos cenários é a cota média durante este período. Para permitir um monitoramento contínuo, seria necessária a utilização de uma rede de drenagem adequada a este período, sendo esta mais precisa e ajustada de forma manual. Entretanto, por se tratar de uma aplicação distinta ao propósito inicial do HAND, os resultados se mostraram satisfatórios.

V. REFERÊNCIAS

- Affonso, A.G.; Queiroz, H.; Novo, E.M.L.M. Limnological characterization of undisturbed floodplain lakes in Central Amazon (Amazonas State, Brasil). *Acta Limnológica Brasiliensia*. 2011.
- Araújo-Lima, C.A.R.M.; Silva, J.V.V.; Petry, P.; Oliveira, E.C.; Moura, S.M.L. 2001. Diel variation of larval fish abundance in the Amazon and Rio Negro. Brazil. *J. Biol.*, 61(3): 357-362.
- Arraut, E.M.; Marmontel, M.; Mantovani, J.E.; Novo, E.M.L.M.; Macdonald, D.W.; Kenward, R.E. The lesser of two evils: seasonal migrations of Amazonian manatees in the Western Amazon. *Journal of Zoology*, 280 (3):247-256, 2010. doi: <10.1111/j.1469-7998.2009.00655.x>.
- Ayres, J.M. 1993. As matas de várzea do Mamirauá. médio rio Solimões. CNPq - Programa Trópico Úmido e Sociedade Civil Mamirauá, Brasília, DF. 123p.
- Casali, S.; Calijuri, M.C.; Barbarisi, B.; Renó, V. F.; Affonso, A.; Barbosa, C.C.F.; Silva, T. S. F.; Novo, E.M.L.M. (2011). Impact of the 2009 extreme water level variation on phytoplankton community structure in Lower Amazon floodplain lakes. *Acta Limnologica Brasiliensia* 23(3): 260-270.
- CIOTTI, A.M.; LEWIS, M.R.; CULLEN, J.J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnology and Oceanography*, v. 47, p. 404-417, 2002.
- Costa, M.P.F., Novo, E.M.L.M & Telmer, K.H. 2013. Spatial and temporal variability of light attenuation in large rivers of the Amazon. *Hydrobiologia*. 702:171-190.
- FORSBERG, B.R.; ARAUJO-LIMA, C.A.R.M.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L., BONASSI, J.A. Autotrophic carbon sources for fish of the central Amazon. *Ecology*, v. 74, p. 643- 652, 1993.
- FORSBERG, B. R.; HASHIMOTO, Y. ROSENQVIST, A.; MIRANDA, F. P. Tectonic fault control of wetland distributions in the Central Amazon revealed by JERS-1 radar imagery. *Quaternary International*, v. 72, p. 61-66, 2000.
- GOULDING, M.; SMITH, N. J. H.; MAHAR, D. J. Floods of fortune: ecology and economy along the Amazon. New York: Columbia University Press, 1996. 184p.
- HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dual season

- mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*. 87, p. 404-428, 2003.
- Junk, W. J. *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System*, Springer, Berlin, 1997.
- KIRK, J.T.O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Second Edition, Cambridge Univ. Press, 1994.
- MERTES, L. A. K.; DANIEL, D. L.; MELACK, J. M.; NELSON, B.; MARTINELLI, L. A.; FORSBERG, B. R. Spatial patterns of hydrology, geomorphology and vegetation on the floodplain of the Amazon River in Brazil from a remote sensing perspective. *Geomorphology*, v. 13, p. 215-232, 1995.
- NEIL, C.; ELSENBEEER, H.; KRUSCHE, A. V.; LEHMANN, J.; MARKEWITZ; FIGUEIREDO, R. O. Hydrological and biogeochemical processes in a changing amazon: results from small watershed studies and the lage-scale biosphere- atmosphere experiment. *Hydrological Processes*. 20, 2467-2477m, 2006.
- PAROLIN, P.; SIMONE, O DE; HAASE, K; WALDHOFF, D; HOTTENBERGER, S; KUHN, U; KESSELMEIER, J; KLEISS, B;SCHIMIDT, W; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. Central Amazonian floodplain forests: *Botanical Review*, The New York Botanical Garden, v. 70, n. 3, p. 357-380, 2004.
- RABUS, B.; EINEDER M.; ROTH A.; BAMLER R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Photogrammetry and Remote Sensing*. v. 57, p. 241-262, 2003.
- Rennó, C.D.; Nobre, A.D.; Cuartas, L.A; Soares, J.V.; Hodnett, M.G.; Tomasella, J.; Waterloo, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazônia. *Remote Sensing of Environment*, v.112, pp. 3469-3481, 2008.
- Saliot, A.; Mejanelle, L.; Scribe, P.; Fillaux, J.; Pepe, C.; Jabaud, A.; Dagaut, J. Particulate organic carbon, sterols, fatty acids and pigments in the Amazon River system. *Biogeochemistry*. 53:79–103, 2001.
- SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M. L. M.; MERTES, L. K. Amazon River mainstem floodplain Landsat TM digital mosaic. *International Journal of Remote Sensing*, v.23, n.1, p. 57-69, 2002.
- SISWANTO, E.; ISHIZAKA, J.; TRIPATHY, S.C.; MIYAMURA, K. Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. *Remote Sensing of Environment*, v. 129, p.185-196, 2013.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography*. v. 32, p. 300-309, 2012.