Mapeamento dos índices de sensibilidade fluvial a derrames de óleo mediante análise espaço-temporal do fenômeno de inundação em Coari (AM)

Patricia Mamede da Silva¹ Fernando Pellon de Miranda² Luiz Landau¹

¹ Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia - LAMCE/COPPE/UFRJ - CT, Bloco I-214, Cidade Universitária – 21.949-900 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil. {patmamed, landau}@lamce.coppe.ufrj.br

² Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras - CENPES – Av. Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, Ilha do Fundão – 21.941-915 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil. fmiranda@petrobras.com.br

Abstract. Landscape changes occur in Amazônia as a result of four different hydrological scenarios (flooding water, high water, receding water, and low water). These scenarios determine local environmental patterns in a singular manner. In average, annual variation of the water level can reach up to 12 meters. This seasonal context enhances the oil spill sensitivity of the study area, which includes the pipeline route from the Urucu petroleum province to the vicinities of Coari city (Amazonas State). The present study intends to develop a collaborative tool for environmental analysis as an aid to the hydrodynamic modeling of the Solimões River alluvial plain during the scenarios mentioned above. Such an approach includes digital processing of the SRTM DEM using mathematical morphology (watershed operator), in conjunction with information about terrain slope, water level temporal series in Coari, and JERS-1 SAR dual-season mosaics of the Global Rain Forest Mapping Project (GRFM). These mosaics are important to detect flooded forest associated with the double-bounce mechanism, which is possible due to the increased L-band penetration in the dense vegetation cover. This is not entirely verified in the SRTM DEM that was constructed using data collected by two C-band antennas. Therefore, analysis of this DEM requires ancillary information from SAR systems operating in longer wavelengths. Achieved results indicate that the proposed methodology adds value to mapping the fluvial oil spill sensitivity in Amazônia wetlands, by offering a novel insight to the generation of information products derived from the SRTM DEM.

Palavras-chave: SRTM, environmental sensitivity to oil spills, JERS-1 SAR, mathematical morphology, Amazônia, SRTM, sensibilidade ambiental a derrames de óleo, JERS-1 SAR, morfologia matemática, Amazônia.

1. Introdução

As mudanças que ocorrem na Amazônia em seus quatro cenários hidrológicos (enchente, cheia, vazante e seca) são muito significativas e determinantes dos padrões ambientais que compõem a paisagem da região, caracterizando um contexto singularmente distinto. Embora, em alguns locais, o fenômeno da inundação seja ainda mais expressivo, a variação média anual do nível das águas é de 10 a 12 metros, como resultado de uma dinâmica associada às chuvas nas cabeceiras dos rios e ao degelo anual do verão andino.

A área estudada integra a rota de escoamento de óleo cru e GLP (gás liquefeito de petróleo) produzidos na Província Petrolífera de Urucu (Figura 1). Tal fato a torna suscetível a possíveis danos decorrentes das atividades petrolíferas, que são uma potencial ameaça à conservação ambiental nos trechos sob sua influência (Jensen *et al.*, 1993).

A necessidade de se mapear as áreas onde essa indústria está instalada tornou indispensável um exame mais detalhado do elenco das feições fluviais amazônicas e de sua sensibilidade a derrames de óleo, visando relacionar os componentes de interesse da rede de drenagem e, assim, hierarquizá-los. Desta forma, foram definidos índices adaptados às referidas feições e que contemplam a sazonalidade da região (Araújo *et al.*, 2002) (Tabela 1).



Mosaico JERS-1 SAR na cheia do Projeto GRFM (Rosenqvist et al., 2000)

Figura 1 – Localização da área de estudo (em detalhe no retângulo amarelo), que inclui a cidade de Coari (AM).

adela	1 - Indice de sensibilidade fluvial da região amazonica a derrames	ae c	neo
	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE FLUVIAL DA REGIÃO AMAZÔNICA A DERRAMES		

Índias de consibilidade fluxial de região emercânico e demonros de áles

DE OLEO				
Índice	Feição			
1	Estruturas artificiais			
2	Laje ou afloramento rochoso			
3	Corredeira/cachoeira			
4	Escarpa/barranco			
5	Praia ou banco de areia/seixo exposta			
6	Praia ou banco de area/seixo abrigada			
7	Praia ou banco de lama exposto			
8	Praia ou banco de lama abrigado			
9	Zona de confluência de rios e lagos			
10a	Banco de macrófitas aquáticas			
10b	Vegetação alagada (igapós, vázea, chavascal, campo, etc.)			

Fonte: Araújo et al. (2002).

1.1 Objetivo

TT 1 1 1

Diante do acima exposto, este trabalho tem por objetivo desenvolver uma ferramenta colaborativa de análise ambiental como subsídio à modelagem hidrodinâmica da várzea do Rio Solimões em diferentes cenários. Tal abordagem inclui a utilização dos dados do MDE (Modelo Digital de Elevação) da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Rabus *et al.*, 2003), manipulados com a morfologia matemática (Banon & Barrera, 1998), integradamente com os dados de declividade e o estudo da série histórica do nível das águas (Agência Nacional de Águas - ANA). Pretende-se, assim, analisar a dinâmica das inundações, cuja sazonalidade é sobremodo complexa. O principal produto a ser obtido consiste em um mapa representativo da distribuição espacial dos índices de sensibilidade fluvial a derrames de óleo.

2. Metodologia

Este estudo propõe uma metodologia de integração de dados, cujo desenvolvimento contemplou duas importantes etapas, nas quais estão inseridos os seguintes elementos: mosaicos JERS-1 (*Japanese Earth Resources Satellite-1*) SAR; imagens classificadas através do Unsupervised Semivariogram Textural Classifier (USTC); dados da SRTM (disponíveis

em:http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/;http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/downlo ad/am/sb-20-v-b.htm); máscara SWBD (SRTM *Water Body Data*) (disponível em: http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/) no formato *shapefile*; dados de cotas fluviométricas adquiridos através da Agência Nacional de Águas (ANA).

A primeira etapa inclui a extração de dados e sua posterior adequação para utilização na análise sugerida. Este procedimento se inicia com a suavização dos níveis de cinza das imagens SAR, por meio da utilização do operador morfológico *imfill*, conforme descrito em Silva (2012), objetivando melhorar o aspecto visual das feições que as compõem.

Com base nos mosaicos JERS-1 SAR (Rosenqvist *et al.*, 2000) classificados com o uso do USTC, cuja descrição encontra-se em Miranda *et al.* (1997), foram individualizadas três classes de cobertura: água, floresta inundada + vegetação flutuante e floresta de terra firme (Beisl *et al.*, 2002). Estes mosaicos foram utilizados para correlacionar os limites inundáveis classificados como acima descrito com aqueles adquiridos com a metodologia adotada no presente estudo. Por sua vez, a máscara SWBD teve a finalidade unicamente de separar os corpos hídricos do ambiente terrestre (Silva, 2012).

A partir do MDE da SRTM, foram geradas isolinhas representativas do fatiamento da elevação em níveis de interesse escolhidos pelo usuário, extraídas com o intuito de se compreender qualitativamente a dinâmica do fluxo hídrico superficial. Foi também confeccionado o mapa de elevação ou mapa hipsométrico, que teve por objetivo auxiliar a interpretação da declividade local. Tal produto também foi empregado, em conjunto com o algoritmo da morfologia matemática, para nortear a simulação de uma inundação virtual na área de interesse (Silva, 2012). Quanto aos dados de declividade, estes foram usados com o propósito de representar os valores de inclinação de uma área em relação ao plano horizontal, servindo como fonte de informação sobre as formas do relevo local.

No que diz respeito à elaboração das séries temporais, as quais caracterizam as variações do nível das águas em um período específico de tempo, suas cotas fluviométricas são procedentes da estação de Coari e foram plotadas em um gráfico que abrange desde 1982 até 2010. Isto possibilitou inferir os principais momentos do regime hídrico da área investigada, caracterizados pela seca, enchente, cheia e vazante, que são importantes na análise espacial por explicitar o comportamento hidrodinâmico sazonal (Silva, 2012).

Na segunda etapa, utilizou-se um operador morfológico, conhecido como *watershed*, descrito por Meyer (1994), para simular um processo de inundação sobre o mapa hipsométrico extraído do MDE da SRTM. Esta técnica interpreta a imagem em níveis de cinza como a expressão do relevo topográfico, onde a cada nível atribui-se uma altitude proporcional a seu valor, de maneira que o procedimento "inunda a imagem" a partir das regiões mais baixas, submergindo gradualmente as feições topográficas.

Assim, as áreas de baixo gradiente foram consideradas bacias hidrográficas, por terem seus pixels conectados aos locais de mínima altitude. O máximo regional foi tomado como o limite de inundação máximo, não devendo ultrapassar o limite pré-estabelecido pela classificação USTC para a floresta inundada.

À medida que as águas sobem, detectam-se novos mínimos regionais. A cada passo, as "bacias", guiadas pela configuração espacial dos níveis de cinza da imagem, são preenchidas. Quando as águas provenientes de bacias vizinhas entram em contato, a transformação *watershed* constrói um "dique", ou seja, uma linha imaginária que divide cada nível inundado. Ao final do processo, quando a imersão atinge seu nível máximo, obtém-se um conjunto de linhas de partição de águas na imagem, as quais são interpretadas como camadas de inundação (Silva, 2012).

3. Resultados e Discussão

3.1 Produtos topográficos

O emprego do MDE da SRTM possibilitou confeccionar os diferentes produtos abaixo relacionados, considerados importantes para o entendimento do relevo da região de Coari, tornando mais fácil a avaliação espacial da morfologia do terreno. O estabelecimento dessa configuração tornou possível nortear a reconstrução do cenário hidrológico de inundação, respeitando as características topográficas da área e, ao mesmo tempo, fornecendo subsídios à elaboração do mapa de sensibilidade ambiental a derrames de óleo.

Curvas de nível

O mapa de curvas de nível (Figura 2) mostra a baixa amplitude altimétrica, característica da região, como uma condição muito desfavorável à análise, agravada pela ambiguidade do MDE da SRTM, gerado com a banda C, no que se refere à limitada penetração no dossel do pulso do radar, devido ao bioma amazônico ser composto predominantemente por florestas densas e árvores com altura média de 20 metros. Isso remete à interpretação das isolinhas conjuntamente com a imagem JERS-1 SAR classificada utilizando o USTC. Com efeito, ao correlacioná-las, pode-se atestar que os limites das áreas potencialmente inundáveis são coincidentes com a cota 40 m, em sua maior parte. Verifica-se também, localmente, que a maior penetração na vegetação do sinal JERS-1 SAR na banda L possibilitou a delineação de florestas inundadas mesmo em cotas superiores a 40 metros (Figura 3). Fuchshuber (2011) empregou um critério que definiu os terrenos localizados abaixo da cota 40 m, como florestas inundadas e bancos de macrófitas, considerando a cota máxima da água no Lago de Coari, de aproximadamente 20 m, e a altura média das árvores na Amazônia (20 m). Conforme a classificação de sensibilidade ambiental a derrames de óleo proposta por Araújo et al. (2002), as supracitadas áreas, na época da cheia, abrangem os índices 10b (vegetação alagada) e 10a (macrófitas aquáticas) (Tabela 1).

Mapa hipsométrico

O mapa de elevação ou hipsométrico exibe o resultado da definição de classes altimétricas derivadas das curvas de nível e permite apontar feições pouco salientes na paisagem, mas que configuram trechos escarpados nas margens dos lagos Coari e Mamiá (letras **a**, **b**, **c**, **d** na Figura 4). A distribuição das classes altimétricas revela a presença de feições características da área investigada, tais como platôs, que são formas residuais de aplainamento, e várzeas com muitas depressões (Silva, 2012). Verifica-se, na área de platôs a sul de Coari, um sugestivo controle estrutural do relevo por falhas de orientação E-W, exposto na Figura 4 (letras **e**, **f**, **g**), que é consistente com estudos realizados por Ribeiro *et al.* (2009).

Declividade

O mapa da Figura 5 apresenta os gradientes altimétricos da região em estudo, no qual as classes de declividade foram definidas segundo a metodologia sugerida pela EMBRAPA (2009). Em tal mapa, observam-se feições significativas no que tange à declividade do terreno, como, por exemplo, a parte em ciano, classificada como menor intervalo de declividade, que não está restrita a uma única unidade hipsométrica (comparar com Figura 4), pois se dispõe em diferentes cotas altimétricas. Entretanto, as maiores declividades se localizam nas margens dos rios; naturalmente, esses locais são mais suscetíveis à erosão. Nos trechos escarpados nas margens dos lagos de Coari e Mamiá, a declividade pode chegar a valores acima de 10%.

3.2 Análise das séries temporais

A aquisição dos dados orbitais para a missão SRTM ocorreu entre 10 e 20 de fevereiro de 2000. A análise das séries históricas permitiu aferir que, em tal período, as cotas referentes ao nível de água em Coari situaram-se entre 932 e 985 centímetros (Figura 6). Assim, de forma a simular o processo de alagamento, tal condição teve que ser considerada para que os resultados fossem fidedignos. Com efeito, o operador morfológico *watershed* iniciou a



inundação a partir do valor máximo verificado no período de desenvolvimento da SRTM (985 cm).

Figura 2 – Curvas de nível em Coari, com espaçamento de 10 metros e altimetria variando de 10 a 80 metros.

Figura 4 – Mapa de elevação ou hipsométrico de Coari, com classes altimétricas variando de 0 a 80 metros. Comparar com disposição de áreas com florestas inundadas na Figura 3. Em **a**, **b**, **c** e **d**, exemplos de trechos escarpados nas margens dos lagos Coari e Mamiá. Em **e**, **f** e **g**, verificou-se o controle do relevo por falhas de orientação E-W.





Figura 3 – Diagrama ilustrativo da análise que utilizou as curvas de nível até a cota de 40 metros, sobreposta à imagem classificada JERS-1 SAR na cheia (a), resultando na imagem em (b). O recorte da série temporal, indicando as cotas máxima e mínima na região de Coari, está apresentado em (c). As áreas em amarelo representam florestas inundadas na classificação USTC das imagens JERS-1 SAR. Letras (g) e (h) referem-se a trechos de floresta inundada em cotas superiores a 40 metros, com distribuição espacial restrita.



Cotas Fluviométricas de Coari (1982-2010) 2000 1768 1800 1600 1400 1200 Cotas (cm) 1000 800 600 400 200 186 0 2.101-82 1.11192 111-98 2-141-00 2-141-02 2-141-84 2.141-88 2.141.90 2-141-94 2-141-96 2.141-04 2.111-06 Período

Figura 6 – Série histórica das cotas fluviométricas de Coari,

cm.

destacando a seca e a cheia (186 e 1768 respectivamente) máximas, bem como as cotas abaixo do valor correspondente à passagem da SRTM (retângulo vermelho). O nível na passagem SRTM situou-se entre 932 e 985 centímetros.

Figura 5 – Mapa de declividade em Coari, no qual os limites de suas classes foram calculados em porcentagem.

3.3 Integração dos Resultados

O princípio norteador da integração dos resultados foi estabelecer relações entre as superfícies inundáveis, classificadas com o emprego do USTC nas imagens JERS-1 SAR, com os produtos derivados do MDE da SRTM, como, por exemplo, as curvas de nível. Nessa análise, ficou caracterizada a correspondência entre a cota de 40 metros e o mapa hipsométrico, cujas cores representam as classes altimétricas. Confrontaram-se também informações diversas, tais como a data da missão SRTM, a qual corresponde ao período de enchente do ciclo hidrológico amazônico (fevereiro/2000), a altura média das árvores da região (20 metros) e a cota máxima de inundação no Lago Coari em aproximadamente 20 metros, determinada a partir da série histórica da estação fluviométrica fornecida pela ANA. Após conhecidas essas relações, o operador morfológico watershed realizou o processo de inundação até o nível aproximado de 30 metros, correspondente à sexta camada de inundação, em amarelo (Figura 7). Foi também definido o mínimo regional no nível 9,85 metros, correspondente à primeira camada também de cor amarela na citada imagem. Para cada camada, foram obtidos segmentos configurando os limites de inundação, obedecendo devidamente os níveis topográficos e os valores mínimo e máximo determinados (Figura 7).

No total, obtiveram-se 13 níveis de inundação, dos quais foram selecionados apenas 9 níveis comuns a áreas com a mesma característica altimétrica. Os níveis acima da cota de 30 metros não foram utilizados para construção do mapa de sensibilidade ambiental a derrames de óleo (Figura 9), pois sua segmentação mostrou-se inconsistente para a inundação do núcleo urbano e de seu entorno. Posteriormente, buscaram-se as correspondências entre as classes temáticas USTC e cada produto gerado com o watershed para, assim, estimar-se os níveis atingidos pela inundação.

A contribuição dos resultados da aplicação da técnica *watershed* com as curvas de nível extraídas do MDE da SRTM para o mapeamento das áreas mais sensíveis a derrames de óleo em Coari é ilustrada na Figura 8 (b). Em tal produto, verifica-se a coincidência do segmento do nível de inundação correspondente à cota de 20 metros com o as curvas altimétricas, onde seus limites extraídos obedecem aproximadamente ao gradiente topográfico. Vale lembrar que as curvas elaboradas a partir do MDE da SRTM estão sujeitas à indeterminação inerente à impossibilidade da banda C de penetrar completamente na cobertura vegetal densa da Amazônia.

Verifica-se na imagem JERS-1 SAR da cheia, mostrada na Figura 9, a presença de áreas de alto retorno (*double-bounce*) não incluídas como vegetação alagada no mapa de sensibilidade ambiental a derrames de óleo efetuado com base no MDE da SRTM. Isso ocorre porque a banda L possui maior penetração no dossel que a banda C na SRTM, o que demonstra a necessidade do uso combinado de ambas as faixas do espectro eletromagnético na elaboração de um produto final.



Figura 7 – Esquema de inundação, ilustrando a sequência da disposição dos níveis modelados com o *watershed*.







Figura 8 – a) Segmentação do nível de inundação (ciano) correspondente à cota de 20 metros sobreposta às curvas de nível até a cota 40 metros; b) detalhe da imagem (a), ressaltando a relativa correspondência da segmentação com a curva de nível de 20 metros (escala das curvas na Figura 2).

Figura 9 – Mapa de sensibilidade fluvial a derrames de óleo na região de Coari (AM), segundo critérios de Araújo *et al.* (2002). Ver Tabela 1.

4. Conclusões

Os resultados permitem concluir que os dados de sensores remotos, quando analisados de forma integrada, agregam valor à caracterização de uma região com ciclo hidrológico muito complexo, como é o caso da Amazônia. Os procedimentos adotados possibilitaram seu monitoramento e o entendimento de sua dinâmica sazonal, a qual caracteriza o expressivo fenômeno de inundação na região. Fica, assim, facilitado o mapeamento da sensibilidade fluvial a derrames de óleo, oferecendo uma nova perspectiva para elaboração de produtos com a utilização do MDE da SRTM em conjunto com a morfologia matemática, o estudo das séries temporais do nível das águas e os mosaicos JERS-1 SAR do projeto GRFM.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP (Agência Nacional do Petróleo), ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia) pelo suporte que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Araújo, S. I., Silva, G. H., Muehe, D. C. E. H. Manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras: ambientes costeiros e estuarinos. Petrobras, Rio de Janeiro, , 2002.133 p.

Banon, G. J. F., Barrera, J. **Bases da Morfologia para a Análise de Imagens Binárias.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998. INPE-11429-RPQ/767, 2ª Edição.

Beisl, C. H., Miranda, F. P., Fonseca, L. E. N., et al. Multi-scale visualization of remote sensing and topographic data on the Amazon rain forest for environmental monitoring of the petroleum industry. In: American Geophysical Union - Fall Meeting. San Francisco - California. American Geophysical Union, 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. xxvi, 412 p. : il.

Furchshuber, E. M. Avaliação de técnicas de classificação automática de dados multi-polarimétricos na banda-L do sensor R99B-SAR para o mapeamento de áreas inundadas no Lago de Coari, Amazônia Central. 2011. 165 p. Dissertação (mestrado). UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro. 2011.

Jensen, J. R., Murday, M., Sexton, W. J., et al. Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. **Geocarto International**, 1993. Vol. 2, p. 5-13.

Meyer, F. Topographic distance and watershed lines. Signal Processing. 1994. Vol. 38. p. 113-125.

Miranda, F. P., Fonseca, L. E. N., Beisl, C. H, et al. Seasonal mapping of flooding extent in the vicinity of the Balbina Dam (Central Amazonia) using RADARSAT-1 and JERS-1 SAR data. Proceedings of the International Symposium Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97), 1997. Paper available in CD-ROM format.

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., et al. The Shuttle Radar Topography Mission - A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2003. Vol. 57, p. 241-262.

Ribeiro, O. L., Silva, C. L., Morales, N., et al. Controle tectônico na planície do Rio Solimões, região de Coari (AM), a partir de análise em imagens ópticas e dados SRTM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Vol. 14. Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 3301-3308.

Rosenqvist, A., Shimada, M., Chapman, B., et al. The Global Rain Forest Mapping Project – a Review. International Journal of Remote Sensing. v. 21, p. 1375-1387., 2000.

Silva, P. M. Integração de Técnicas Computacionais como Contribuição para o Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Fluvial a Derrames de Óleo na Região de Coari (AM). 2012. 154 p. Tese (doutorado). UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro. 2012.