

Avaliação de superfícies inundáveis em zonas úmidas da bacia Amazônica por meio de dados espaciais.

Joecila Santos da Silva^{1,2}
Muriel Berge Nguyen²
Jean François Cretaux²
Frédérique Seyler³
Otto Corrêa Rotunno Filho¹
Stéphane Calmant²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
Caixa Postal 68506 – 21945-970 – Rio de Janeiro, Brasil.
{joecila.silva@ird.fr, otto@coc.ufrj.br}

² Laboratoire d'Études en Géophysique et Oceanographie Spaciales – LEGOS
14 Edouard Belin – 31400 – Toulouse, France.
{muriel.berge@cnes.fr, jean-francois.cretaux@legos.obs-mip.fr, stephane.calmant@ird.fr}

³ Institut de Recherche pour le Développement/Representation Brésil – IRD/BRESIL
Caixa Postal 7091 – 71619-970 – Brasília, Brasil.
frederique.seyler@ird.fr

Abstract: Evaluating the amount of water that passes through unmonitored inundation areas aside rivers is a major objective of hydrological modelling in the great tropical basins. In this study, we present a methodology based on satellite data only to evaluate such amount in the Curupira Lake, in the Amazon basin. We used the ESA's ERS-2 and ENVISAT radar altimetry to determine the water stages in the Lake. The temporal resolution of these missions is 35 days. We used weekly mosaics of MODIS images, at 500m resolution, to compute inundated surfaces. We processed the MODIS images by computing three classes, namely vegetation, inundated forest and open water, on the basis of the NDVI and EVI indices. From this classification, we compute the wet surface as the sum of the open water and inundated forest classes. The study spans between years 2001 to 2008. As a result, we present the stage-surface relationship in this lake that can be used to compute the variations in water volume throughout the hydrological cycle.

Palavras chave: remote sensing, wetlands, Amazon basin, sensoriamento remoto, zonas úmidas, bacia Amazônica.

1. Introdução

Ao contrário de outros setores hidrológicos, que, para a sua utilização, demandam intervenções positivas e investimentos, as zonas úmidas apresentam a vantagem de permitirem uma pronta utilização de suas funções. Não é de se surpreender que a atenção mundial se volte para essas zonas e sobre os serviços que elas prestam ao meio ambiente, como a existência de uma convenção internacional específica (*i.e.*, Convenção Ramsar), ratificada atualmente por mais de 123 países, incluindo o Brasil, que aprovou seu texto reconhecendo-o em 1992, pois abrange em seu território, enormes extensões de áreas úmidas. Entre elas, estão as zonas de inundação da bacia Amazônica, que, constituem uma rede complexa de lagos conectados ao leito principal dos rios, cobrindo superfícies que são estimadas entre 60.000 Km² (Sippel et al. 1998) e 300.000 Km² (Junk, 1983).

Grupos internacionais de estudos de gestão de recursos hídricos ressaltam a necessidade de dados hidrológicos elementares. Os rios, lagos e zonas úmidas constituem os principais recursos de água doce. Um sistema de monitoramento desses recursos, que seja homogêneo e perene e que produza dados rapidamente acessíveis, é indispensável a nível global. Por outro lado, o monitoramento desses recursos é realizado através de redes hidrológicas organizadas a nível nacional. O problema mais comum, na maioria das regiões, principalmente em áreas remotas como as várzeas da bacia Amazônica, inclui inadequado monitoramento das redes, falhas nos dados, redução geral do número de estações, insuficiência crônica de financiamento, diferença de processamento e controle de qualidade e diferentes políticas de gestão de dados (WMO, 2003).

Neste estudo, busca-se mostrar uma alternativa para contornar a problemática dos dados observacionais *in situ*, obtidos por redes hidrométricas tradicionais, com a utilização de dados de satélite de observação da Terra, discutindo-se a evolução das superfícies inundadas do lago Curupira a partir de imagens do sensor MODIS (MOD09A1) e dados altimétricos dos radares ERS-2 e ENVISAT. Em vez de se produzir um modelo espaço-temporal de previsões das superfícies inundadas, busca-se estabelecer uma relação com as alturas de água medidas pelos satélites altimétricos, integrando-se os dados com imagens de sensoriamento remoto, através de uma curva de calibração superfície inundada-altura altimétrica.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange o lago Curupira de aproximadamente 600 km² (Figura 1), incluso no planalto rebaixado da Amazônia próximo à foz do rio Madeira, onde são encontradas grandes extensões de áreas aplainadas que têm como características a ausência de drenos definitivos, denominada planície ou várzea amazônica.

2.2 – Dados altimétricos ERS-2 e ENVISAT

Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*) das missões ERS-2 e ENVISAT são processados e disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS*. O processamento do algoritmo *ice-2* para a missão ERS-2 foi realizado pelo projeto *Observation de Surface Continental Altimetrie Radar – OSCAR*. Para o satélite ERS-2, extraíram-se 90 traços, totalizando 130 ciclos de 11/07/1992 a 15/12/2002; para o satélite ENVISAT extraíram-se 90 traços, totalizando 66 ciclos de 02/10/2002 a 29/02/2008. Foram desenvolvidos algoritmos para cada satélite e para cada algoritmo de tratamento das FOs (*ocean, ice-1, ice-2 e sea-ice*), que permitissem calcular a posição da medida altimétrica com data, latitude, longitude e altura do plano de água a partir da equação da órbita do satélite com as devidas correções ambientais e geofísicas. A

metodologia para criação das estações virtuais utilizadas para este estudo é descrita detalhadamente em Roux et al. (2008), Santos da Silva et al. (2008) e Seyler et al. (2008). Nesta pesquisa foram criadas estações virtuais utilizando-se o algoritmo *ice-1* para o satélite ENVISAT e *ice-2* para o satélite ERS-2.

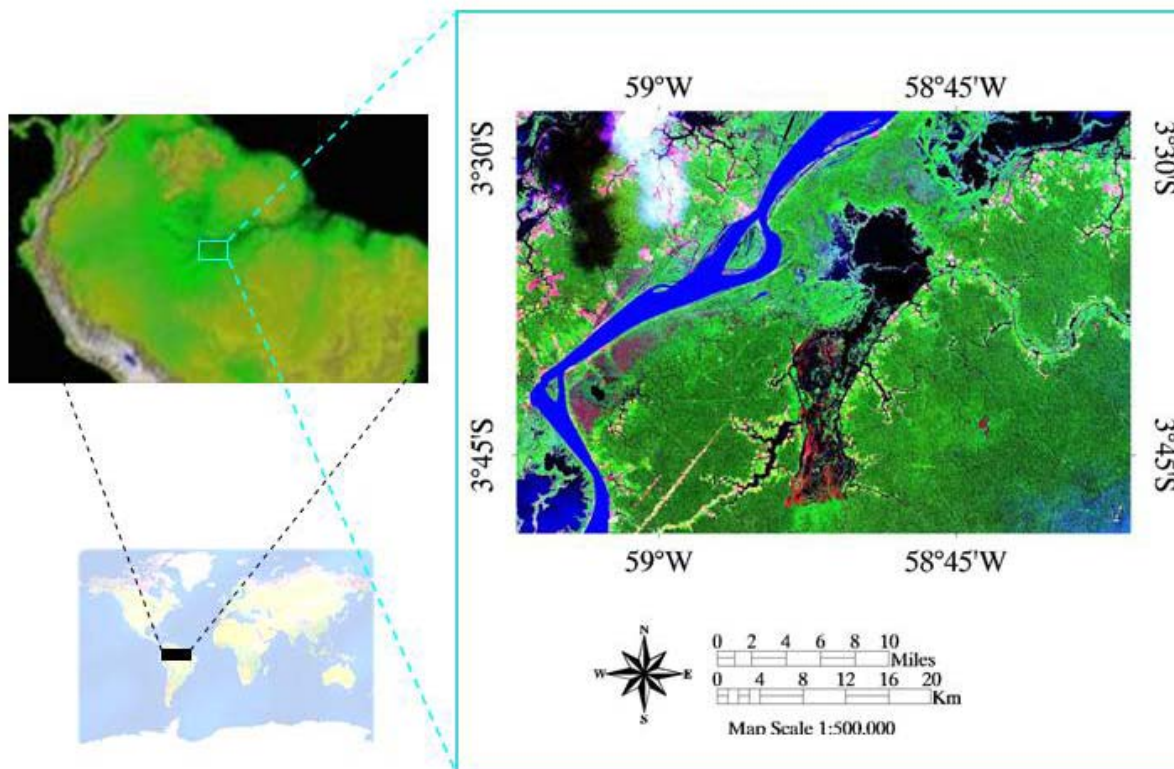


Figura 1: Área de estudo: Lago do Curupira.

2.3 Sensoriamento Remoto

Para o presente estudo, foram utilizadas imagens do satélite TERRA do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS. O sensor MODIS é um dos cinco instrumentos do satélite TERRA. O sensor MODIS visualiza toda a superfície da Terra a cada 1-2 dias, com uma varredura de 2.330 km (*swath*), adquirindo dados em 36 bandas espectrais distintas (Running et al., 1994). Essa característica espectral do sensor MODIS supera uma das limitações dos sensores remotos precedentes, de resolução espacial moderada e alta resolução temporal, como o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) (Vermote et al., 1997). Conseqüentemente, o sensor MODIS rastreia um amplo conjunto de sinais vitais da Terra, em princípio mais adequado do que qualquer outro sensor disponível no satélite TERRA.

Foram adquiridas imagens do produto MODIS MOD09A1, com resolução espacial de 500 m, para os anos de 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008. Esse processo de composição é gerado a partir de várias imagens adquiridas em um período de 8 dias e seleciona o melhor pixel da imagem para compor os produtos, minimizando eventuais distorções espaciais e ruídos radiométricos (Van Leeuwen et al., 1999). As imagens MODIS são fornecidas pela sistema de observação terrestre da NASA (*Earth Observing System EOS-NASA*), originalmente na projeção *Integerized Sinusoidal* - ISIN e no formato HDF (*hierarchical data format*), sendo acompanhadas com arquivos textos contendo as informações necessárias para seu georreferenciamento. Na fase de processamento digital da imagem, operações como visualização de bandas individuais, composição colorida e registros são utilizadas, procurando-se extrair o máximo de informações da imagem digital. No caso

particular desta pesquisa, não foi feita a correção atmosférica, pois as imagens MODIS já apresentam uma correção atmosférica aplicada a todos os píxeis sem nuvem, que passam pelo controle de qualidade de nível 1, para minimizar os impactos de absorção de gases, moléculas e aerossóis dispersos na atmosfera (Vermote et al., 1997 e 2002).

As imagens tiveram seu cabeçalho novamente editado, a partir das informações contidas nos arquivos textos, para elaboração do georeferenciamento (registro), sendo utilizado, para este objetivo o programa *MODIS Reprojection Tool* (MODIS Tool, 2005). As informações fornecidas incluem arquivo da imagem original, com as bandas a serem utilizadas, quais sejam: reflectância superficial das bandas de 1 a 7, variáveis de controle de qualidade para 500m da banda 8 e variáveis de estado para 500m da banda 12; nome do arquivo de saída; formato do arquivo de saída; algoritmo para registro da imagem; sistema de projeção (coordenadas geográficas – latitude e longitude) e o *datum* (WGS – 84). Essas imagens foram salvas no formato GeoTIFF. Em seguida, foi gerado um arquivo reorganizando todas as bandas na seqüência supracitada, utilizando-se o programa ENVI 4.2 (ENVI, 2005).

Para delimitação das superfícies inundadas deste trabalho, foram desenvolvidos algoritmos em IDL – linguagem do programa ENVI, baseados nos trabalhos de McFeeters (1996) e Sakamoto et al. (2007), realizada em 3 grandes fases: composição das bandas derivadas do cálculo do índice de vegetação de diferença normalizada– NDVI (*normalized difference vegetation index*) e o índice de vegetação ajustado – EVI (*enhanced vegetation index*); a comparação desses índices para identificação e separação das diversas classes; e geração das imagens classificadas. Foram definidas quatro classes distintas: água livre (regiões totalmente inundáveis), vegetação inundável (regiões temporariamente inundáveis), vegetação não inundável (regiões cobertas de vegetação sem inundação) e outras regiões que não são do interesse deste estudo. Os parâmetros estabelecidos foram:

- classe 1 – água livre (regiões totalmente inundáveis) – $NIR < 1500$;
- classe 2 – vegetação inundável – $0,1 < EVI < 0,3$ e $1500 < NIR < 2700$;
- classe 3 – vegetação não inundável – $NDVI > 0,5$;
- classe 4 – outros – $NDVI > 0,5$ e $NIR > 2700$

onde NIR é a energia refletida na região do infravermelho próximo, NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada e EVI e o índice de vegetação ajustado. Nesse processo, cada parâmetro e, portanto, cada função discriminante refere-se a uma classe conhecida e presente na cena. Esse procedimento indica que, durante o processo de classificação, cada píxel é associado inteiramente a uma classe.

2.4 Estimativa pela relação superfície/altura de água

As superfícies inundadas extraídas das imagens foram relacionadas às alturas de água de origem altimétrica, utilizando-se o mapa temático da semana relativa à data da passagem dos satélites ERS-2 e ENVISAT, que apresentam um tempo de revisita de 35 dias, obtendo-se uma curva de calibragem superfície inundada-altura altimétrica (S/h).

3. Resultados e Discussões

3.1 Contribuição do Sensoriamento Remoto à Hidrologia do Lago Curupira

Como na região de estudo a cobertura vegetal é variada e muito densa, a assinatura espectral entre as diferentes feições não são facilmente separáveis ou distintas. Nesse sentido, a reflectância na região do infravermelho próximo não é suficiente para identificar as zonas inundáveis, sendo, portanto, utilizados os índices NDVI e EVI. Na Figura 2, comparam-se

duas imagens do NDVI nos períodos de cheia e estiagem e uma imagem do EVI no período de cheia. Em novembro, a inundação desenvolve-se na parte a montante do lago central, que aparece bem desenhado em preto, indicando um baixo valor do NDVI, em que uma parte do lago central   recoberta de vegeta o inundável. Em maio, as zonas inundadas no lago central são bem desenvolvidas, e a região a montante aparece em cinza, indicando a presença de vegeta o inundável. Existe uma confusão entre vegeta o inundável e não inundável, uma vez que o período de precipita o ainda não terminou na região. No entanto através do EVI pode-se identificar perfeitamente essa classe que aparece mais brilhante na imagem.

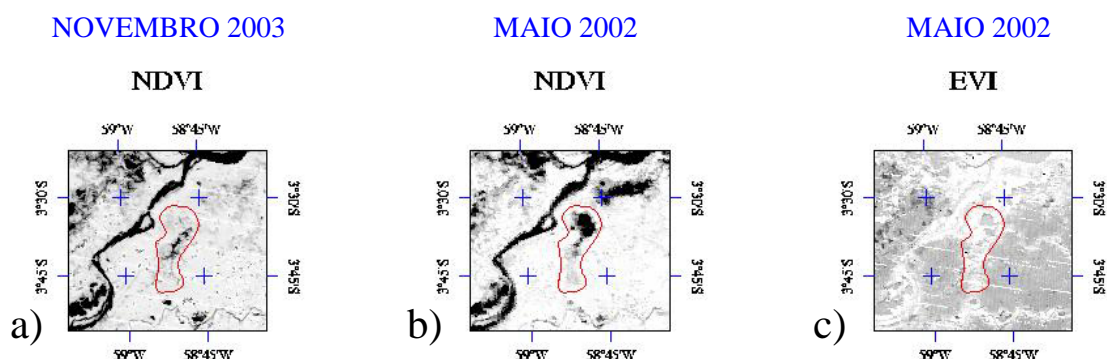


Figura 2: Compara o do período de estiagem e cheia no lago Curupira. a) e b) Imagens do NDVI; c) Imagem do EVI.

A inunda o no lago Curupira desenvolve-se sobre vários meses e permanece em sua superfície máxima durante algumas semanas, iniciando-se nos meses de novembro/dezembro e atingindo seu máximo nos meses de maio/junho. As imagens MODIS MOD09A1 apresentam uma repetitividade temporal de 8 dias sendo adequadas para um bom acompanhamento da inunda o. Apesar de não ser possível inferir uma precisão absoluta no que diz respeito a essa estimativa, a resolu o espacial de 500m utilizada, apresenta valores aceitáveis, próximos do real, para este estudo preliminar, permitindo separar a vegeta o inundável daquela não inundável, bem como as regiões de água livre, conforme se verifica na Figura 3, resultante da metodologia empregada para a classifica o das imagens, onde a classe água livre aparece em azul, a vegeta o inundável em verde claro e a vegeta o não inundável em verde escuro e outros em branco.

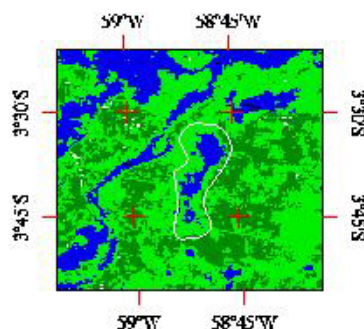


Figura 3: Imagem do periodo de cheia classificada segundo a metodologia proposta.

3.2 As Superfícies Inundadas

Somente as informa es das imagens não são suficientes para uma análise temporal da superfície inundada, sendo necessário um acoplamento com outros dados para uma explora o completa de suas informa es, seja dados geográficos como a topografia ou dados

de altura de água. Para este estudo, as alturas de nível de água são provenientes dos dados altimétricos oriundos dos satélites ERS-2 e ENVISAT.

Observando-se a Figura 4, pode-se perceber que as séries temporais das classes água livre, em azul claro, e vegetação inundável, em verde, resultantes da classificação, utilizadas para a estimativa da superfície inundada, acompanham perfeitamente a variação do nível de água medida pelos satélites altimétricos ERS-2 e ENVISAT, em vermelho, embora se encontrem afetadas por ruídos, provenientes principalmente de imagens com nuvens, que são constantes na região amazônica.

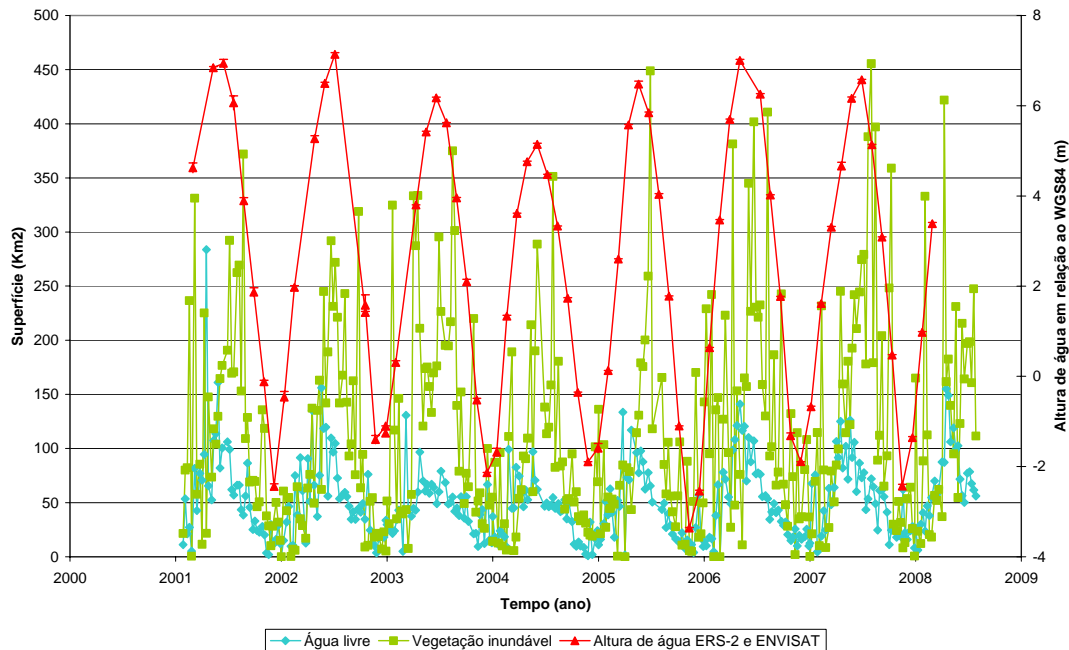


Figura 4: Séries temporais resultantes da classificação das imagens MODIS MOD09A1 e altura de água medida pelos satélites ERS-2 e ENVISAT.

A Figura 5 apresenta a curva de correlação superfície/altura, obtida para os anos de 2001 a 2008, entre a superfície inundada do lago Curupira e as alturas de nível de água medidas pelos satélites altimétrico ERS-2 e ENVISAT.

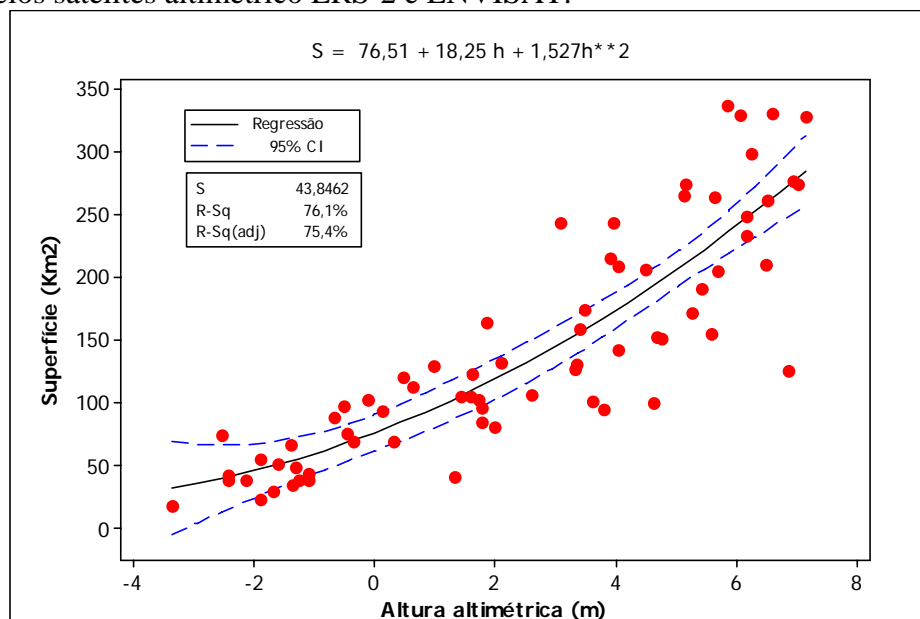


Figura 5: Curva de correlação superfície/altura do lago Curupira para os anos de 2001 a 2008.

Na Figura 6.a, os resíduos da curva de correlação ajustam-se ao longo de uma reta, embora na Figura 6.c, exista uma anomalia no histograma, onde se conclui que não há um sério desvio da normalidade. As Figuras 6.b e 6.d não indicam qualquer inadequação séria na curva de correlação pois os resíduos se encontram distribuídos aleatoriamente em relação aos valores da superfície calculados e aos valores da superfície provenientes da classificação.

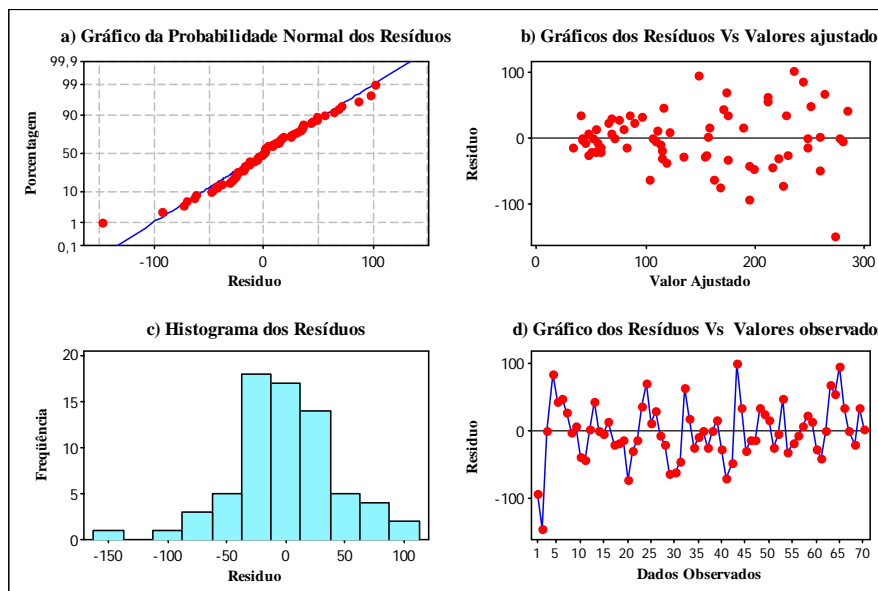


Figura 6: Análise da curva de correlação.

4. Conclusões

O conjunto dos dados espaciais utilizados, incluindo altimetria por radar e imagens de sensoriamento remoto, permite enriquecer e aprofundar a base de conhecimentos sobre a bacia Amazônica em virtude da ausência de dados *in situ*. Após este estudo preliminar, pode-se afirmar que as imagens MODIS MOD09A1 representam um importante complemento para o estudo cartográfico das superfícies inundáveis nas zonas úmidas da bacia Amazônica, pois oferecem a possibilidade de uma análise espaço-temporal de 3 objetos principais: água, vegetação inundável e vegetação não inundável. As superfícies inundáveis variam segundo o ciclo hidrológico, mesmo que as imagens MODIS MOD09A1 apresentem uma resolução espacial de 500m. Utilizando-se somente dados espaciais, pode-se conhecer as superfícies máximas inundáveis através da relação superfície/altura a partir das alturas de nível de água máximas observadas pelos satélites altimétricos. O modelo apresentado explica 76% da variabilidade dos dados. No entanto, isso não implica necessariamente que a relação encontrada seja o único modelo apropriado para prever as variações da superfície inundada da região, visto que o presente estudo envolve domínios variados como a hidrologia, a altimetria espacial, o sensoriamento remoto, as análises espaço-temporais e novas técnicas matemáticas. Uma aproximação entre esses diversos domínios, constitui, certamente, o interesse maior desta pesquisa.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) no âmbito do projeto CAPES/COFECUB N° 516/05 – *Modelagem Hidrológica-Atmosférica Aplicada à Gestão de Grandes Bacias Hidrográficas* pela bolsa de doutorado em co-tutela concedida ao

primeiro autor. Ao *Earth Observing System EOS-NASA* pelas imagens MODIS MOD09A1 e ao *Global Rain Forest Mapping – GRFM* pelas imagens do satélite JERS-1 disponibilizadas para a pesquisa. Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, pela disponibilização de mapas da região. Ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS*, pelos *Geophysical Data Records – GDRs* dos satélites ERS-2 e ENVISAT utilizados na pesquisa.

Referências bibliográficas

ENVI, *version 4.2, Envi user's guide, The Environment for Visualizing Images*. Colorado, U.S.A, 2005.

Junk, W. J. As águas da Região Amazônica. In: SALATI, E. et al. **Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia**. São Paulo: Brasiliense; (Brasília): Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, p.45-100, 1983.

Mcfreeters, K. S. The use of Normalized difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17 (7), p.1425-1432, 1996.

Neiff, J.J. Ideas for the ecological interpretation of Paraná River. **Interciencia**, v.15, p.424-441, 1990.

Running, S. W. et al. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.17, 3587– 3620, 1994.

Roux, E., Santos Da Silva, J., Vieira Getiranaa, A. C., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Seyler, F. Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry – Comparison of methods. **Hydrological Sciences Journal**, em revisão, 2008.

Santos Da Silva, J.; Roux, E.; Rotunno Filho, O. C.; Seyler, F.; Calmant, S. ERS-ENVISAT Altimetry over the Amazon basin: Quality assessment, applications and perspectives. **Remote Sensing of Environment**, submetido, 2008.

Seyler, F.; Calmant, S.; Santos Da Silva, J.; Filizola, N.; Roux, E.; Cochonneau, G.; Vauchel, P.; Bonnet, M-P. Monitoring water level in large trans-boundary ungrauged basin with altimetry: the exemple of ENVISAT over Amazon Basin. **Journal of Applied Remote Sensing – SPIE**, submetido, 2008.

Sakamoto, T. et al. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong delta from MODIS time-series imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.109, n.3, p.295-313, 2007.

Sippel, S. J.; Hamilton, S. K.; Melack, J. M.; Novo, E. M. M. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, p.3055–3074, 1998.

Van Leeuwen, W. J. D.; Huete, A. R.; Laing, T. W. MODIS vegetation index compositing approach: A prototype with AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v.69, p.264-280, 1999.

Vannote, R.L. et al. The river continuum concept. **Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Science**. V.37, p.130-137, 1980.

Vermote, E. F. et al. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: background, operational algorithm and validation. **Journal of Geophysical Research-Atmosphere**, v.102, n.D14, p.17131–17141, 1997.

Vermote, E. F.; El Saleous, N. Z.; Justice, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1-2, p.97-111, 2002.

WMO – World Climate Organization. **Report of the GCOS/GTOS/HWRP Expert Meeting on Hydrological Data for Global Studies**. K.D. Harvey and W. Grabs (Eds). Held in Toronto, Canada, 18-20 November 2002 Report GCOS 84, Report GTOS 32, WMO/TD – No. 1156, 2003