

Dinâmica de sedimentos em suspensão no estuário do rio Araguari a partir de imagens de sensores remotos óticos e conexões com o rio Amazonas

Edineuza dos Santos Rosário ¹
Valdenira Ferreira dos Santos ²
Savio Carmona ¹

¹ Universidade Federal do Amapá- UNIFAP
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Macapá - AP, Brasil
edineuza_rosario, savio@gmail.com

² Instituto Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA
Caixa Postal 515 - 12227-010 - Fazendinha - AP, Brasil
valdenirafferreira@gmail.com

Abstract. This work analyzes the spatial and temporal distribution of the suspension sediment concentration (SSC) and its relationship with the changes that occurred in the Araguari estuary in recent years, which culminated in its closure. Four scenes of Landsat satellite imagery (years 2008, 2012, 2013 and 2014) and samples of surficial water for SSC analysis were used. The scenes were processed by applying the atmospheric correction and were co-registered. The SSC values were estimated through a global empirical algorithm applied in other rivers of the Amazon region. The results showed an increase in the SSC in middle zone of the estuary. Such sediment flow was transported through a new channel that now connect the Amazon River to the Araguari River. The multitemporal analyzes revealed that in areas of higher CSS in the images, there were the formation of bars and banks inside the Araguari estuary. The estimated CSS data presented a good correlation with the data collected in situ, although tending to overestimate the concentration values. The results obtained demonstrate the possibility of using this technique to trace scenarios of changes in estuaries in the region.

Palavras-chave: Araguari estuary, sedimentary processes, remote sensing of color of water, amazonian coast.

1. Introdução

As variações no conteúdo de sedimentos finos em suspensão, dentro dos estuários, podem ser um indicador para entender os processos de transporte de materiais. Entretanto, a coleta e análise desse material, com cobertura espacial e temporal significativa, implicam em altos custos. Assim, o sensoriamento remoto da cor d'água é uma ferramenta útil para auxiliar no estudo dos processos hidrossedimentares, devido sua capacidade para detectar resposta espectral dos sedimentos em suspensão. Além do mais, possibilita maior abrangência espaço-temporal e a associação com dados coletados *in situ*. A variação na quantidade e característica dos sedimentos em suspensão implica em variações na sua concentração e, o aumento do seu conteúdo nas águas, aumenta a reflectância nos comprimentos de onda da região do visível e infravermelho próximo (RUDORFF *et al.*, 2005; MENEZES, 2013).

As aplicações desta ferramenta, na costa amazônica e plataforma adjacente, para análise da cor d'água, em especial da CSS iniciaram no final da década de 1980, destacando-se o trabalho de Herz (1990). Na costa da Guiana Francesa, Lahet *et al.*, 2002; Froidefond *et al.*, 2002; Froidefond *et al.*, 2004; e Vantrepotte *et al.*, 2013 se ocuparam da validação radiométrica dos dados de sensores SPOT e da série Landsat. Em que pese a contribuição, dos trabalhos de Martinez *et al.*, (2009) sobre as mudanças na descarga sólida do rio Amazonas e do trabalho de Gensac *et al.* (2016) que trata da avaliação das tendências de distribuição da CSS ao longo da foz do Amazonas e costas do Amapá e da Guiana Francesa. Nenhum trabalho foi registrado até o momento dentro dos estuários da costa do Amapá, ao norte da foz do Amazonas. Somente, avaliações visuais foram realizadas por Santos *et al.* (2005) que permitiram traçaram os limites da zona de turbidez máxima do estuário do Araguari e sua

conexão com a distribuição dos processos costeiros, distribuição de micro-organismos bentônicos e de material orgânico proveniente da Bacia do Amazonas (Laut *et al.*, 2010).

Assim, este trabalho é uma primeira investigação dentro de um estuário, ao norte da foz do rio Amazonas, na costa amazônica brasileira, e tem como principal objetivo avaliar a distribuição espaço-temporal da concentração de sedimentos em suspensão no estuário, a partir do uso de imagens Landsat, a fim de auxiliar no entendimento das mudanças nos processos sedimentares que ocorreram com o fechamento do canal principal do estuário..

2. Metodologia de Trabalho

O estuário está localizado, no extremo leste do Estado do Amapá, envolve parte dos municípios costeiros de Macapá, Amapá e Cutias e parte da Reserva Biológica (REBIO) do Lago Piratuba (Figura 01). Está inserido na bacia hidrográfica do rio Araguari, que possui múltiplos usos, com a existência de três hidrelétricas (Rosário, 2016), atividade de pecuária extensiva (Santos, 2006), uso da água para abastecimento humano, pesca e navegação.

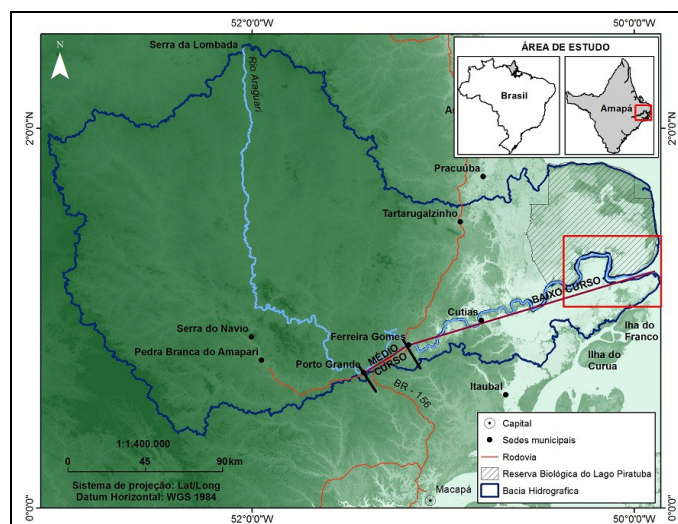


Figura 01 – Mapa do Estado do Amapá, em destaque a localização da região da área de estudo entre os municípios de Amapá e Cutias.

Fonte: Imagem-base e bacia hidrográfica extraída dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de fevereiro de 2000; sedes municipais (IBGE, 2010).

Foram utilizadas quatro imagens de satélite Landsat e amostras de sedimentos em suspensão dos anos de 2008, 2012, 2013 e 2014. As imagens são provenientes do banco de dados do United States Geological Survey (USGS) e correspondem a órbita/ponto 225/059.

Para tornar viável a correlação entre as imagens e a coleta dos dados *in situ* foram adotados os seguintes critérios para escolha das datas e pontos de validação de campo:

- CSS: coletados em mesma situação de maré das imagens (vazante ou enchente) e mesmo ciclo lunar (quadratura ou sizígia).
- Imagens de satélite: a) limiar de diferença temporal de 10 dias entre dado *in situ* e a imagem (Tabela 01), a fim de abranger o ciclo quinzenal da maré (quadratura e sizígia) e o intervalo de imageamento (16 dias).

No processamento foi realizada a correção atmosférica para recuperar os valores de reflectância da superfície, aplicando o modelo de transferência de radiação, o MODTRAN4 (BERK *et al.*, 1989) utilizando o aplicativo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), no programa ENVI 5.1. O co-registro entre as cenas foi realizado através do aplicativo *registric automatic*, no mesmo programa, para ajustar o posicionamento dos pixels entre as cenas, através do método imagem-imagem (JENSEN,

1986). A imagem de 2014 foi tomada como imagem-base. O erro médio quadrático (*Root-mean square error* – RMS) obtido foi de 0,02 m (Tabela 02).

Tabela 01 – Relação dos dados e cenas Landsat selecionados para o estudo.

Data de campo	Data da imagem	Hora da passagem	Órbita / Ponto	Sensor	Banda	Faixas espectrais (mm)	Condição ambiental
27/10/2008	31/10/2008	13:18:24	255/59	TM	3	0,66-0,06	Enchente (sizígia)
01/12/2012	05/12/2012	13:30:24	255/59	ETM	3	0,63-0,69	Vazante (sizígia)
07/11/2013	29/10/2013	13:36:22	255/59	OLI	4	0,64-0,67	Vazante (quadratura)
26/09/2014	30/09/2014	13:34:48	255/59	OLI	4	0,64-0,67	Vazante (sizígia)

Fonte: Fernandes e Azevedo (2008), dados de campo do projeto AMASIS (2008) e AMASTRAT (2012 – 2014), metadados das imagens provenientes da USGS (2008, 2012-2014), tábua de maré (DHN 2008, 2012-2014).

Tabela 02: RMS resultante do co-registro entre cenas.

Imagem	Número de pontos	X (pixel)	Y (pixel)	RMS
Landsat 5 TM	4	30	30	0,02
Landsat 6ETM	4	30	30	0,02
Landsat 8 OLI	4	30	30	0,02

Máscaras individuais foram elaboradas para isolar os cursos d'água nas imagens e melhorar o desempenho do algoritmo e o tempo de processamento. A linha de contorno foi extraída usando como marcador o limite entre a linha d'água e a zona de intermaré, ou com a vegetação. As nuvens e sombras foram extraídas a partir de classificação supervisionada através do algoritmo K-NN (*K-nearest Neighbor*), no programa ENVI 5.1.

Para estimar a CSS nas imagens foi utilizado o algoritmo empírico proposto por Montanher *et al.* (2014), desenvolvido para aplicação nos rios de água branca, na bacia amazônica. O algoritmo foi aplicado sobre a região do vermelho, do espectro eletromagnético através do aplicativo *Raster Calculator*, disponível no programa *Arcgis* 9.3 (Equação 1)

$$y = 0,4906x + 85,003 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,5636$$

Onde y é o valor de concentração estimado, x é o dado de reflectância da imagem, r^2 é o valor do coeficiente de determinação.

A validação dos dados foi realizada através da comparação dos valores de CSS extraídos das amostras coletadas *in situ* e os valores estimados nas imagens, com exceção da imagem de 2008 que apresentou muitas nuvens nas áreas amostradas. Dois coeficientes foram utilizados nas análises estatísticas: o de correlação (r) e o de determinação (r^2).

Para a correlação, entre os resultados das estimativas nas imagens, os mapas de CSS foram gerados em escala de cores com intervalos de 100 mg/L para os valores inferiores a 1.000 mg/L, e em intervalos de 200 mg/L, para os valores superiores a 1.000 mg/L.

Para facilitar a análise dos resultados, a área foi subdividida em quatro setores, definidos a partir de estudos anteriores: ERA1 corresponde a região leste do estuário, ERA2 a área central, ERA3 a foz estuarina, e ERA4 o igarapé Urucurituba.

3. Resultados e Discussão

Os resultados mostram que o padrão de distribuição dos sedimentos estimados variou durante o período de estudo, com aumento da CSS nos setores ERA2 e ERA 4 (Tabela 03).

Tabela 03 - Distribuição dos valores de sedimentos estimados nas em imagens de satélite Landsat no estuário do rio Araguari.

Data da imagem	Condição ambiental	Valores de CSS	Área com menor concentração	Área com maior concentração
31/10/2008	Enchente	119 a 2.853	ERA1	ERA3
05/12/2012	Vazante	85 a 2.116	ERA1	ERA3 e ERA2
29/10/2013	Vazante	85 a 2.116	ERA1	ERA3 e ERA4
30/09/2014	Vazante	85 a 3.502	ERA1	ERA2 e ERA4

Na imagem de 2008, adquirida em situação de enchente em maré de sizígia, se observa maior concentração de sedimentos no setor ERA3, com valores acima de 1000 mg/L. Para sul da foz do estuário, os valores de CSS estimados são menores (Figura 02a). Nos setores ERA 2 e ERA 1, observa-se a menor presença de materiais em suspensão.

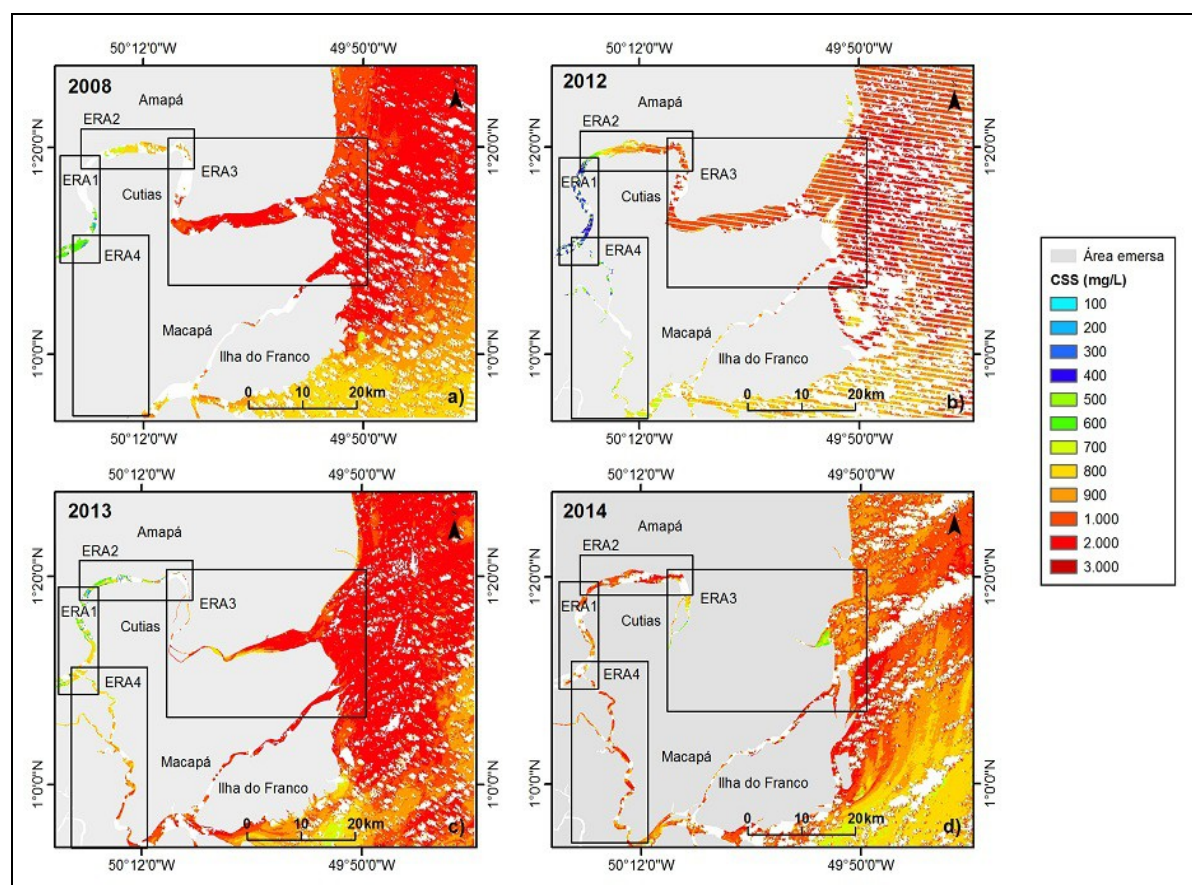


Figura 02 - Mapa de sedimentos estimados através de imagens Landsat no estuário rio Araguari: 2008 (a), 2012 (b), 2013 (c) e 2014(d).

Na imagem de 2012, adquirida na vazante na maré de sizígia, a maior CSS foi encontrada no setor ERA3 (foz do estuário). No setor ERA 4, na desembocadura do canal do Urucurituba com o Amazonas, houve aumento na CSS, quando comparado com o ano de 2008 (Figura 02b). No setor ERA 1 a CSS foi menor do que observado no ano de 2008 (Figura 02a e b).

Na imagem de 2013, obtida durante a vazante em maré de quadratura, observa-se a maior CSS no setor ERA3, e um aumento na CSS no canal Urucurituba (setor ERA4), em relação a imagem de 2012. No interior do estuário, os sedimentos apresentam maior concentração no setor ERA1, próximo a desembocadura do canal do Urucurituba, no rio Araguari.

Em 2014, a imagem adquirida durante a vazante, em maré de sizígia, não é possível determinar a CSS na foz do estuário, pois o mesmo encontrava-se em processo de fechamento (Santos *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016). Nota-se maior CSS nos setores ERA2, ERA 1 e ERA4, destacando maior concentração no setor ERA 2. Na foz do antigo canal estuarino, mais a leste do setor ERA 3, observa-se que houve uma diminuição na CSS.

Os resultados apresentados diferem da distribuição normal encontrada nos ambientes estuarinos descritos por Falcão Filho (2010), Lorenzetti *et al.* (2007), Esch e Sartori Neto (2013). Pois, espera-se maiores concentrações de material inorgânico para dentro dos estuários do que na região oceânica, devido principalmente às desagregações das partículas ao longo dos cursos dos rios (PICKARD e EMERY, 1990).

O estuário do rio Araguari não apresentou o mesmo comportamento, por estar propício ao aporte do rio Amazonas conforme já discutido nos trabalhos de Laut *et al.* (2010) e Santos (2006).

Entre o período de 2008 a 2013, notou-se constantemente maior CSS no setor ERA 3. Este é o mesmo setor onde ocorreu o fechamento do estuário conforme Santos *et al.* (2016).

As estimativas de concentração obtidas pelo algoritmo empírico global, na série de dados analisados, apresentou uma boa correlação em relação as amostragens *in situ*. Apesar de o algoritmo superestimar os valores de sedimentos em relação as amostras coletadas, apresentando RMS acima de 400 mg/L, observou-se uma coerência entre a distribuição temporal e espacial da CSS com as amostragens realizadas em campo (Tabela 03).

Tabela 03 – Parâmetros estatísticos calculados (r , r^2 e RMS) a partir dos valores de CSS extraídos das amostragens *in situ* e dos estimados nas imagens de satélite para os anos de 2012, 2013 e 2014.

Ano	r	r^2	RMS (mg/L)
2012	0,88	0,78	622,28
2013	0,99	0,99	508,30
2014	0,94	0,89	476,66

4. Conclusões

Houve um aumento significativo de sedimentos para o interior no estuário, devido o fluxo de sedimentos vindo do rio Amazonas pelo Canal do Urucurituba. O mapeamento da distribuição na CSS evidenciaram as mudanças na distribuição espacial e temporal dos sedimentos que as imagens estejam em situações distintas de marés.

O algoritmo usado para estimar os dados de concentração nas imagens Landsat apresentou boa correlação com as amostras coletadas *in situ*, apesar dos erros nas estimativas.

É necessário continuar esse tipo de análise na região, para a compreensão da influência dos processos sedimentares e hidrodinâmicos nas transformações dos ecossistemas costeiros, que são influenciados pelos sedimentos do rio Amazonas.

Agradecimentos

À Rede 05 N/NE-PETROMAR, pelo apoio financeiro. Ao IEPA/NuPAq pela infraestrutura disponibilizada dos laboratórios de sensoriamento remoto – LASA – e de águas e sedimentos – DGAS. Trabalho de Conclusão de Curso, Ciências Ambientais/UNIFAP.

Referências Bibliográficas

- Barbosa, C. C. F. Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. 2005. 281 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- Berk, A.; Bernstein, L. S, Robertson. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN7. Air Force Geophys. Lab, Bedford, MA, 1989. Rep. GL-TR89-01.
- DHN. Tábuas de marés dos anos de 2008, 2012, 2013 e 2014. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>. Acessado em setembro de 2015.

- Esch, K. F.; Sartori Neto, A. S. Análise histórica da pluma de sedimentos do rio Paraíba do Sul utilizando dados orbitais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5397-5404.
- Fernandes, E. F.; Azevedo, R. C. J. Relatório de campo do projeto AMASIS: parâmetros físico-químicos da qualidade da água. Macapá: IEPA, 2008.
- Falcão Filho, C. A. T. **Deteção da pluma sedimentar na costa do cacau, Bahia, Brasil, em uma imagem Landsat TM**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ILHÉUS. 2010.
- Froidefond, J.M.; Lahet, C. Hu, D. Doxaran, D. Guiral, M. T. Prost & J.-F. Ternon. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. *Marine Geology*, n. 208, p. 153-168. 2004.
- Froidefond J.M.; Lahet F.; Hu C.; Doxaran D.; Guiral D.; Prost M.T., Ternon J.F., 2004. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana, *Marine Geology*, 208, 153-168.
- Gensac, Erwan, et al. Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. *Continental Shelf Research*. n. 118. p. 49-62, 2016.
- Herz, R. Processus de dispersion des sediments en suspension transportes para les eaux cotieres de Barra Norte fleuve Amazone, Bresil. In: Prost, M.T. (ed.), *Évolution des littoraux de Guyane et de la Zone Caraïbe Méridionale pendant le Quaternaire, Cayenne (Guyane)*, ORSTOM Editions. pp. 265-280, 1990.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sedes municipais. Disponível em: <<http://ibge.com.br>>. Acesso em: 28.mar.2014.
- Landsat 5 Thematic Mapper (TM). Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov>>. Acesso em: 24.mar.2014.
- Landsat 6 Enhanced Thematic Mapper (ETM). <<http://landsat.usgs.gov>>. Acesso em: 24.mar.2014
- Landsat 8 Operational Land Imager (OLI). <<http://landsat.usgs.gov>>. Acesso em: 24.mar.2014
- Laut, L. L. M.; Ferreira, D. E. S.; Santos, V. F.; Figueiredo Jr, A. G.; Carvalho, M. A.; Silveira, O. F. M. Foraminifera, Thecamoebians and Palynomorphs as Hydrodynamic Indicators in Araguari Estuary, Amazonian Coast, Amapá State ? Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impreso)*, v. 33, p. 52-65, 2010.
- Lahet, F.; Polidori, L & Petit, M. 2002. Apports de l'imagerie Spot-HRV pour le suivi de la zona cotiere sous l'influence de l'Amazone. In: VI Workshop ECOLAB: Ecossistemas Costeiros Amazônicos. Belém, MPEG, Cd-Rom.
- Lorenzetti, J. A.; Negri, E.; Knopers, B.; Medeiros, P. R. P. Uso de imagens Landsat como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3429-3436.
- Jensen, J. R. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1986.
- Martinez, J. M, Filizola, N., Guyot, J. L., Sondag, F. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Journal Elsevier*. n. 79. p. 257-264. 2009.
- Menezes, P. H. B. J. Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de três Marias – MG. 2013. 130 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- Montanher, O. C.; Novo, E. M.; Barbosa, C. C.; Rennó, C. D.; Silva, T. S.. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. v 29, p. 67-77, 2014.
- Pickard, G. L.; Emery, W. J. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1990. 336 p.
- Rosario, E. S. Análise da Dinâmica dos Sedimentos em Suspensão através de dados de sensores remotos, Estuário do rio Araguari, AP. 2016. Monografia. (Graduação em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Amapá, Amapá, 2016.
- Rudorff, C. M. et al. Avaliação de algoritmos bio-ótico em massas d'água amazônicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 431-438.
- Santos, V. F.; Figueiredo Jr., A. G.; Silveira, O. F. M.; Polidori, L.; Oliveira, D. M.; Dias, M. B.; Santana, L. O. Processos Sedimentares em áreas de macro-marés influenciados pela pororoca - estuário do rio Araguari-Amapá-Brasil. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), 10., 2005, Guarapari. **Anais...** Guarapari: ABEQUA, 2005.
- Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 2000.
- Santos, V.F. *Ambientes Costeiros Amazônicos: Avaliação de Modificações Ambientais por Sensoriamento Remoto*. 2006. 306 p. Phd Thesis - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.
- Vantrepotte, V.; Gensac E.; Loisel H.; Gardel A.; Dessailly D.; Mériaux X.. Satellite assessment of the coupling between in water suspended particulate matter and mud banks dynamics over the French Guiana coastal domain. *Journal of South American Earth Sciences*, n. 44, p. 25-34, 2013.