



Mapeamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas no Oceano Atlântico por técnicas de Sensoriamento Remoto

Diogo de Jesus Amore¹
João Felipe Cardoso dos Santos¹
Daniel Schaffer Ferreira Jorge¹
Milton Kampel¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{amore,joaofcs,danielsfj,milton}@dsr.inpe.br

Abstract. The distribution of optically active constituents (OACs) in the Amazon River plume is investigated in the Western Tropical North Atlantic Ocean (WTNA). In situ radiometric data were collected in the study area for the generation of reference spectra in the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm via a k-means classification method. Bio-optical data (absorbance, m^{-1}) were collected for quantification of phytoplankton, detritus, and chromophoric dissolved organic matter absorption coefficients. MODIS/*Aqua* remote sensing reflectance data at eight band intervals were acquired and used as test spectra in the SAM algorithm. Ternary plots allowed the characterization of each k-means-generated class according to their ubiquitous OACs. An histogram of percentual coverage was generated to evaluate the area of influence that each class had over the plume evolution. Out of the six classes generated via k-means, and classified via SAM, four were considered mostly relevant. The four classes represented well the main variability of the plume from the coastline (or river mouth) to the interior of WTNA. Absorbance data validated the ternary plot distribution results which indicated that towards the shore more sediment-laden waters are found, followed by more CDOM concentration in a mid-distance range, and phytoplankton-dominated waters at farther distances or under major oceanic currents regime. The histogram plot is in accordance with low and high flow periods of the Amazon River showing higher discharge during summer (around August) and lower discharge during winter (around February). The SAM algorithm proved useful for the river plume constituent classification, and further studies are encouraged to use meteorological data (such as wind vectors and precipitation data) to better quantify the relationships between the Amazon River discharge and the plume characteristics.

Palavras-chaves: pluma do Rio Amazonas, SAM, constituintes opticamente ativos; Amazon river plume, SAM, Optically active constituents

1. Introdução

O Rio Amazonas é o mais caudaloso do mundo contribuindo com aproximadamente 30% de toda água doce desaguada nos oceanos (Wisser et al., 2010). A vazão média na foz do Rio Amazonas é da ordem $186 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, considerando as vazões médias dos Rios Amazonas, Tapajós e Xingu, de acordo com as séries históricas dos respectivos rios, disponibilizadas pela Agência Nacional das Águas (ANA). Filizola (2011) tendo como base campanhas de amostragem hidrossedimentométrica efetuadas no âmbito do Projeto Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica, mostra que o aporte de sedimentos do Rio Amazonas no Oceano Atlântico é da ordem de $600 \text{ a } 800 \times 10^6 \text{ ton.ano}^{-1}$. Cerca de 90% dos sedimentos é composto, principalmente, de frações silte e argila.

Devido a descarga do Rio Amazonas no Equador, e na fronteira oeste do oceano, suas águas estão condicionadas por barreiras energéticas associadas com a Corrente Norte do Brasil (CNB), Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE), e a Corrente da Guiana (CG). Assim, sua dispersão interfere diretamente na distribuição fitoplanctônica e produção primária (Smith e Demaster, 1996); na deposição costeira, na captura de carbono e nutrientes, nas propriedades ópticas e cor do oceano (Hu et al., 2004; Del Vecchio e Subramaniam, 2004). A região da pluma do Rio Amazonas é caracterizada pela grande quantidade de matéria orgânica e sedimentos, sejam eles particulados ou

dissolvidos que, juntamente ao espalhamento da luz no corpo hídrico, geram características hidrofísicas que podem ser relacionadas à cor das águas (Moller et al., 2010; IOCCG, 2000). Os constituintes opticamente ativos (COAs) da água, fitoplâncton, material particulado orgânico e inorgânico e matéria orgânica dissolvida colorida interagem com a radiação eletromagnética incidente no corpo hídrico e alteram as características espectrais de sistemas aquáticos de modo particular para cada COA (Kirk, 1994). Conseqüentemente, o comportamento espectral particular dependente da presença e concentração dos COAs permite a classificação das massas de água opticamente diferenciáveis, como exemplificado por estudos em outros corpos hídricos (Liham et al., 2008).

Dada as dimensões espaciais e variabilidade temporal da pluma do Rio Amazonas, o sensoriamento remoto é o meio mais eficaz de monitorar toda sua extensão de forma sinóptica (Hu et al., 2004). Para corroborar tal monitoramento, este estudo determinou a hipótese de que o classificador *Spectral Angle Mapping* (SAM) é eficaz na discriminação dos COAs presentes na pluma do Rio Amazonas.. Este trabalho tem como objetivos: (i) identificar as massas de água opticamente diferenciáveis utilizando a assinatura espectral de dados *in situ* para a classificação de imagens de satélite através da técnica SAM; (ii) avaliar o desempenho da classificação SAM através da interpretação dos resultados; (iii) caracterizar a dispersão da pluma do Rio Amazonas com base nos processos meteoceanográficos que ocorrem local e remotamente no tempo e espaço.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de Estudo

A pluma do Rio Amazonas estende-se por toda a região da Plataforma Continental Amazônica (PCA) e desloca-se para noroeste, penetrando mais de 1000 km no Atlântico Norte (Muller-Karger *et al.*, 1988), sendo transportada pela Corrente Norte Equatorial (CNE) e pela CNB. Duas feições características da pluma podem ser observadas: cerca de 70% da água da pluma do Rio Amazonas que alcança 3°N-10°N é transportada para leste pela retroflexão da Corrente Norte do Brasil ou pela Contra Corrente Equatorial (CCE) no segundo semestre do ano, ocorrendo mais intensamente por volta do mês de Setembro (Figura 1a,c); os restantes 30% da pluma são transportados de leste à noroeste em direção ao Caribe pelo encontro da CNB com a Corrente das Guianas (CG), ocorrendo mais intensamente por volta do mês de Abril (Figura 1a,b) (Salisbury et al., 2011). Para estudar a dispersão da pluma do Rio Amazonas no presente estudo foi selecionada a porção do Oceano Atlântico compreendida entre as coordenadas 17°N-5°S e 60°O-40°O.

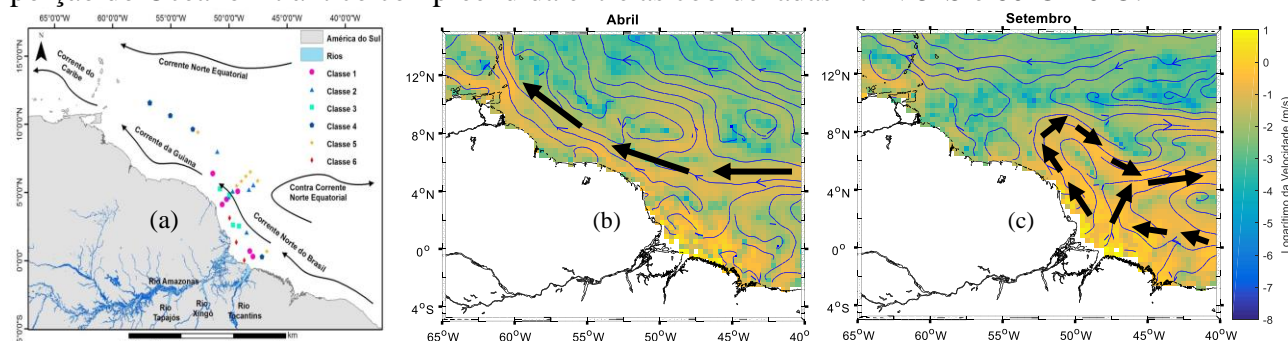


Figura 1. (a) Área de estudo referente à pluma do Rio Amazonas. As estações oceanográficas de coleta estão representadas por símbolos; (b) Mapa do mês de Abril demonstrando a tendência de formação de um corredor da CNB e CG, e (c) Mapa do mês de Setembro demonstrando a tendência de formação da retroflexão causada pela CNB e CCNE (ver texto para siglas).

2.2. Dados *In Situ*

2.2.1. Dados Bio-ópticos

Amostras superficiais de água foram coletadas em duas épocas distintas, de 04 a 12 de agosto de 2009 a bordo do NOc Antares H40 da Marinha do Brasil e de 14 a 26 de julho de 2012 a bordo do R/V Atlantis do Instituto Oceanográfico Woods Hole (EUA). As amostras foram analisadas seguindo os protocolos sugeridos por Mitchell et al., (2000) e Mueller et al., (2003) para a determinação das propriedades de absorção dos COAs. As análises foram feitas a bordo do navio R/V Atlantis na campanha de 2012 e realizadas no Laboratório de Produção Primária da Universidade de São Paulo na campanha de 2009.

2.2.2. Dados Radiométricos

Em cada estação amostral foram obtidas medidas radiométricas da superfície do mar com uso do radiômetro portátil FieldSpec HandHeld® (ASD Inc.) com resolução espectral de 1 nm. A aquisição dos espectros de radiância seguiu a metodologia sugerida por Kampel et al., (2009) adaptada de Mobley (1999). As medidas de radiância espectral foram, então, convertidas em reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) seguindo o protocolo sugerido em Mobley (1999). Pelo fato das análises neste estudo visarem classificar os formatos espectrais da R_{rs} ao invés da sua magnitude, todos os espectros de R_{rs} utilizados na análise de agrupamento *k-médias* e no classificador SAM foram normalizados pelo valor de R_{rs} em 551 nm, região espectral em que variações da R_{rs} no oceano aberto são geralmente pequenas.

2.3. Dados de Sensoriamento Remoto

Dados de R_{rs} foram adquiridos do sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo do satélite *Aqua*, disponibilizados através do sítio na Internet *OceanColor data* (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>), referentes ao período de 2010/01 a 2014/09. Foram adquiridos dados em nível 3 de processamento e resolução espacial de 4 km nas bandas de 412 nm, 443 nm, 469 nm, 488 nm, 531nm, 547 nm, 555 nm, 645 nm, 667 nm e 678 nm. O uso destes comprimentos de ondas foi devido às suas relevâncias na caracterização espectral dos alvos na área de estudo (LEE et al., 2007).

2.4. Mapeamento do Ângulo Espectral (SAM)

O objetivo desta análise é determinar o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas a partir das imagens MODIS e espectros de referência disponíveis em uma biblioteca espectral (Carvalho et al., 2003). A análise do mapeamento do ângulo espectral é realizada por meio de um algoritmo que determina a similaridade espectral entre dois espectros, ou seja, calcula o ângulo entre eles em todas as bandas espectrais, considerando os espectros como vetores em um espaço de dimensionalidade igual ao número de bandas espectrais. Desse modo, os valores de R_{rs} dos pixels da imagem de interesse foram classificados a partir do menor ângulo entre seus valores e os dos espectros de referência normalizados.

A priori, uma análise de agrupamento pelo método *k-médias* (Steinhaus, 1956) foi aplicada nos dados coletados *in situ* para identificar os espectros a serem utilizados como referência no algoritmo SAM. Os comprimentos de onda dos dados hiperespectrais *in situ* foram reamostrados utilizando a função resposta do sensor MODIS de modo que houvesse correspondência entre as curvas espectrais originadas de dados orbitais e dados *in situ*.

2.5. Análise de Frequência

Após gerar as classes espectrais pelo *k-média* uma análise de frequência de ocorrência de cada classe foi efetuada. Essa análise foi realizada calculando-se a ocorrência de cada classe para

cada pixel da área de estudo. Um histograma de barras cumulativo foi gerado para demonstrar o padrão percentual de cobertura das classes para cada mês ao longo dos anos investigados.

2.6. Reclassificação empírica

As classes geradas pelo algoritmo SAM foram reavaliadas de duas maneiras para serem recaracterizadas com maior representatividade. O primeiro modo foi uma análise visual dos mapas de frequência gerados. O segundo modo foi a utilização de dados de absorvância (m^{-1}) medidos *in situ*. A absorvância dos constituintes bióticos detritos (DETRITO), fitoplâncton (FITO) e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) foi analisada no comprimento de onda 443 nm como sugerido por Mobley (1999). Esta análise permitiu determinar o percentual relativo de cada constituinte em cada classe.

3. Resultados e Discussão

O resultado do agrupamento pelo *k-médias* para os espectros *in situ* pode ser observado na Figura 2 com os valores de R_{rs} normalizados (nR_{rs}) em 551 nm. Seis classes (Figura 2) foram geradas e avaliadas como candidatas à representação dos COAs (ou seja, água pura, detritos, matéria orgânica, e fitoplâncton) característicos no estudo de óptica hidrológica. As seis classes obtidas pelo *k-médias* foram, então, reduzidas a quatro com base nas características de distribuição espacial observadas na Figura 3, da seguinte forma: classe 1 e 3 (Classe X), classe 2 e 4 (Classe Y), classe 5 (Classe W), e classe 6 (Classe Z). Na Figura 3, as seis classes foram mantidas para a comparação delas com seus respectivos espectros selecionados pelo *k-médias* (Figura 2). Por fim, a partir do reagrupamento de classes, a interpretação das imagens deu-se em torno das quatro novas classes (X, Y, W, Z).

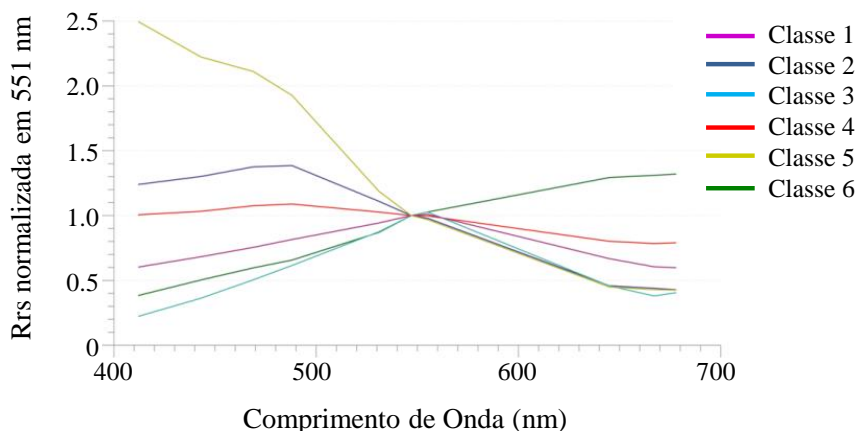


Figura 2. Classes dos espectros de referência da reflectância de sensoriamento remoto *in situ* normalizados em 551 nm gerados pelo algoritmo *k-médias*.

A tabela de cores utilizada na Figura 3 representa as frequências com as quais as classes foram identificadas em cada pixel ao longo da série temporal de imagens MODIS/Aqua. Notar diferença na amplitude dos valores nas tabelas de cores da Figura 3 utilizadas em cada classe para efeito de realce visual. Observou-se, também, que regiões próximas à foz do Rio Amazonas não possuíam pixels válidos no produto MODIS/Aqua para interpretação da classificação. A alta concentração de sedimentos reduz a eficiência da correção atmosférica na geração do produto MODIS/Aqua para a região próxima à foz (Ruddick et al, 2000).

Com o distanciamento da costa, a classe Z deixou de ser predominante, e a classe X tornou-se mais evidente. A maior frequência das classes passa a ser encontrada na direção noroeste seguindo o sentido preferencial da CNE, porém mantendo-se relativamente próxima à região costeira devido à presença de sedimento (Figura 3c). Para a classe X notou-se, também, uma baixa frequência de pixels com um grande distanciamento da costa. Pode-se interpretar esse fenômeno como a porção dos constituintes dissolvidos nessa massa d'água ainda não depositados. Dessa maneira, o constituinte que caracterizou a ligeira expansão da classe X na direção noroeste foi o CDOM, porém em baixa frequência (Figura 3c). Esse efeito de ocorrência de maiores frequências de pixels numa região espacial mais centralizada de uma determinada classe não é restrito à classe X, e pode variar de acordo com a concentração dos constituintes presentes na classe.

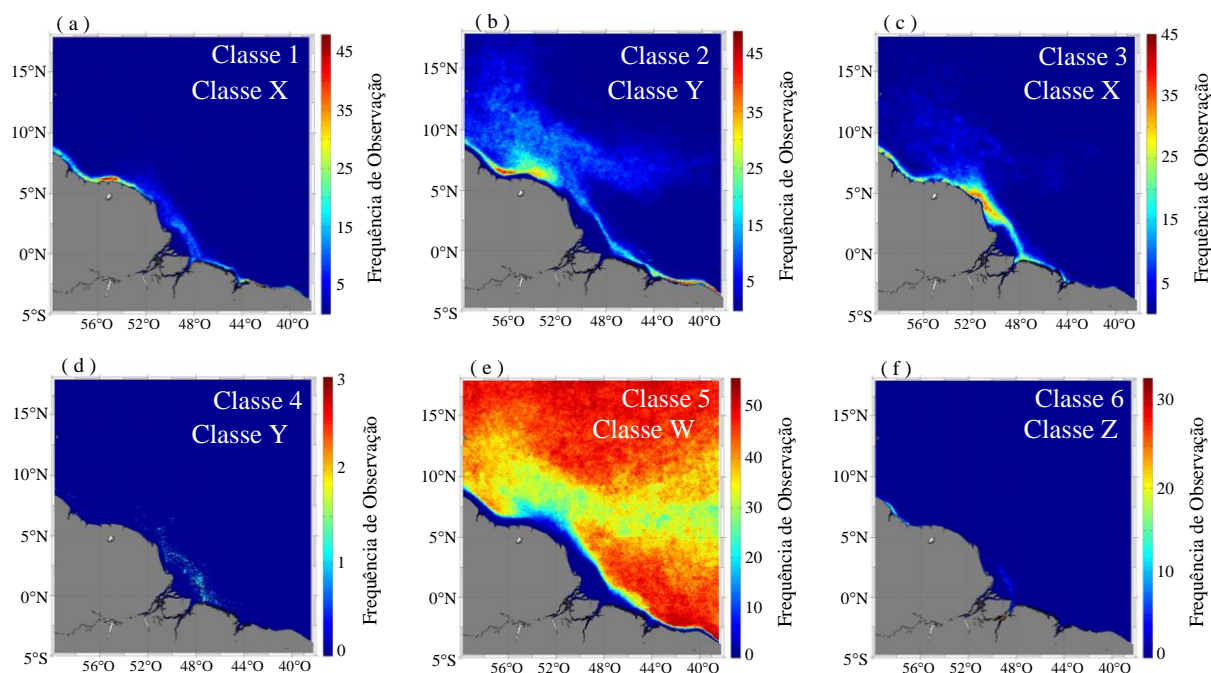


Figura 3. Distribuição espacial e frequência de observação das classes geradas pelo *k*-médias e classificadas pelo SAM observadas nas imagens MODIS/Aqua no período de janeiro de 2010 a agosto de 2014.

A partir disso, pode-se observar que a classe Y continua percorrendo a região litorânea, dada a presença de sedimentos nessa classe, porém em menor concentração em relação à classe X (Figura 4). Essa menor concentração permitiu o contínuo deslocamento desse corpo d'água na direção noroeste da costa brasileira. Contudo, nota-se nessa classe a maior frequência de pixels classificados distantes da costa na direção norte e leste. Esta dispersão é resultado da retroflexão da pluma associada à CCE e concorda com Hu et al. (2004). Como na classe X o constituinte CDOM está relacionado com essa frequência de classificação da classe Y (Figura 3b). Esse fenômeno dá-se pela maior concentração de CDOM em relação a de detritos, possibilitando a classificação dessa classe àquela distância.

A classe W pode ser considerada como a classe associada à água pura sem influência significativa dos outros COAs como observado na Figura 2 dado que seu valor de nR_{rs} em torno de 440 é significativamente maior que o das outras classes. Esta classe foi classificada na região sudeste da área de estudo devido à influência da CNB. Essa corrente atua sobre a pluma do Rio

Amazonas transportando parte das águas na direção noroeste. Assim, a região sudeste manteve-se sem grande aporte de partículas provenientes da pluma. Essa ação da CNB permite que a região sudeste da costa não tenha a presença de particulados em suspensão e CDOM. A classe W também apresenta uma alta frequência de classificação nas regiões mais distantes da costa na direção norte. Isso ocorre devido a CCNE que redireciona a pluma da região noroeste para a região leste novamente.

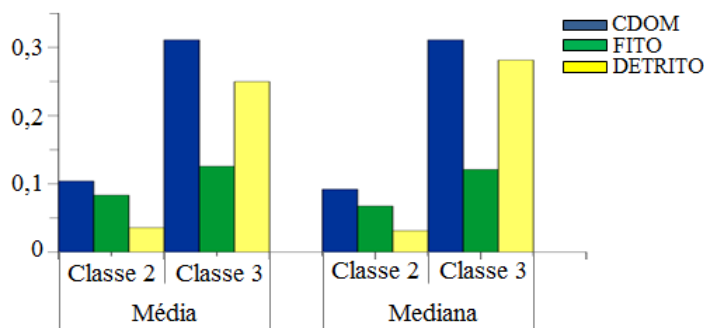


Figura 4. Histograma de absorvância absoluta (m^{-1}) das classes 2 (classe Y) e 3 (classe X).

Na Figura 5, pode-se observar como essas águas migram de águas de Caso 2 (águas cujas concentrações de detrito e CDOM não covariam com as de fitoplâncton) para águas de Caso 1 (águas cujas concentrações de detrito e CDOM covariam com as de fitoplâncton). Essa migração das classes entre tipos de águas está em concordância com o esperado para águas interiores e costeiras (tipicamente Caso 2), e águas oceânicas (tipicamente Caso 1) (IOCCG, 2000).

A Figura 6 mostra o resultado do histograma de frequência das classes ao longo da série temporal. Pode-se observar um aspecto cíclico anual na evolução da pluma. Esse ciclo indica que a descarga do Rio no oceano ocorre em pulsos anuais com pico de máximo por volta do mês de junho, e mínimo por volta do mês de dezembro. Este padrão está de acordo com altas descargas observadas no verão boreal (agosto) e baixas no inverno (fevereiro) (Del Vecchio e Subramaniam, 2004; Molleri et al., 2010).

Os padrões das classes Y (Figura 3d) e Z (Figura 3f) não são visualmente perceptíveis no histograma devido a baixa frequência temporal dessas classes nas imagens. A classe W apresenta a maior porcentagem de cobertura mensal. Isso está relacionado com a distância em que esta classe está da costa, de maneira a cobrir uma maior proporção da faixa oceânica nas imagens. Na Figura 3b, observa-se que a classe Y apresenta a segunda maior cobertura nas imagens mensais por possuir o segundo maior alcance espacial em direção a oceano aberto, seguida pela classe X.

Nota-se na Figura 6 que a classe X (Figuras 3a e 3c) tende a atingir um valor máximo de porcentagem de cobertura por volta de um mês antes da classe Y (Figuras 3b e 3d). Como observado nas Figuras 5 e 6, a classe X possui uma maior concentração de detrito em relação ao CDOM do que a classe Y. Portanto, uma possível explicação para este atraso (*lag*) de um mês seria a densidade do detrito na massa d'água que, por ser maior que a do CDOM, desacelera a velocidade da partícula no corpo hídrico (Imberger, 1994), e, concomitantemente, acelera o processo de deposição dos sedimentos em relação ao CDOM. Esse processo faz com que a classe X (com mais detrito) atinja um menor alcance espacial no oceano, e sua presença, portanto, é detectada menos frequentemente. Outra explicação seria a de que os dois constituintes (detritos e CDOM) alcançariam a foz ao mesmo tempo, porém o *lag* observado representa o maior tempo que o CDOM



leva para ser transportado para regiões mais distantes (Bowden, 1983), possibilitando uma frequência espacial maior ao contabilizar-se os meses subsequentes.

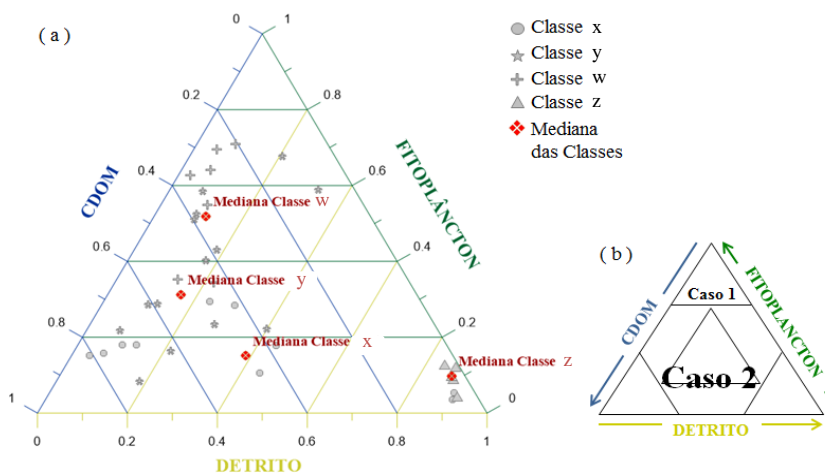


Figura 5. (a) Gráfico ternário de distribuição das classes de acordo com a porcentagem relativa dos respectivos COAs. (b) Região definida como Caso 1 seriam estações de amostragem onde o FITO corresponde ao principal constituinte óptico. Caso 2 compreenderiam as estações em que há heterogeneidade nos constituintes. (Adaptado de IOCCG, 2000).

Na Figura 6 nota-se um pico maior na proporção de cobertura de pixels para as classes 1, 2 e 3 no ano de 2010. Concomitantemente, nesse ano houve um evento La Niña de nível forte. Zeng et al., (2006) concluiu para o ano de 2005 que logo após uma forte seca na Amazônia por conta de eventos El Niño, eventos La Niña ocasionaram condições úmidas anômalas recuperando a região da seca. Essas condições úmidas nos eventos La Niña em 2010 podem ter atuado sobre a descarga do rio, aumentando o aporte de material no oceano, gerando, portanto um maior pico na proporção de cobertura dos constituintes para aquele ano.

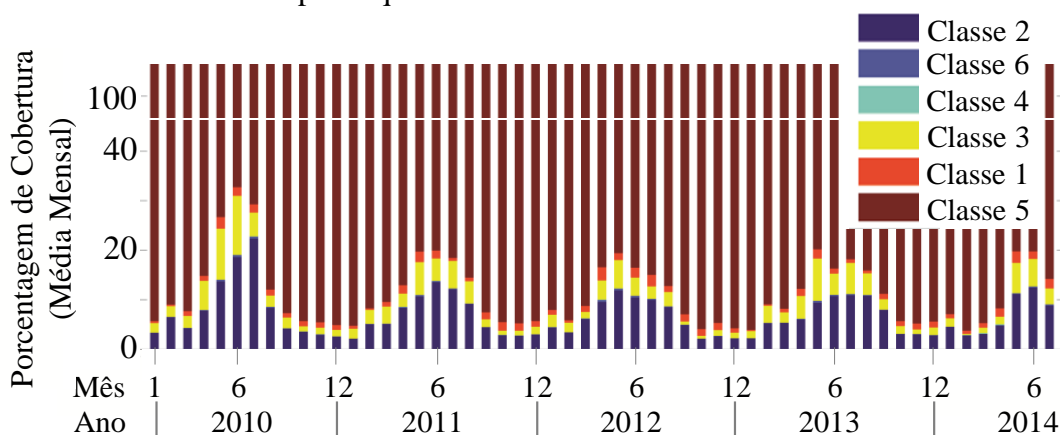


Figure 6: Histograma de porcentagem de cobertura de pixels em cada classe ao longo do período de estudo. Por clareza visual, as barras foram cortadas na altura de 40%.

3. Conclusão

A técnica SAM mostrou-se uma ferramenta de análise eficiente na caracterização das classes geradas pelo algoritmo *k-médias*, já que a assinatura espectral da R_{rs} classificada corroborou a discriminação dos COAs ao se utilizar dados obtidos *in situ* como referência. As quatro classes

originadas do reagrupamento apresentaram posições específicas no gráfico ternário caracterizando uma proporção de COAs bem definida para cada classe. Quanto mais próxima da região costeira, maior a presença de detritos em relação aos demais COAs, seguindo assim, a lógica de caracterização das classes como águas de Caso 2 evoluindo para Caso 1 mais longe da costa.

Por fim, recomenda-se a inclusão de dados meteorológicos, tais como direção de vento e precipitação, para que se possa comparar tais dados com as classes geradas no algoritmo de classificação. Isso permitirá avaliar a direcionalidade da expansão da pluma ao longo do oceano em função da direção do vento, e também, avaliar a magnitude de concentração dos constituintes da pluma ao longo da dispersão forçada pelo vento.

Agradecimentos

Agradecemos a bolsa de mestrado concedida pela CAPES para a realização deste estudo.

Referências

- Bowden, K. F. **Physical oceanography of coastal waters**. Ellis Horwood series in marine science, 1983. 302 p.
- Carvalho, J.C.; Barbosa, C.C.; Novo, E.M.; Mantovani, J.E.; Melack, J.; Pereira Filho, W. Applications of Quantitative Analysis Techniques to Monitor Water Quality of Curuai Lake, Brazil. In Proceedings of 2003 IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, (IGARSS'03), Toulouse, France, 21–25 July 2003; pp. 2362–2364
- Del Vecchio, R.; Subramaniam, A. Influence of the Amazon River on the surface optical properties of the Western Tropical North Atlantic Ocean. **J. Geophys. Res.**, v. 109, C11001, 2004.
- Filizola, N.; Guyot, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 566-576, 2011.
- Hu, C.; Montgomery, E. T.; Schmitt, R. W.; Muller-Karger F. E. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observation from space and S-PALACE floats. **Deep Sea Res.**, Part II, v. 51, p. 1151–1171, 2004.
- Imberger, J. Transport processes in lakes: A review. **Limnology Now: A New Paradigm of Planetary Problems**. 1994 IOCCG. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**. Dartmouth, report III, p. 140, 2000.
- Kampel, M.; Lorenzetti, J. A.; Bentz, C. M.; Nunes, R. A.; Paranhos, R.; Rudorff, F.M.; Politano, A. T. Simultaneous Measurements of Chlorophyll Concentration by Lidar, Fluorometry, above-Water Radiometry, and Ocean Color MODIS Images in the Southwestern Atlantic. **Sensors (Basel)**, v. 9, p. 528-541, 2009.
- Kirk, J.T.O., 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems, Second Edition, Cambridge Univ. Press.
- Lee, Z.P.; Carder, K.; Arnone, R.; He, M.X. Determination of Primary Spectral Bands for Remote Sensing of Aquatic Environments. **Sensors**, v.7, p.3428-3441, 2007.
- Lihan, T.; Saitoh, S. I.; Iida, T. Satellite measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 78, p. 237–249, 2008.
- Mobley, C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. **App. Opt.**, v. 38, p. 7442–7455, 1999.
- Moller, G. S. F.; Novo, E. M. L. M.; Kampel, M. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. **Continental Shelf Research**, v. 30, p. 342-352, 2010.
- Ruddick, K. G.; Ovidio, F.; Rijkeboer, M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. **Applied Optics**, v. 39, n. 6, p. 897-912, 2000.
- Salisbury, J.; Vandemark, D.; Campbell, J.; Hunt, C.; Wisser, D.; Reul, N.; Chapron, B. Spatial and temporal coherence between Amazon River discharge, salinity, and light absorption by colored organic carbon in western tropical Atlantic surface waters. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, C00H02, 2011.
- Steinhaus, H., 1956. Sur la division des corp materiels en parties. Bull. Acad. Polon. Sci. IV (C1.III), 801–804.
- Wisser, D.; Fekete, B. M.; Vörösmarty C. J.; Schumann, A. H. Reconstructing 20th century global hydrography: A contribution to the Global Terrestrial Network-Hydrology (GTN-H). **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 14, p. 1–24, 2010.
- Zeng, N.; Yoon, J.H.; Marengo, J.A.; Subramaniam, A.; Nobre, C.A.; Birkett, C.M. Causes and Impact of the 2005 Amazon Drought, **Environment Research Letters**, n.3, 2008.