

Avaliação de imagens WFI/CBERS-4 no estudo dos tipos de água da Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Mamirauá (AM).

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹

Vitor Souza Martins¹

Adriana Gomes Affonso¹

Otávio Cristiano Montanher²

Lino Augusto Sander de Carvalho¹

Claudio Clemente Farias Barbosa¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

{evlyn.novo, vitor.martins, claudio.barbosa}@inpe. br; {affonso,lino}@dsr.inpe. br

² Universidade Estadual de Maringá – UEM/GEMA

Avenida Colombo, 5790 - Bloco 024 - Bairro: Zona Sete

CEP: 87.020-900 – Maringá – PR, Brasil

otaviocmontanher@yahoo.com.br

Abstract. Satellite images are recognized as a data source for the monitoring of inland waters. Amazon Rivers have a seasonal dynamic influenced by the Amazon flood pulse. In this context, WFI/CBERS-4 sensor benefits the observation of Amazon due to high frequency acquisition (5 days) and wide swath (866 km) that contributes to overcome limitations of high cloud cover and large areas. In this paper, our objective is to investigate the seasonal water-leaving reflectance from WFI images over Japura and Solimões rivers. The results show seasonal water color variability between upstream, downstream of Japurá river and at its confluence with Solimões river. The existence of channel connecting Solimões and Japurá during high water levels (February to August) is responsible for a large input of sediments into Japurá river. At low water levels, optical properties of Japura river becomes more similar to those of floodplain lakes and rias, characterized by low concentration of inorganic suspended particles. Therefore, WFI images proved to be useful for the study of Amazon aquatic systems, specially, where wide swath observation and high temporal resolution are required to record water color dynamics.

Palavras-chave: WFI/CBERS-4; Mamirauá Sustainable Development Reserve, seasonal changes. water colour; Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, mudanças sazonais, cor da água.

1. Introdução

Os estudos de águas continentais aplicando dados de sensoriamento remoto (SR) enfrentam vários desafios (Palmer et al., 2014): 1) Os sensores detectam a integração das características óticas numa faixa da coluna d'água; 2) as propriedades óticas dos componentes óticamente ativos (COAs) apresentam similaridades em bandas espectrais amplas; 3) A frequência na cobertura de nuvens e a baixa frequência de revisita limitam o registro da variabilidade temporal; 4) A dinâmica espaço-temporal dos constituintes atmosféricos dificulta a correção atmosférica e a remoção dos seus efeitos da reflectância TOA; e 5) A escassa base de dados *in situ* limita a geração e validação de modelos.

Dentre os desafios, o monitoramento dos sistemas aquáticos na Amazônia via SR requer a aquisição de dados com maior frequência temporal e ampla faixa de observação devido à alta frequência de nuvens e grande extensão das áreas a serem monitoradas. Todas as limitações se devem à natureza do objeto de estudo. A primeira tem sido contornada com o uso de modelos que relacionam a composição da coluna d'água em seus primeiros metros com os perfis de concentração (Filizola, 2003). A segunda, pela disponibilidade crescente de dados hiperespectrais (Olmanson et al. 2013) cujo uso é limitado pela baixa frequência de aquisição. Para contornar a terceira limitação os satélites Terra e Aqua do programa EOS (Earth Observation System) contribuíram com a aquisição de imagens pelo sensor MODIS com frequência de ~ 1 a 2 dias. Apesar do aumento da frequência de aquisição, sua

resolução espacial representa séria limitação, sendo aplicável apenas em estudos de ampla escala. Esta é também a limitação da missão GOCI (Geostationary Ocean Color Imagery) (<http://kosc.kiost.ac/eng/>), que embora permita aquisição horária de imagens, tem resolução espacial de 500 metros (Choi et al. 2012, Huang et al., 2015). A European Space Agency (ESA) concebeu o programa Copernicus com lançamento de satélites da série Sentinel para estudos terrestres, como o monitoramento de ambientes aquáticos. Dentre os satélites, o Sentinel-2A lançado em 22 de junho de 2015 e o 2B previsto para 2017, visam aumentar a revisita para 5 dias, com alta resolução espacial, o que amplia a oportunidade de aquisição de dados sem cobertura de nuvens. (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>).

No Brasil, este problema teria sido superado com o satélite Amazônia-1, planejado com órbita polar baixa (quase-equatorial), frequência de revisita de 4 dias e resolução espacial em torno de 40m. O sensor AWFI (Advanced Wide Field Imager) do Amazônia-1 possibilitaria a aquisição instantânea de uma cena com 720 km de largura, o que garantiria a cobertura da calha do Solimões/Amazonas em território brasileiro com apenas 05 órbitas. Essa missão, entretanto, sofreu atrasos frustrando a disponibilidade de dados com resolução espacial alta, ampla faixa de cobertura, e alta de revisita (http://www.inpe.br/produtos_servicos/engenharia_satelites/amazonia1.php). A alternativa disponível, no momento, é fornecida pelas imagens WFI (Wide Field Imager) do satélite CBERS-4, lançado em 07/12/2014. A faixa imageada, entretanto, é mais ampla que a da AWFI, com 866 km de largura e, portanto, mais sujeita à distorção panorâmica, responsável pelo aumento do tamanho do pixel em direção às bordas, perpendicularmente à órbita. Segundo Silva (2007), imagens de sensores de amplo campo de visada com média e alta resolução estão mais sujeitas a distorções por variações de atitude e altura do satélite. Apesar dessas limitações, as imagens WFI recobrem a região do visível e infravermelho próximo e têm resolução radiométrica adequada para o estudo de um alvo de baixa radiância, como a água. Em face do exposto, o objetivo desse estudo é avaliar a aplicação das imagens WFI/CBERS-4 no estudo da variabilidade espacial e temporal das propriedades biogeoquímicas das águas amazônicas.

Para isso, selecionou-se uma área de estudo dentro da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM). A RDSM é um dos ambientes de florestas inundáveis mais bem preservados da calha do Solimões/Amazonas, com floresta praticamente intacta (<http://www.mamiraua.org.br/pt-br>). Sob o ponto de vista das propriedades da água, seus ambientes são classificados como águas brancas porque são alimentados pelo Solimões e Japurá, rios cujas nascentes se encontram nos Andes. Resultados de Affonso (2012), entretanto, indicam que existe grande variação sazonal na concentração de COAs. Na cheia, lagos e canais são dominados pela água do Solimões, mas na água baixa (seca) há grande variabilidade nas propriedades biogeoquímicas dos corpos d'água. Nesse sentido, a RDSM representa um ambiente favorável ao estudo do comportamento ótico de lagos ao longo do ano hidrológico e de sua resposta a variação do nível da água de seus rios principais. Além disso, a reserva é composta por um mosaico de rios, lagos e canais de dimensões em geral pequenas. Affonso (2012) relata que na área de manejo do Pirarucu dentro da RDSM, dos 104 lagos estudados, 34 % possuíam área igual ou inferior a 10 ha, ou seja, equivalente a menos que 24 pixels de 64 m x 64 m, a resolução espacial ao nadir da imagem WFI/CBERS-4. A dimensão dos lagos e sua forma, em geral alongada, representa um desafio à aplicação das imagens WFI, pois se forem úteis para RDSM, poderão ser aplicadas de forma mais ampla em outros ambientes aquáticos da Amazônia.

2. Área de Estudo

A área de estudo se localiza na RDSM, Estado do Amazonas, na planície dos rios Solimões e Japurá (Figura 1.a), em sua porção sul (Figura 1.b). É uma área formada por uma

planície de inundação sujeita à variação anual do nível da água de aproximadamente 12 m. Durante a cheia do Solimões, os canais, lagos e rios tornam-se conectados, enquanto na seca, somente os rios principais, alguns canais e lagos mais profundos se mantêm com água.

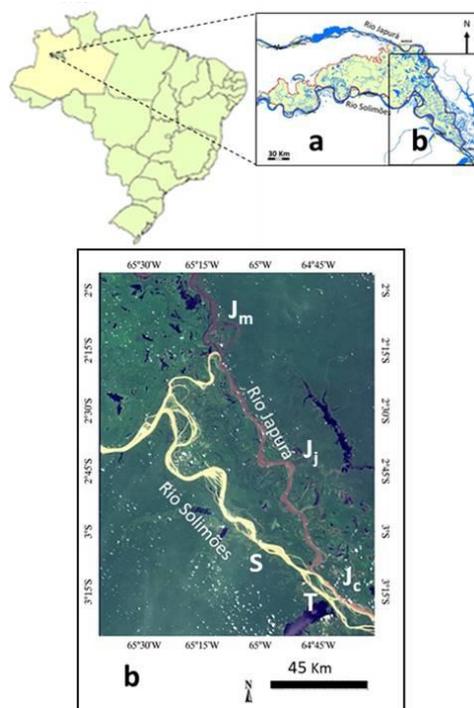


Figura 1. Área de estudo: a) localização da RDSM; b) localização da área de estudo na RDSM. **J_m**, **J_j**, **J_c**, amostras a montante, jusante e após a confluência do rio Japurá e Solimões, respectivamente. **S** e **T**, amostras no rio Solimões e lago Tefé, respectivamente. Fonte: Adaptado de (<http://www.mamiraua.org.br/pt-br>).

3. Materiais e Métodos

A Tabela 1 resume as características das imagens WFI/CBERS-4. As datas disponíveis entre 01/01/ 2015 e 31/08/2016 com 30 % ou menos de cobertura de nuvens distribuem-se ao longo de diferentes fases do ano hidrológico (Figura 2).

Tabela 1 – Características da imagem WFI/CBERS-4

Tipo de imageamento	Varredura eletrônica
Largura da faixa imageada	866 km
Campo de visada (FOV)	± 28.63 °
Horário de Passagem pelo Equador	10:30 am
Bandas Espectrais (nm)	Azul: 450 - 520 / Verde: 520 - 590 Vermelho: 630 - 690 Infra-vermelho próximo: 770 - 890
Resolução Espacial	64 m (nadir)
Resolução Radiométrica	10 bits
Frequência de Aquisição	5 dias

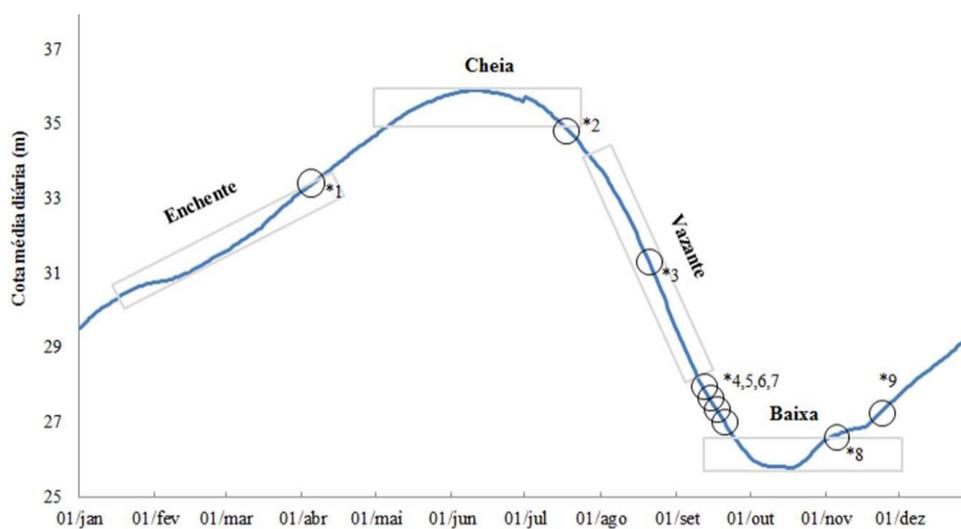


Figura 2. Distribuição das imagens disponíveis ao longo do ano hidrológico (cota diária média da série histórica). Fonte: (<http://www.mamiraua.org.br/pt-br>).

3.1-Pré-processamento das imagens WFI/CBERS-4

As bandas da WFI/CBERS-4 foram convertidas de nível digital (ND_{λ}) para radiância espectral (L_{λ}) no topo da atmosfera (TOA) utilizando-se os coeficientes G_{λ} (ganho) resultantes da calibração radiométrica das imagens (Pinto et al., 2016).

$$L_{\lambda,TOA} = G_{\lambda} \cdot ND_{\lambda} \quad (1)$$

tal que, $L_{\lambda,TOA}$ é a radiância espectral TOA ($w.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$), e G_{λ} ($w.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$) igual a 0.375; 0.445; 0.346 e 0.322 para as bandas 1,2,3,4 do sensor WFI, respectivamente (Ver Tabela 4.22 de Pinto et al., 2016)

As imagens $L_{\lambda,TOA}$ foram posteriormente convertidas em reflectância espectral ($\rho_{\lambda,TOA}$) conforme:

$$\rho_{\lambda,TOA} = (\pi \cdot L_{\lambda,TOA} \cdot d^2) / (E_{\lambda,SUN} \cdot \cos \theta_s) \quad (2)$$

em que, $\rho_{\lambda,TOA}$ é a reflectância espectral TOA (adimensional), $\pi \sim 3,142$, $L_{\lambda,TOA}$ é a radiância espectral TOA em $w.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$, $E_{\lambda,SUN}$ é a irradiância solar Exo-atmosférica em $w.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ (Ver Tabela 3.9 de Pinto et al., 2016), θ_s é o ângulo zenital solar, d é a distância Terra-Sol (unidades astronômicas).

As imagens $\rho_{\lambda,TOA}$ foram então submetidas à correção atmosférica utilizando o modelo 6SV (vector version of Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) que permite modelar os processos de absorção e espalhamento provocados pelos constituintes da atmosfera e removê-los da reflectância TOA. O modelo 6SV foi adaptado às bandas do WFI a partir da simulação da função de filtro das câmaras WFI. O modelo atmosférico adotado foi o Tropical, o tipo de aerossol como de queima de biomassa e as cargas da profundidade óptica obtidas do produto MODIS em 550 nm (Lyapustin et al., 2011). Mais detalhes sobre o 6SV podem ser encontrados em Vermonte et al. (1997). Após a correção atmosférica, as imagens foram submetidas ao registro imagem x imagem para garantir que diferenças de posicionamento entre pixels de datas diferentes não afetassem a

análise do comportamento da cor da água ao longo do tempo. O erro médio quadrático (RMS) total de registro para o conjunto de 10 imagens foi $0,82 \pm 0,20$ pixel.

3.2. Análise do comportamento espectral dos tipos de água da área de estudo

De modo a limitar a aquisição de amostras de reflectância aos lagos da área de estudo, foi construída uma máscara de água usando a banda do infra-vermelho próximo. Foram testados diferentes limiares, tendo sido definido como água o intervalo de reflectância entre 0,04 e 0,1 na cena referente a 05 de abril de 2015, selecionada por representar o maior nível atingido pela água, e com maior probabilidade de se obter pixels puros de água. A máscara de água foi aplicada em todas as cenas e superposta à composição colorido normal da mesma data para a edição manual dos erros. Foram selecionadas amostras em locais que permaneceram como água aberta em todas as datas e com um mínimo de 28 pixels em sistemas aquáticos pequenos, chegando a 600 pixels nos maiores.

3.3. Classificação espectral e temporal dos tipos de água

A classificação visou identificar os tipos de água dominantes ao longo da série temporal. No processo de classificação espectral-temporal foram usadas apenas bandas do visível (azul, verde, vermelho) devido aos efeitos de adjacência causados pela floresta na banda do infra-vermelho. Adotou-se o método de classificação não-supervisionada por pixels devido ao pequeno tamanho dos lagos da região (Schowengerdt, 2012), utilizando-se o algoritmo Isodata que permite o agrupamento dos pixels a partir da divisão do espaço multiespectral/temporal com base em parâmetros definidos empiricamente pelo usuário: número de classes, número de iterações, limiar de mudança, número mínimo de pixels por classe.

4. Resultados e Discussão

A Figura 3 mostra composições coloridas normais dos ambientes aquáticos, ao longo da série temporal. A análise temporal mostra que os sistemas aquáticos adotam diferentes “cores” ao longo da série. Em abril, a região a montante do Rio Japurá (legenda na Figura 1) possui água mais escura do que sua região jusante, e que a cor do rio Solimões é muito mais clara (quase branca) do que a de todo o curso do rio Japurá. Essa característica se mantém até 22 de setembro de 2015. Em novembro, contudo, a cor de ambos os rios, se aproxima. Em relação ao lago Tefé, que exemplifica as grandes rias formadas na confluência com o Solimões, a cor da água se modifica em função da nebulosidade devido à dominância da reflectância especular da radiação difusa no sinal registrado pelo sensor.

A Figura 4 mostra o comportamento espectral do rio Japurá à montante (J_m), à jusante (J_j) e após a confluência com o Solimões (J_c). Pode-se observar a seguintes tendências: 1) à montante (J_m) a reflectância do Japurá é inferior a 0,1 em todas as datas e comprimentos de onda; 2) os menores valores ocorrem em 5 de abril (enchente) e 8 de setembro (vazante) de 2015 e 15 de julho (vazante) de 2016; 3) o maior valor em (J_m) ocorre em novembro (baixa) de 2015, mas as amostras estão contaminadas por efeitos ambientais não totalmente removidos pela correção atmosfera (observar aumento de reflectância no infra-vermelho próximo); 4) os espectros de jusante (J_j) se dividem em duas categorias bem nítidas, curvas que indicam domínio de partículas inorgânicas em 8 e 25 de novembro (baixa) e 22 de setembro (vazante); curvas que apresentam reflectância baixa (inferior a 0,06) em todos os comprimentos de onda, mas com tendência de aumento do azul para o infravermelho, sugerindo efeitos ambientais (reflexão do céu e das adjacências) que são realçados pelo baixo sinal emergente da coluna d'água. 5) após a confluência (J_c) com o Solimões, o comportamento do rio se assemelha ao (J_j). Os espectros de 11 de setembro (vazante) de

2015 e 17 de agosto (vazante) de 2016 mostram contaminação por efeitos de reflexão de superfície.

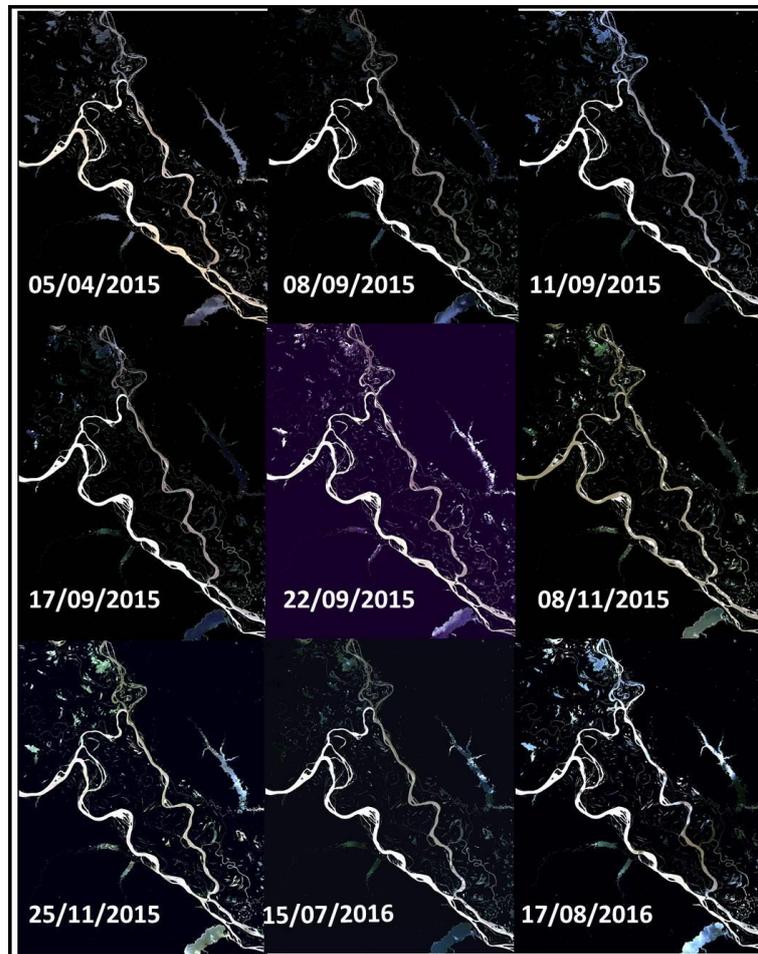


Figura 3. Composição colorida normal das bandas WFI 1,2 e 3 associadas às cores azul (B), verde (G) e vermelha (R), respectivamente.

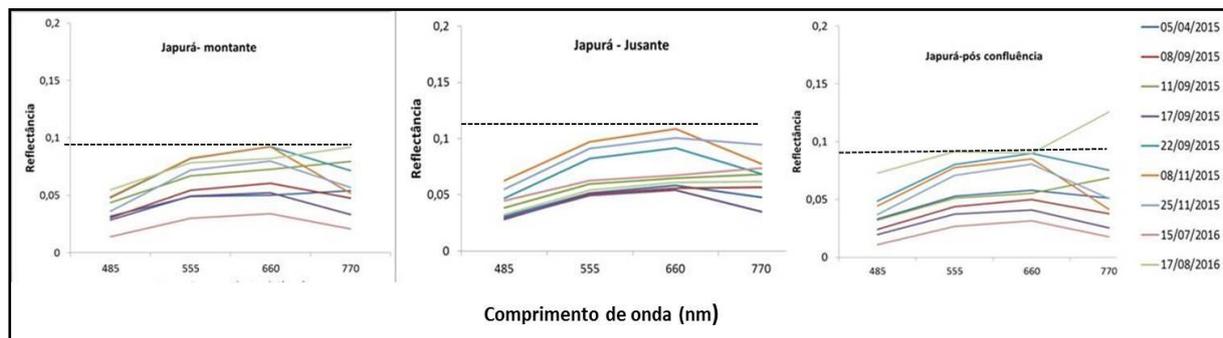


Figura 4-Comportamento espectral do rio Japurá em (J_m), (J_j) e (J_c). Observar Figura 1 para localização

A Figura 5 mostra o comportamento espectral do rio Solimões e do lago Tefé ao longo da série. Sua análise evidencia que: 1) a forma do seu espectro, ao contrário do que ocorre no rio Japurá, indica o domínio de partículas inorgânicas ao longo de toda a série, exceto no infra-vermelho de agosto de 2016 devido efeitos de espalhamento ambiental; 2) a

reflectância do Solimões é máxima em 22 de setembro de 2015 (início da baixa) e mínima em 15/07/2016 (vazante); 3) a reflectância do lago Tefé é muito baixa e sem feição típica de águas claras (alta transparência) ou pretas (alta concentração de carbono orgânico dissolvido colorido). De fato, a reflectância é baixa, menor que 0,07 em todos os comprimentos de onda. O padrão de variação da forma do espectro indica forte componente da reflectância de superfície.

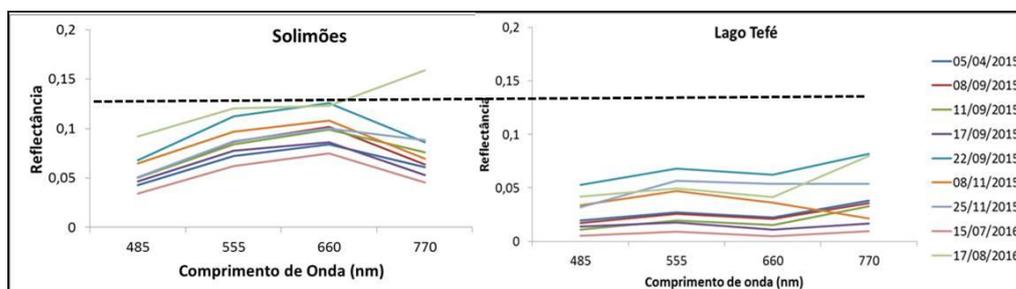


Figura 5-Comportamento espectral do rio Solimões e do lago Tefé.

A Figura 6 mostra o resultado da classificação multi-espectral e temporal. Podem-se observar dois tipos de água: águas brancas, com alta concentração de sedimentos em suspensão, e águas que incluem águas pretas e claras e águas que em grande parte do ano perdem as características ópticas de águas brancas. O rio Japurá, em sua região montante tem propriedades óticas semelhantes às das rias, como é o caso do lago Tefé. A análise do transporte mensal de sedimentos mostra que o Solimões transporta em média 16 vezes mais sedimentos do que o do Japurá, o que explica a ausência de espectros típicos de alta concentração de partículas inorgânicas.

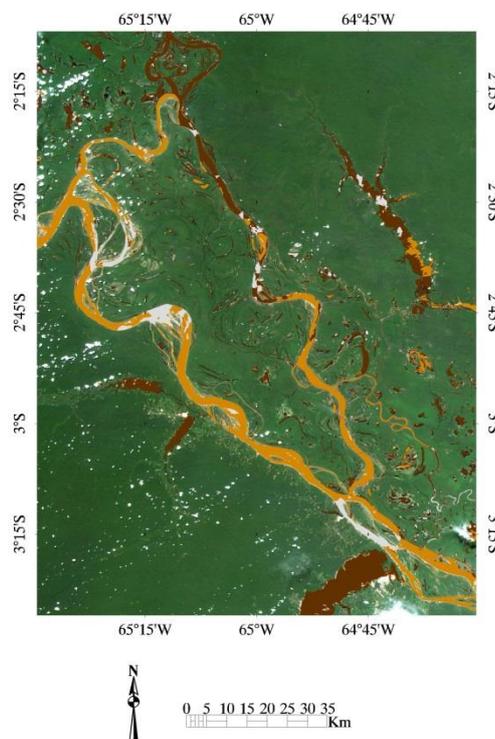


Figura 6 – Tipos de água ao longo da série WFI. Branco (nuvens), ocre (sistemas dominados por águas com alta concentração de sedimentos ($\sim 312 \text{ mg.L}^{-1}$) ao longo do ano hidrológico, marrom (sistemas com baixa concentração de sedimentos).

5. Conclusão

Os resultados mostram que as imagens WFI/CBERS-4 permitiram ampliar a compreensão sobre as trocas de água entre os lagos de várzea e os rios Solimões e Japurá. Embora o rio Japurá seja um rio de água branca, durante várias fases do pulso de inundação ele se comporta como um rio opticamente semelhante aos lagos de várzea e às rias (cor escura). A análise temporal permitiu observar a maior mistura entre as massas de água do Japurá e Solimões no período de cheia (Fevereiro-Agosto) e o predomínio de águas brancas. Nos demais períodos, o comportamento óptico do Japurá se assemelha aos lagos da várzea e às rias (cor escura). A aquisição de mais imagens para compor uma série mais longa ampliará a compreensão da dinâmica de circulação da água na várzea da RDSM.

Agradecimentos

E. Novo agradece ao CNPq o suporte financeiro via processo 304568/2014-7.

5. Referências

Affonso, A. G. **Relação entre parâmetros ambientais e a densidade de pirarucu nos lagos de várzea de Mamirauá: uma análise multi-sensor.** 2012. 171 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/08.14.10.45-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

Choi, J. K.; Park, Y. J. ; Ahn, J. H. ;Lim, H. S. ; Eom, J. ; RYyu, J. H. GOCI, the world's first geostationary ocean color observation satellite, for the monitoring of temporal variability in coastal water turbidity. **Journal of Geophysical Research: Oceans** (1978–2012), 117(C9), 2012.

Filizola, N. **Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens.** Ph.D. Thesis, Paul Sabatier University, Toulouse, 292 pp, 2003.

Huang, C., Shi, K., Yang, H., Li, Y., Zhu, A. X., Sun, D., Chen, X.). Satellite observation of hourly dynamic characteristics of algae with Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data in Lake Taihu. **Remote Sensing of Environment**, 159, 278-287, 2015.

Lyapustin, A.; Wang, Y.; Laszlo, I.; Kahn, R.; Korokin, S.; Remer, L.; Reid, J. S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D3, 2011.

Olmanson, L. G.; Brezonik, P. L.; Bauer, M. E. Airborne hyperspectral remote sensing to assess spatial distribution of water quality characteristics in large rivers: The Mississippi River and its tributaries in Minnesota. **Remote Sensing of Environment**, 130, 254-265, 2013.

Pinto, C. T. Uncertainty Evaluation For In-Flight Radiometric Calibration Of Earth Observation Sensors. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/07.01.14.30-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 135 p, 2016.

Schowengerdt, R.A. Techniques for image processing and classifications in remote sensing. Academic Press, p 248, 2012.

Silva, A. J. F. M. **Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos.** 2007. (INPE--T). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

Vermote, E. F.; Tanré, D.; Deuze, J. L.; Herman, M.; Morcette, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.