

Variação Espaço Temporal do Tempo de Retenção de Água no Lago Grande do Curuai

Edson Filisbino Freire da Silva ¹

1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos – SP, Brasil
edson.freirefs@gmail.com

Abstract. The Amazon basin has experienced frequent droughts over the past years. That could affect the water retention time (WRT) of floodplain lakes, and consequently their carbon cycle. For this reason, this study uses time series of MODIS images (2013 – 2016) to assess possible changes in WRT at Lago Grande do Curuai lake, located in the lower Amazon floodplains. I calculated the normalized difference water index (NDWI) using bands 2 (859 nm) and 4 (555 nm), and I obtained the atmospheric conditions from state_1km layer available on MYD09GA package. Using a series of Boolean algebra, I obtained the WRT images per month and year. The results show shorter WRT between September and February when the water level is decreasing. Smaller lakes are formed due to this period, accelerating the water withdraw from the floodplain, resulting in low WRT. In the driest years occurs the lowest WRT, caused by the lower precipitation rates. Whether the droughts take place more often, it could reduce the mean WRT of Lago Grande do Curuai lake and increase carbon dioxide and methane emissions to the atmosphere and increase the global warming. On the other hand, shorter WRT means less water to anaerobic organic carbon degradation.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, geoprocessing, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geoprocessamento.

1. Introdução

Tempo de retenção de água (TRA) é um dos principais fatores que controlam a degradação de carbono orgânico (CO) em ambientes aquáticos, sendo sua relação inversamente proporcional. Por exemplo, em águas oceânicas, o TRA é mais longo e a degradação do CO mais lenta, por outro lado, em águas interiores, com TRA curto, a degradação do CO é mais rápida (Catalán et al., 2016).

A degradação do CO pode ocorrer em diferentes formas. Por fotodegradação, através da qual a radiação eletromagnética quebra e decompõe o carbono orgânico; por biodegradação, por meio da qual, bactérias heterotróficas se alimentam do CO na água; de floculação, em que partículas menores de CO formam agregados, reduzindo sua capacidade de flotação sendo decantado na coluna da água, e o qual é finalmente sedimentado e sepultado no fundo dos lagos; e em rios, sendo removido por processos advectivos. Por outro lado, há fatores que aumentam o CO em águas interiores, como a produção por fotossíntese de algas e cianobactérias; por processos laterais, como fluxo de rios ou queda de galhos de árvores adjacentes. Por fim, o ciclo do carbono em águas interiores deve ter sua influência considerada em modelos de ciclos biogeoquímicos (Cole et al., 2007).

O TRA pode ser definido como o tempo que uma partícula de água ao entrar no sistema, levaria para sair dele. Em estudos de campo, pode ser definido como a razão entre o volume do sistema (m^3) sobre o seu fluxo ($m^3 s^{-1}$). Atualmente, não há uma técnica de sensoriamento remoto óptico para estimar o TRA pela definição de estudos de campo. Entretanto, se calcularmos em uma região o período de tempo que ela fica inundada sobre o período total, poderia se determinar a porcentagem de tempo que uma dada região permanece inundada, como *proxy* do TRA, o que permitiria fazer comparações relativas em séries espaços temporais.

Na Amazônia, secas intensas têm ocorrido nos últimos 13 anos (Stosic et al., 2016; Liu et

al., 2018). Essas secas podem alterar a variação sazonal da inundação, e, conseqüentemente o TRA dos lagos das planícies de inundação. Seria necessário obter uma série histórica do TRA na região, para entender como é sua variação, e se há alterações causadas por essas secas. Mudanças da TRA de lagos das planícies inundáveis da bacia Amazônica teriam grande potencial de alterar o ciclo biogeoquímico do carbono na região e possíveis impactos no balanço global de carbono.

Com essa motivação, o objetivo desse trabalho é investigar a variação espaço temporal do TRA no Lago Grande do Curuai e determinar se está ocorrendo alterações no TRA causados pela ocorrência de secas mais intensas na região.

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado no Grande Lago do Curuai (Figura 1), localizado na várzea o Rio Amazonas, próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil. O Lago tem 4000 km², e é pouco afetado por efeitos de maré (Carvalho et al., 2003). Sua hidrologia tem como principal aporte de água anual a conexão com Rio Amazonas (77%), chuvas (19%) e águas subterrâneas (4%); e um tempo de residência hidráulica estimado em 3 meses (Bornet et al., 2008).

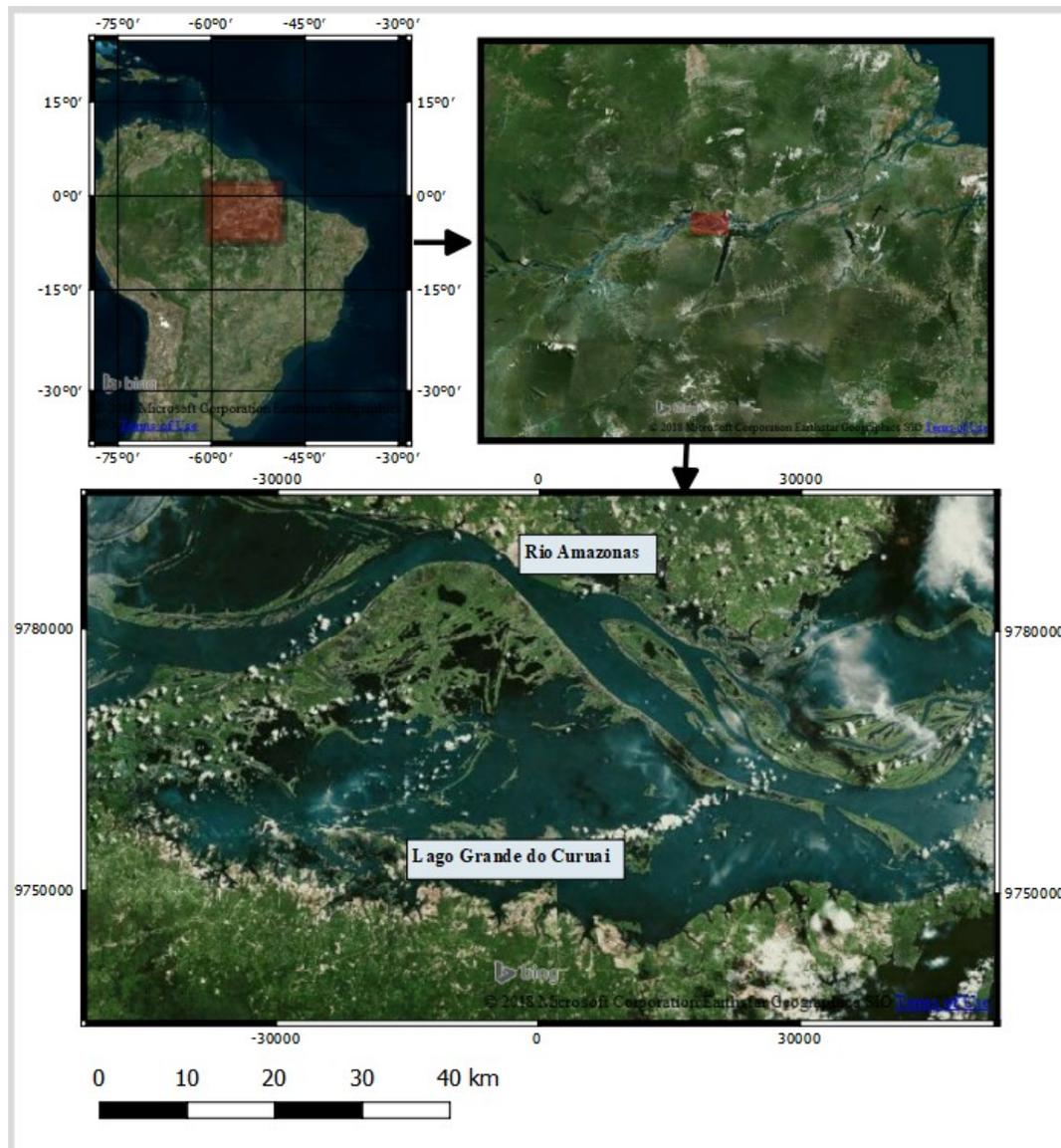


Figura 1. Localização do Lago Grande do Curuai (UTM ,22S).

2.2 Geoprocessamento

2.2.1 Aquisição de imagens

Foram utilizadas as imagens do sensor MODIS Aqua, disponíveis pelo pacote MYD09GA (Figura 2), em reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}), disponibilizadas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), acessados e processados através do Google Earth Engine. Dentre esse pacote de dados, foram extraídas as bandas 2 (859 nm) e banda 4 (555 nm) ambas em 500 m de resolução espacial com imagens diárias. Além disso, foi extraído a camada *state_1km*, a qual fornece informações sobre a condição atmosférica e cobertura de nuvens para as imagens no mesmo instante, em uma resolução espacial de 1 km. Após o acesso das imagens, elas foram reprojadas para a projeção WGS 84 (UTM), zona 22 S.

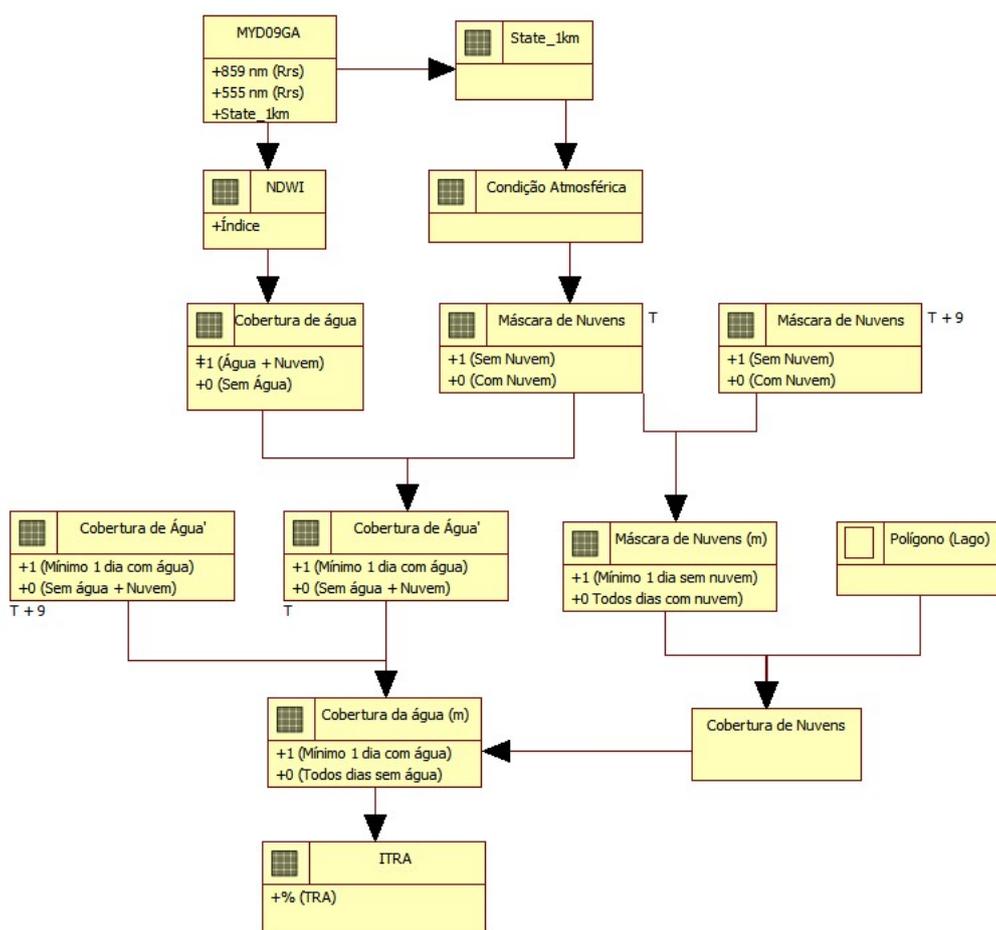


Figura 2. Diagrama do geoprocessamento dos dados.

2.2.2 Delimitação de áreas inundadas

Utilizando as bandas 2 e 4 do sensor MODIS, foi calculado o *Normalized Difference Water Index* (NDWI) para cada pixel, utilizando a seguinte equação:

$$NDWI_{(\phi, \lambda)} = \frac{B_{4(\phi, \lambda)} - B_{2(\phi, \lambda)}}{B_{4(\phi, \lambda)} + B_{2(\phi, \lambda)}}$$

Onde B_4 e B_2 são os campos numéricos da R_{rs} das bandas 4 e 2 do sensor MODIS, respectivamente, λ é a longitude e ϕ é a latitude.

O campo numérico *NDWI* varia entre -1 e 1, onde valores maiores que 0 são pixels classificados como água, e valores menores que 0 são pixels classificados como não água. Portanto, para obter os com água, foi utilizada a seguinte operação booleana:

$$\text{Cobertura de água}_{(\phi, \lambda)} = \text{NDWI}_{(\phi, \lambda)} > 0$$

Onde *Cobertura de água* é o campo temático das áreas inundadas, onde 1 corresponde aos pixels cobertos por água, e 0 corresponde a pixels não cobertos por água.

Entretanto, a imagem *Cobertura de água* sofre interferência de nuvens, o que torna necessária a aplicação de uma máscara para remover os pixels contaminados. Para essa remoção utilizou-se a camada *state_1km*. Essa camada precisa ser convertida para valores binários (16 bits), de tal forma que os 2 primeiros números forneçam a condição de nebulosidade para cada pixel, tal que o valor 00 corresponde a pixel sem nenhum tipo de interferência com nuvem. Sendo assim, foi utilizado a seguinte operação:

$$\text{Condição atmosférica}_{(\phi, \lambda)} = \text{bin}(\text{state 1 km}_{(\phi, \lambda)})$$

Onde *Condição atmosférica* é o campo numérico em números binários (16 bits), *bin* é a função que converte números reais em números binários (16 bits). Em sequência, foi obtido a máscara de nuvens pela seguinte operação booleana:

$$\text{Máscara de nuvens}_{(\phi, \lambda)} \leftarrow (\text{Condição atmosférica}[0,1]_{(\phi, \lambda)} = 00)$$

Onde *Máscara de nuvens* é um campo temático, onde 1 corresponde aos pixels sem qualquer interferência de nuvens e 0 corresponde aos pixels com interferência de nuvens, e o [0,1] corresponde ao índice dos valores de cada pixel, onde 0 e 1 são os primeiros valores do número binário. Por fim, para identificar os pixels com nuvem do campo temático *Cobertura de água*, foi utilizado a seguinte operação:

$$\text{Cobertura de água}'_{(\phi, \lambda)} = ((\text{Cobertura de água}_{(\phi, \lambda)} + 1) \times \text{Máscara de nuvens}_{(\phi, \lambda)}) - 1$$

Onde *Cobertura de água'* é um campo temático, onde valores de 1 correspondem aos pixels com cobertura de água, e 0 correspondem aos pixels que estão coberto por nuvens ou não estão inundados.

2.2.3 Mosaico de imagens

Utilizar a *Cobertura de água'* de apenas 1 dia não é suficiente para estimar as áreas inundadas, pois há a interferência de nuvens, impossibilitando o cálculo da TRA dos lagos. Para computar a TRA de uma região é necessário acumular mosaicos adquiridos em dias sucessivos de modo a completar as informações dos locais sujeitos à cobertura de nuvens. Assim sendo, foram computados mosaicos a cada 10 dias para todas cenas na série temporal, utilizando a seguinte operação:

$$\text{Cobertura de água}(m)_{(\phi, \lambda)} = (\text{Cobertura de água}'(1)_{(\phi, \lambda)} + \dots + \text{Cobertura de água}'(10)_{(\phi, \lambda)}) > 0$$

Onde *Cobertura de água (m)* é o mosaico de 10 dias de cobertura de água, onde 1 corresponde que, em pelo menos 1 dia do mosaico, esse pixel ficou inundado, e 0 corresponde aos pixels que não ficaram cobertos por água em nenhum dia do mosaico ou que ficaram cobertos por nuvens em todos os dias. Como a *Cobertura de água (m)* pode ainda ter

interferência de nuvens e enviar o cálculo para obter TRA, pois esse campo não discrimina o que é nuvem e o que superfície não inundada, um mosaico da cobertura de nuvens também é gerado para obter a cobertura de nuvem do mosaico, através da seguinte operação:

$$\text{Máscara de nuvens } (m)_{(\phi, \lambda)} = (\text{Máscara de nuvens } (1)_{(\phi, \lambda)} + \dots + \text{Máscara de nuvens } (10)_{(\phi, \lambda)}) > 0$$

Onde *Máscara de nuvens*(*m*) é o mosaico de 10 dias de máscara de nuvens, onde 1 corresponde que em pelo menos 1 dia do mosaico o pixel não estava contaminado por nuvem, e 0 corresponde que o pixel esteve contaminado por nuvem em todos os dias. Assim, pode-se calcular a porcentagem de cobertura de nuvem do mosaico para a área de estudo, utilizando a seguinte operação zonal:

$$\text{Cobertura de nuvens}_{(Lago)} = 100 - \left(\frac{\text{SOMA}(\text{Máscara de nuvens } (m)_{(\phi, \lambda)} \in \text{Polígono}_{(Lago)})}{N_{\text{pixels}} \in \text{Polígono}_{(Lago)}} \times 100 \right)$$

Onde *Cobertura de nuvens*_(Lago) é a porcentagem de cobertura de nuvens para um mosaico no Lago Grande do Curuai, *N_{pixels}* é o número total de pixels no lago, *Polígono*_(Lago) é um polígono cobrindo o retângulo envolvente no Grande Lago do Curuai. Portanto, para remover mosaicos da série temporal que estavam com muita interferência de nuvens e enviando a informação de área alagada, foram removidos a *Cobertura de água* (*m*) onde a *Cobertura de nuvens*_(Lago) fosse maior que 5%, garantindo que os pixels não inundados fossem – com 5 % de incerteza – áreas não inundadas. Por fim, de 512 *Cobertura de água* (*m*) obtidos, 43 foram removidos por esse método.

2.2.4 Cálculo do tempo de retenção da água

Foi calculado o TRA mensal e anual da região de estudo. Para isso, foi realizado o empilhamento (stacking) do *Cobertura de água* (*m*) e obtido o TRA de cada período através da seguinte operação:

$$\text{ITRA}_{(t, \phi, \lambda)} = \frac{\text{SOMA}(\text{Cobertura de água } (m)_{(t', \phi, \lambda)})}{N_{\text{imagens}}} \times 100$$

Onde *ITRA'* é o campo numérico do TRA em porcentagem, *t* é determinado período no tempo (ano ou mês), *N_{imagens}* é o número de imagens utilizados na SOMA.

2.3 Dados Auxiliares

Foram utilizados os dados de Cota da água na estação de Parintins, próximo ao Grande Lago do Curuai. A Cota da água estão disponíveis em médias mensais, ao longo de toda série histórica desse estudo.

3. Resultados e Discussão

3.1 Variação Sazonal do Tempo de Retenção de Água

O TRA de cada mês varia conforme a cota da água (Figura 3), tal que os maiores TRAs (Figura 4) ocorrem durante a cheia, entre os meses de Abril e Agosto, correspondente ao fim da cheia e o começo da estação seca.

Durante a cheia, o Lago Grande do Curuai tem o TRA de aproximadamente 100 % em quase toda sua extensão. Nas áreas de borda do lago, ocorrem menores TRAs, o que pode estar relacionado com variações em precipitações durante esse período.

A partir de setembro, durante a diminuição da cota da água, o lago começa a reduzir sua

área. Consequentemente, o TRA desses mês é menor, com a maior parte de sua extensão inferior a 50%. No mesmo mês, é possível observar o isolamento de lagos menores, delimitados por faixas estreitas de menor TRA. Sendo assim, em setembro, pequenos lagos começam a se formar, e isolando a sua troca de água com os outros lagos adjacentes e com o Rio Amazonas.

Em outubro, a segmentação de lagos menores fica mais evidente. Seus TRAs são no máximo 50%, reduzindo até Novembro, onde suas áreas são menores. Em Dezembro, a área e os TRAs do Lago Grande do Curuai voltam a aumentar devido ao aumento da cota da água. A separação dos pequenos lagos se mantém até Março, quando todo o lago se conecta novamente, e com um TRA predominante de 100 %.

Portanto, os TRAs não são espacialmente constantes durante o ano, variando em função da cota da água. Os maiores TRAs ocorrem no período da cheia, e reduzem quando entram no período da seca. No período de menor cota, formam-se pequenos lagos sem conexão com o Rio Amazonas, o que pode contribuir com a redução do TRA nesses meses, exceto para os lagos que permanecem com água ao longo de todo o ano hidrológico.

3.2 Variação Anual do Tempo de Retenção da Água

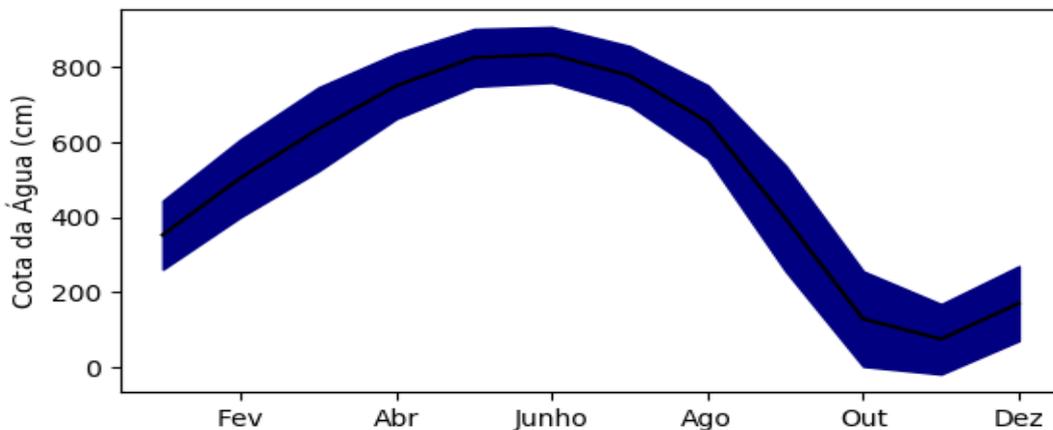


Figura 3. Variação da Cota da água (média e desvio padrão) anualmente, entre 2013 e 2017.

Os anos de 2005, 2010 e 2016 foram os com menores TRAs (Figura 5), dentre os quais os anos de 2005 e 2010 foram os de maior seca na Amazônia nos últimos anos (Marengo et al., 2011), causada por uma redução a precipitação. Nesses anos, o TRA máximo foi de aproximadamente 73%, ocorrendo próximo a conexão com o Rio Amazonas. Portanto, durante esses anos, ocorreram períodos de total seca do lago, provavelmente, entre setembro e fevereiro.

Nesses anos, o TRA das regiões que segmentam o Lago Grande do Curuai em pequenos lagos foram menores. Portanto, esses pequenos lagos ficaram isolados do Rio Amazonas em períodos mais longos, sua principal fonte de aporte de água, o que pode ter acelerado a sua seca, e, consequentemente, os TRAs menores.

Os anos com maior TRAs foram os de 2009, 2013 e 2014. Nesses anos, a maior parte da extensão do lago teve TRA acima 80%, sendo que, os anos de 2013 e 2014 tiveram a maior parte de sua extensão com TRA de 100 %. Apesar disso, os menores lagos ainda ocorrem, mas, com menor frequência, pois o TRA das regiões que os dividem maiores tem maior duração. Portanto, esses pequenos lagos devem ficar isolados por menos tempo em anos de maior inundação, tendo mais taxa de renovação de água e diluição de nutrientes.

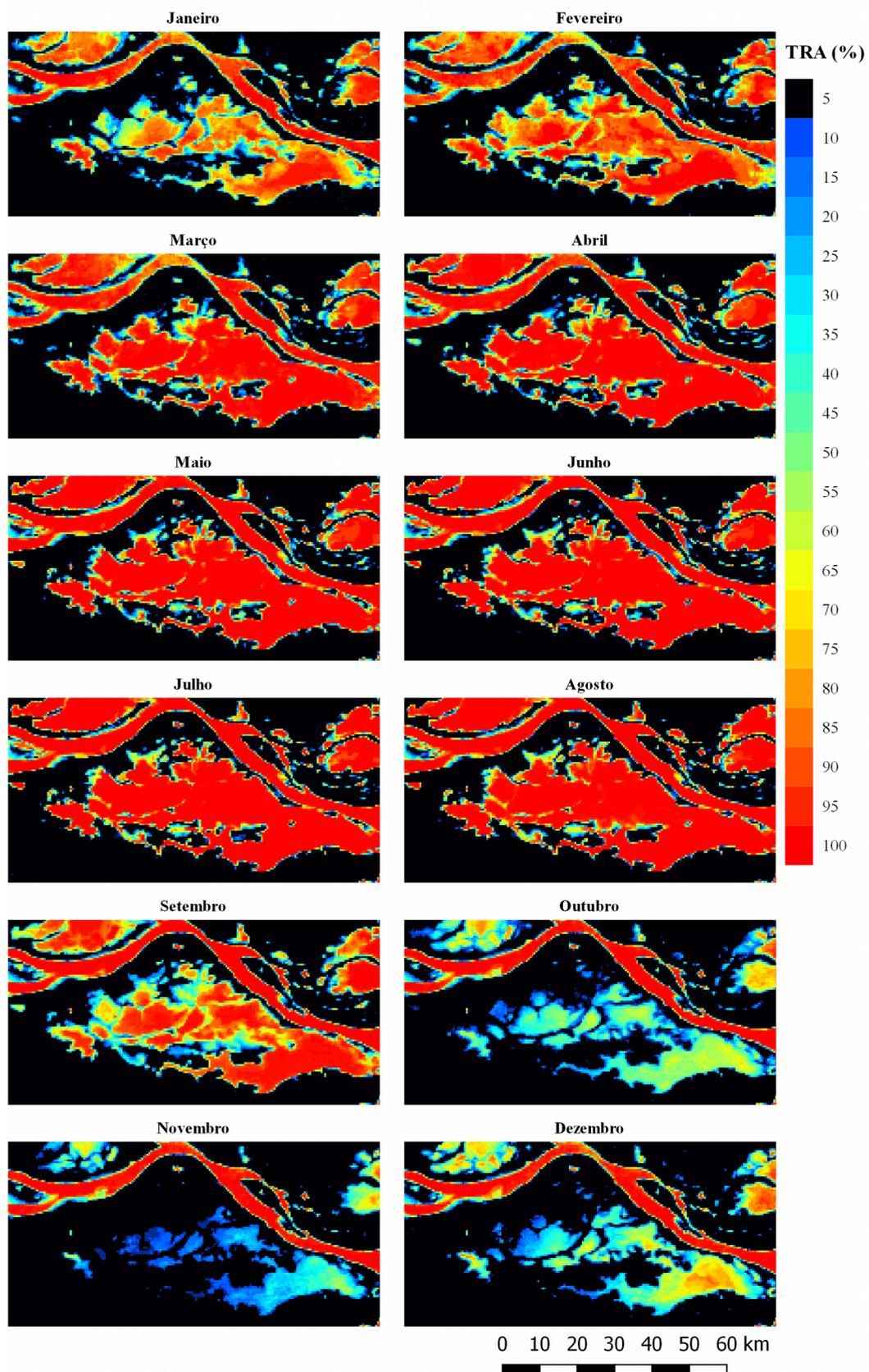
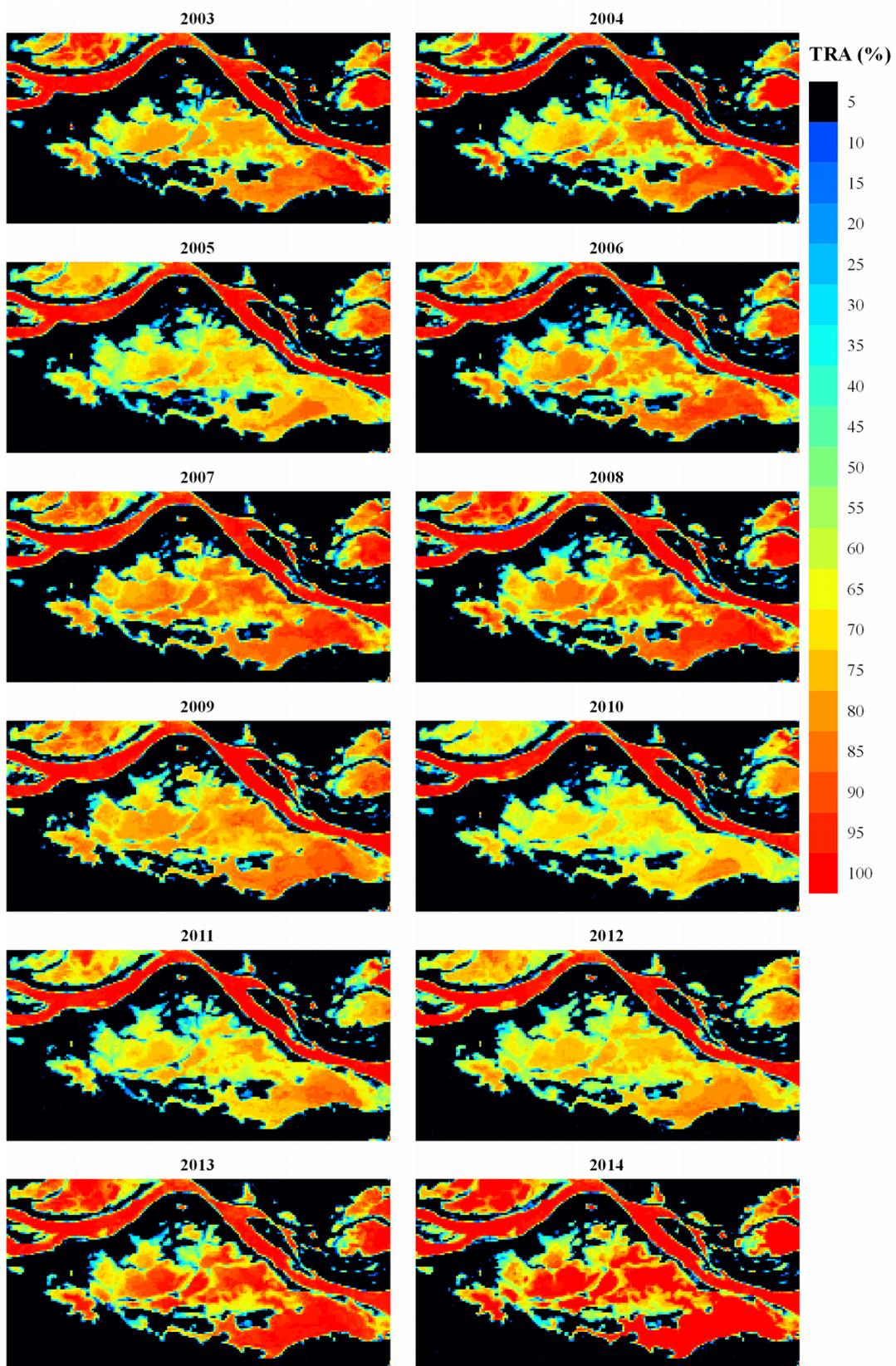


Figura 4. TRA mensal do Lago Grande do Curuai entre os anos de 2013 e 2017.



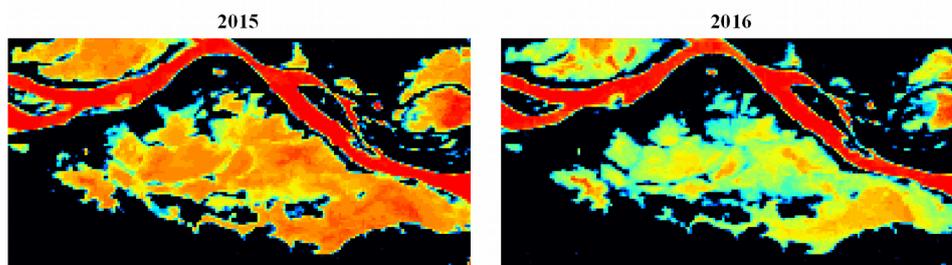


Figura 5. Variação do TRA anual entre os anos de 2013 e 2016.

Por fim, durante anos de seca, os TRAs são menores, secando completamente o Lago Grande do Curuai. Assim como a variação sazonal, a variação do TRA varia conforme a precipitação, e, portanto, a cota da água. Embora a causa dessa variação anual da precipitação local não seja bem definida, nos últimos 20 anos as secas têm ocorrido com maiores intensidades.

3.3 Consequências das Mudanças no Tempo de Retenção da Água

Durante os anos de seca, o TRA do Lago Grande do Curuai é menor do que 1 ano. Nesse caso, há um maior decaimento do CO causado por floculação e fotodegradação (Catalán, et al., 2016). Como consequência, há uma maior emissão de dióxido de carbono e metano para a atmosfera e maior sedimentação e sepultamento do CO. Portanto, durante o ciclo biogeoquímico do carbono, quando ocorrem anos de seca, o carbono disponível na água do lago se reduz, aumentando o carbono atmosférico e geológico. Esse aumento no carbono atmosférico e geológico ocorrem mais intensamente durante os meses de seca, quando o TRA é menor e ocorre o isolamento de pequenos lagos, acelerando a seca e reduzindo o TRA.

O sepultamento do carbono pode contribuir para a redução do aquecimento global, por outro lado, o aumento do carbono atmosférico pode aumentá-lo. Cole et al. (2007) analisa a influência de águas interiores no ciclo de carbono; do carbono que entre no sistema das águas interiores, aproximadamente 10 % é sepultado, mais de 40 % é disponibilizado para a atmosfera e o restante é transportado para oceanos. Portanto, durante os anos de seca, com menor TRA, o Lago Grande do Curuai pode estar disponibilizando mais carbono para atmosfera do que sepultando.

As secas de 2005 e 2010 foram as maiores dos últimos anos, e, apesar do ano de 2016 não ter documentada alguma ocorrência de uma maior seca, foi o período com menor TRA. Se a ocorrência dessas secas aumentarem, o TRA médio do Lago Grande do Curuai reduzirá, o que pode aumentar a disponibilização de metano e dióxido de carbono para a atmosfera. Além disso, se a mesma variação no TRA ocorrer no restante da planície de inundação do restante do Amazonas, o aumento da frequência desses anos mais secos causaria uma contribuição de toda planície de inundação para o aumento do dióxido de carbono e metano atmosférico, o que poderia contribuir para o aumento do aquecimento global.

Entretanto, esses cenários mencionados não consideram a variação da entrada de CO no sistema. Nos períodos secos, quando a planície fica exposta, o fundo do lago volta a ser ocupado por vegetação. Consequentemente, a cheia que ocorre posteriormente ao ano de seca pode aumentar o CO disponível na água e, portanto, a emissão do dióxido de carbono e metano. Por outro lado, a precipitação é menor nesses anos, e, consequentemente, a entrada de CO importada pela vegetação de terra firme e planície. Portanto, apesar do menor TRA estar correlacionado com aumento da taxa de degradação da CO, nesses períodos de seca, pode haver menos CO para ser degradado.

4. Conclusão

O tempo de retenção da água no Grande Lago do Curuai é estimado e investigado a sua variação mensal e anual. Os meses de menores TRAs mensal são entre setembro e fevereiro, enquanto os anos de menores TRAs anual foram 2005, 2010 e 2016. A variação do TRA sazonal ocorre devido aos períodos de cheia e seca da planície de inundação do Rio Amazonas, enquanto a variação entre os anos do TRA ocorrem devido a eventos de extrema seca que tem ocorrido desde 2005.

A ocorrência dessas secas podem aumentar a taxa degradação do carbono orgânico e a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Se a intensidade das secas continuarem aumentando, conforme vem ocorrendo desde 2005, o Lago Grande do Curuai poderia disponibilizar uma maior quantidade desses gases para atmosfera. Além disso, se isso também ocorrer para o restante da planície de inundação na Amazônia, haveria uma maior emissão de dióxido de carbono e metano para atmosfera. Entretanto, deve se considerar também a variação da entrada de CO no sistema para concluir se a ocorrência dessas secas podem contribuir com aumento do aquecimento global. Portanto, futuros estudos deveriam investigar como é a variação da entrada de CO no Lago Grande do Curuai e da planície de inundação da Amazônia.

Referências

Bonnet, M. P.; Barroux, G.; Martinez, J. M.; et al. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuai). **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1–2, p. 18–30, 2008.

Carvalho, J. C.; Barbosa, C.; Novo, E. M.; Mantovani, J. E.; Filho, W. P. Applications of Quantitative Analysis Techniques to Monitor Water Quality of Curuai Lake, Brazil. **Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International**. v. 2002, n. July 2002, p. 2362–2364, 2003.

Catalán, N.; Marcé, R.; Kothawala, D. N.; Tranvik, L. J. Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 7, p. 501–504, 2016.

Cole, J. J.; Prairie, Y. T.; Caraco, N. F.; et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 171–184, 2007.

Liu, Y. Y.; Van Dijk, A. I. J. M.; Miralles, D. G.; et al. Enhanced canopy growth precedes senescence in 2005 and 2010 Amazonian droughts. **Remote Sensing of Environment**, v. 211, p. 26–37, 2018.

Marengo, J. A.; Tomasella, J.; Alves, L. M.; Soares, W. R.; Rodriguez, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, p. 1–5, 2011.

Stosic, T.; Telesca, L.; Lemos Da Costa, S. L.; Stosic, B. Identifying drought-induced correlations in the satellite time series of hot pixels recorded in the Brazilian Amazon by means of the detrended fluctuation analysis. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 444, p. 660–666, 2016.