

Influência da passagem de frentes frias sobre a qualidade da água do Reservatório de Itumbiara, GO

Gabriel Moiano Cesar¹
Milton Kampel¹
José Luís Stech¹

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

Abstract. In addition to human activities the water quality in reservoirs is influenced by several forces like weather and climate forcings that determine spatial and temporal variations in these complex systems. This study evaluates the influence of meteorological events on water quality of a tropical reservoir located in Itumbiara, Goiás, Brazil, using MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and in situ data from an autonomous data collection system called *Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental* (SIMA) and two field campaigns performed in May and September of 2009 (rainy and dry season). During the period of September 2009 until March 2011 the passage of cold front events are described. In average, the highest number of cold front events (3) were observed in May and August while the longest duration was observed in November. In the austral winter The mean interval between two consecutive events is 13 days and 25.7 days for the summer. Remote sensing data contributed to describe the weather factors related to the dynamics of the reservoir, producing useful knowledge for the management and environmental monitoring planning of water quality in this region. To improve the quality of these statistics of cold front events it is necessary to increase the dataset for future works.

Palavras-chave: cold front, limnology, remote sensing, water colour, frente fria, limnologia, sensoriamento remoto, cor da água.

1. Introdução

Os reservatórios construídos para a geração de energia elétrica também são utilizados para outros fins. Entre estes, pode-se destacar o abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; a proteção das comunidades aquáticas; a recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; a irrigação de hortaliças, de plantas frutíferas e de locais públicos como parques, jardins, campos de esporte e lazer, onde podem ter contato direto; além da aquicultura e da atividade de pesca (Rebouças, 2002; Garg; Jothiprakash, 2008). Para isso, é fundamental que a água atinja os padrões de qualidade em todos os aspectos, pois eles são determinantes no processo de crescimento de organismos como algas e bactérias que são prejudiciais para a utilização direta desse recurso (Rask et al., 1998).

Existem forçantes naturais que podem mudar significativamente as condições da água nestes reservatórios (Stech et al., 2006; Tundisi et al., 2010). Um dos forçantes meteorológicos que tem influência reconhecida na qualidade da água é a passagem de frentes frias. Estes sistemas meteorológicos normalmente mudam as condições de vento, tanto em intensidade como em direção, podendo estar associados a elevados índices pluviométricos. Os sistemas frontais podem afetar a circulação do reservatório, sua estrutura térmica, impactando o estado trófico do reservatório (Esteves, 1988; Curateli, et al., 2014).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de frentes frias na qualidade da água do Reservatório de Itumbiara, GO, por meio de dados do sensor *MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e dados *in situ*, no período entre setembro de 2009 a março de 2011.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Dados de Campanhas de Campo

Foram utilizados dados *in situ* referentes às variáveis limnológicas turbidez e concentração superficial de clorofila (Nascimento, 2010). Duas campanhas de campo foram realizadas por Nascimento (2010) no reservatório de Itumbiara, sendo uma no período de cheia (12-13/05/2009) e outra no período de vazante (9-11/09/2009).

2.2 Identificação de Sistemas Frontais

Informações sinóticas sobre os eventos de frentes frias foram obtidas por meio dos boletins Climanalise publicados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Esses boletins apresentam mensalmente a análise sinótica dos sistemas meteorológicos sazonais atuantes no Brasil, discutindo a evolução, intensificação e enfraquecimento dos mesmos. Além do uso dos boletins, para confirmação da presença dos eventos na região de Itumbiara, foram utilizadas imagens dos satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* GOES-10 e GOES-12. Um exemplo é apresentado na Figura 1.

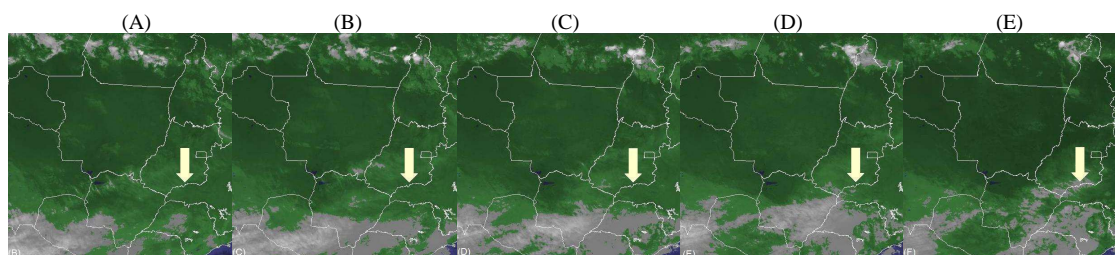


Figura 1. Imagens GOES-12 do dia 10/06/2010 indicando a passagem de um sistema frontal às (A) 4h; (B) 6h; (C) 8h; (D) 10h; (E) 12h. As setas mostram o local do reservatório de Itumbiara, GO.

2.3 Análise de parâmetros de qualidade da água sob influência de sistemas frontais

Foram calculados os valores médios, máximos e mínimos de variáveis limnológicas medidas por um sistema de aquisição automática de dados denominado Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental - SIMA (Stech et al., 2006) fundeado próximo à barragem do reservatório nos dias anteriores e posteriores (± 1 dia) à identificação dos sistemas frontais. De acordo com a disponibilidade de dados da boia SIMA com qualidade controlada, foram selecionadas para esta análise, as seguintes variáveis: condutividade, concentração de oxigênio dissolvido, pH, concentração de amônia, concentração de nitrato, turbidez e clorofila. As variáveis turbidez e clorofila medidas *in situ*, tanto pela boia SIMA como por campanhas de campo (Nascimento, 2010), foram correlacionadas estatisticamente com dados de reflectâncias diárias e composições médias 8 dias MODIS. Foram utilizadas as reflectâncias nas bandas do vermelho (B1 = 620 a 670 nm), infravermelho próximo (B2 = 841 a 876 nm), azul-verde (B3 = 459 a 479 nm) e verde (B4 = 545 a 565 nm), assim como, razões de bandas (B2/B1 e B3/B4). As comparações com dados da boia SIMA foram realizadas em relação às médias MODIS de 8 dias. Desta forma, foram calculados os valores médios *in situ* considerando os períodos concomitantes às imagens. No caso das campanhas de campo, foram utilizadas imagens diárias para as comparações entre os dados de satélite e dados *in situ*. Os valores de reflectância foram extraídos como a mediana de janelas de 3x3 pixels centrados nas coordenadas dos respectivos pontos de coleta.

3 Resultados e Discussão

3.1 Passagem de Frentes Frias

Com o auxílio das imagens de satélite e dos boletins climatológicos mensais, pode-se observar que diversos sistemas meteorológicos de escala sinótica atuaram na região Centro-Oeste do Brasil, no período de estudo provocando chuvas de grande intensidade. Dentre esses sistemas, os principais foram: frentes frias, jatos subtropicais, vórtices ciclônicos, zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e *El Nino Southern Oscillation* (ENSO). Em um terço dos eventos de frente fria observados houve associação do sistema frontal com outros sistemas transientes. Muitas vezes a associação entre esses fenômenos foi o que possibilitou que a frente fria conseguisse ultrapassar os 20°S de latitude em direção para norte.

Além dos boletins climatológicos Climanálise foram utilizadas imagens GOES para confirmação de ocorrência de frentes frias na área de estudo. Algumas das frentes descritas nos boletins não atingiram a região do reservatório de Itumbiara, mas a maioria foi coincidente. Andrade (2005) utilizou dados de precipitação para a contabilização das frentes, pois segundo este autor, no verão, principalmente em latitudes mais ao norte, como é o caso da área de estudo, não há contraste significativo da temperatura, mas os sistemas são acompanhados por ocorrência de precipitação.

De acordo com INPE (2009) no ano de 2009, algumas regiões brasileiras apresentaram totais de precipitação que excederam a média histórica. Nas séries temporais, notou-se que em anos anteriores ocorreram desvios positivos de precipitação maiores que em 2009. Contudo, nos cinco anos anteriores, as chuvas ocorreram abaixo da média especialmente na Amazônia e no Sudeste. Para o ano de 2010, os meses de fevereiro, junho e agosto foram os únicos meses onde foram registradas poucas ocorrências de chuvas fortes. Já para os meses abrangidos no estudo do ano de 2011, as chuvas ficaram acima da média climatológica. Kousky (1979) notou que há uma tendência de anos com maiores totais de precipitações corresponderem a anos com maior número de passagem de frentes.

As análises visuais com imagens GOES consistiram em observações da nebulosidade onde foram computadas as frentes frias que conseguiram ultrapassar a faixa latitudinal (-18.41°, -49.06°) da área de estudo (Figura 1). Observou-se por meio dessa análise que os sistemas frontais observados têm deslocamento típico de sudoeste para nordeste. Os resultados da análise climática aqui desenvolvida são apresentados em forma de histogramas da distribuição anual (Figura 2).

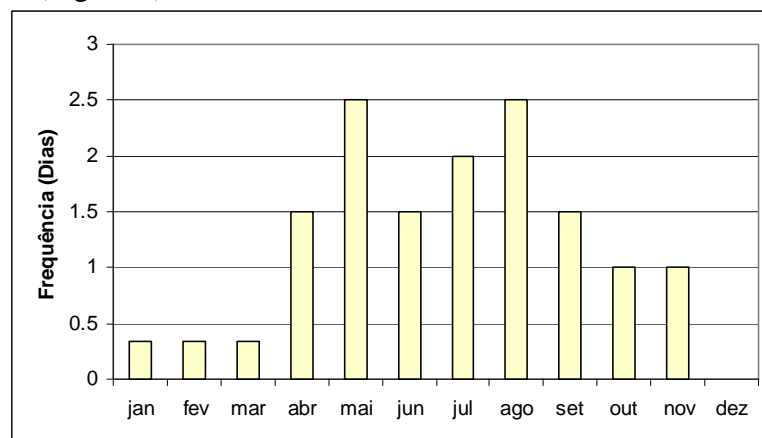


Figura 2. Média mensal do número de frentes frias observadas em Itumbiara, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

Verifica-se que em maio e em agosto foram registradas em média 2,5 ocorrências de sistemas frontais e em dezembro, não houve passagem de frentes frias. No período de seca,

que compreende os meses de março a julho, foi observado que ocorrem em média 7,8 eventos frontais, enquanto que na estação chuvosa, que vai de outubro até dezembro, ocorreram em média dois eventos. Foram identificados mais casos de frentes que se deslocam até a região do reservatório no inverno. Segundo Andrade (2005), é nessa época do ano que há um maior contraste térmico separando as massas de ar e estas chegam a atingir a região central do país. Algumas vezes, os sistemas frontais podem chegar até o sul da Região Norte, caracterizando o fenômeno conhecido como “friagem” (Fortune; Kousky,1983).

Mattos (1987) observa que nas regiões sul e sudeste, os sistemas frontais ocorrem com maior frequência na primavera, mesmo resultado encontrado por Rodrigues (2004) que fez uma climatologia para 10 anos. Segundo aqueles autores, a média de passagem de sistemas frontais foi de 5,5 a 7. Durante os meses de abril a dezembro entre as latitudes de 35°S - 25°S, o número de sistemas observados foi maior que quatro. A média para o mês de abril foi 5,4 e para o mês de dezembro foi de 6,9. Entre as latitudes de 25°S - 20°S, as médias mensais, de abril a dezembro, de passagens de sistemas frontais variaram entre 3,4 e 5,5. Entre os meses de abril a junho e de outubro a novembro foram observados entre as latitudes de 20°S - 10°N uma média de 2 a 2,5 sistemas frontais. De acordo com aqueles autores, as frentes que ultrapassam 20°S rumo ao nordeste são menos frequentes, e na maior parte das vezes estão associadas com a convecção tropical na Amazônia, com o máximo ocorrendo em novembro.

Assim como em Kousky (1979) e Andrade (2005), nesse trabalho também foi observado que o verão é a estação que tem a menor incidência de frentes frias sobre a região estudada. Segundo Andrade (2005), no verão ocorrem períodos de influência da ZCAS e quando as frentes atingem o Sudeste interagem com a convecção tropical. Para o outono, inverno e primavera o número de sistemas que chegam até o sul da Bahia tanto pelo litoral quanto aqueles que passam pelo Sul e Sudeste aumenta em relação ao verão. Ou seja, são nessas estações do ano que os sistemas atingem latitudes mais ao norte e a oeste. A explicação para isso, é que no verão há a atuação da ZCAS, e os sistemas que chegam até o Sudeste atuam na manutenção da ZCAS. O fato dos sistemas também não conseguirem atingir latitudes mais ao norte, passando a região Sudeste, pode ser devido à presença dessa zona de convergência, que pode atuar como uma barreira para o avanço dos sistemas frontais, fazendo com que estes cheguem apenas até essas regiões.

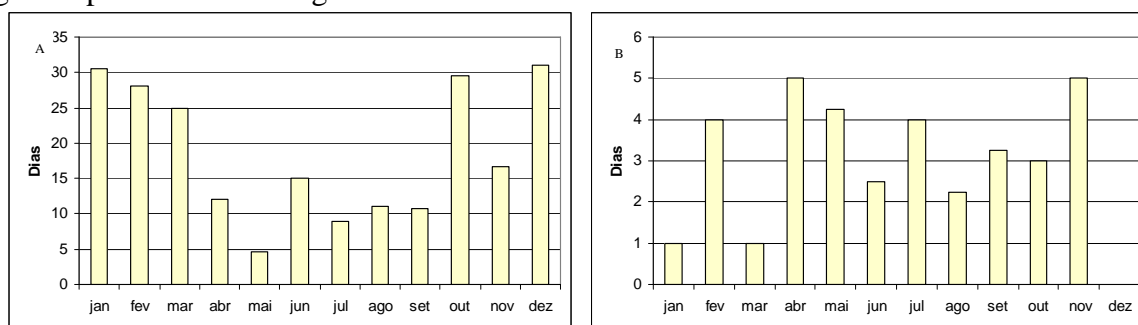


Figura 3. (A) Tempo médio em dias decorrido entre eventos consecutivos de passagem de frentes frias pelo reservatório de Itumbiara, GO; (B) Média mensal da duração (dias) dos eventos frontais, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

No período inverno, há um intervalo médio de treze dias entre a passagem de frentes frias consecutivas e no verão, esse intervalo aumenta para 25,7 dias (Figura 3A). No mês de maio, o intervalo é menor (4 dias). Outra informação relevante em relação aos sistemas frontais que ocorreram no período estudado é a duração (dias) de cada evento (Figura 3B). Observa-se que as maiores médias ocorreram nos meses de abril e novembro, ambos com durações médias de cinco dias. Em janeiro e março as médias foram de um dia. No período de inverno, as frentes duraram em média 2,6 dias enquanto no verão, a duração foi de 3,9 dias. Nenhum evento foi

contabilizado em dezembro nos anos analisados no presente trabalho. Os dados referentes às médias para o período de inverno e para o período de verão são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações sobre os sistemas frontais observados nos períodos de inverno e verão para a série estudada durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

	Inverno	Verão
Média do número de dias dos sistemas frontais	3,35	2,67
Média do número de dias entre a passagem dos sistemas frontais	13,08	25,72
Média do número total de sistemas frontais	8,17	2,00

3.2 Análise da qualidade da água

Para a análise dos efeitos dos eventos frontais na qualidade da água do reservatório de Itumbiara utilizou-se os dados de reflectância extraídos das imagens MODIS e estimados os valores dos parâmetros de turbidez e clorofila a partir de algoritmos simples de razão de bandas.

Os dados de clorofila estimados com dados MODIS podem ser observados na Figura 4A. Nota-se que depois da passagem da frente fria, há um aumento da quantidade de clorofila, pois com a utilização do teste ANOVA, foi possível determinar que os valores são estatisticamente diferentes ($p = 2,64E-05$) no nível de 95% de significância. Para a variável estimada turbidez, apesar das médias serem iguais estatisticamente a amplitude de variação diminuiu, indicando mistura da água.

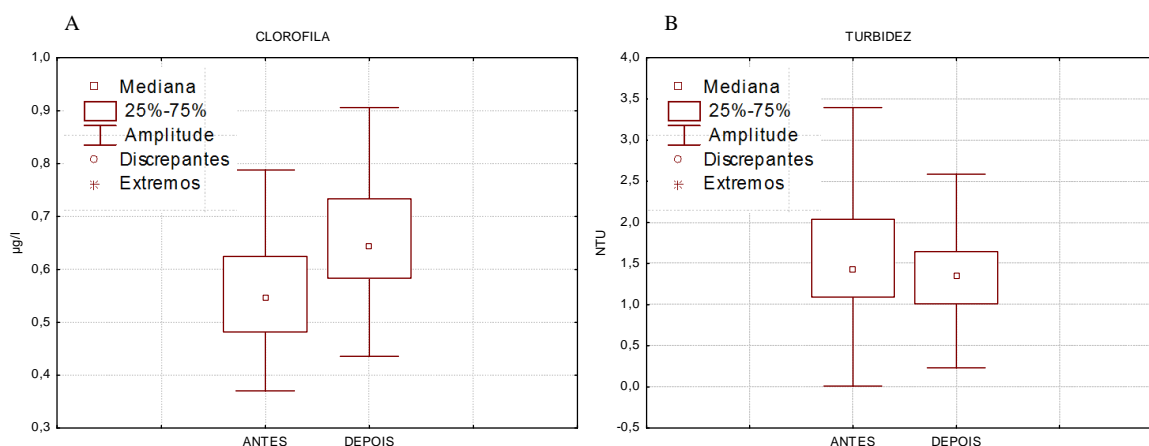


Figura 4 – (A) Comparação entre os valores de clorofila estimados antes e depois da passagem das frentes frias a partir de dados MODIS; (B) Comparação entre os valores de turbidez estimados antes e depois da passagem das frentes frias a partir de dados MODIS.

As informações de antes e depois de 10 eventos frontais foram utilizadas para a realização de uma estatística básica, onde foram calculados os valores (normalizados) médios, máximos e mínimos de cada variável (Tabela2).

Nota-se que depois dos eventos, a média da concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) diminui de 0,3400 para 0,1523. As taxas de OD nos corpos hídricos é de fundamental importância para a manutenção das comunidades aquáticas aeróbias. Um decréscimo em OD provoca, entre outros efeitos, a morte de peixes e demais organismos aquáticos (REBOUÇAS, 2002). Segundo Esteves (1988), fortes déficits de oxigênio em toda a coluna d'água podem ocorrer eventualmente, quando por ação de ventos fortes, a estratificação térmica é desfeita. Nestas condições a água do hipolimnion enriquece a água epilimnionica com compostos redutores,

como matéria orgânica em diferentes estados de decomposição, amônio, gás sulfídrico e metano, que ao se oxidarem consomem grande parte ou a totalidade do oxigênio dissolvido da coluna d'água.

Tabela 2 - Valores (normalizados) máximo, médio e mínimo dos parâmetros limnológicos medidos pela boia SIMA antes e depois da passagem das frentes frias.

	ANTES			DEPOIS		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
Condutividade	0,0380	0,0886	0,1139	0,0380	0,0911	0,1392
Conc. OD	0,1082	0,3400	0,9942	0,1094	0,1523	0,1803
pH	0,1126	0,5839	0,9387	0,1308	0,5728	0,9702
Conc. NH₄⁺	0	0,3854	0,9321	0,0010	0,4431	0,8803
Conc. NO₃⁻	0,0446	0,0496	0,0572	0	0,0418	0,0696
Turbidez	0,0004	0,1237	0,2983	0,0009	0,1488	0,3786
Clorofila	0,0029	0,0417	0,1912	0,0046	0,1508	0,5432

A mistura vertical e horizontal que ocorre após a passagem de frentes frias tem impactos e consequências sobre a dinâmica das comunidades fitoplanctônicas e nos padrões de mistura dos ecossistemas de água doce. Turbulência intensa antes e durante os eventos de frentes frias causa mistura promovendo o crescimento de diatomáceas e *Chlorophyceae* durante estes períodos (Thornton, 1990). Com os dados de clorofila medidos pela boia antes e depois da passagem das frentes frias nota-se que houve um aumento considerável da variável, antes da passagem a média era de 0,0417 e depois de 0,1508. Apesar da magnitude da variação dos dados estimados por satélite ser menor do que a dos dados medidos pela boia, os resultados para as duas análises são concordantes. Além disso, os dados medidos pela boia são de apenas um ponto amostral, já os valores estimados com dados MODIS foram contabilizados em todos os compartimentos do reservatório.

Os dados médios de turbidez medidos pela boia mostraram um aumento de 0,1237 para 0,1488 depois da passagem da frente, com máximo de 0,3788, resultado diferente em comparação com os dados estimados por satélite, onde quase não houve variação. Essa diferença pode ser explicada também pela quantidade de pontos amostrais, pois com os dados estimados por meio das imagens pôde-se usar informações de todo o reservatório.

Considerando as variáveis medidas pela boia SIMA durante a passagem da frente fria observada entre os dias 17 e 24 de abril de 2010, nota-se (Tabela 2) que o valor máximo da variável turbidez (0,7511) foi registrado 4 dias depois do começo do evento. Esse valor foi quase 8 vezes maior do que o valor registrado antes da passagem da frente. Comparando aos dados mostrados na Tabela 2, observa-se que os valores depois da passagem da frente fria também são maiores. Porém, essa diferença foi menos acentuada. Depois de três dias, o valor da clorofila foi 5 vezes maior do que na data inicial. A concentração de nitrato (Figura 5A) no dia inicial tinha uma média de 0,04626 e no final do período da frente, o valor diminuiu para 0,04603. Porém, 9 dias depois do começo do evento foi registrado uma média de 1,00, ou seja, houve um aumento considerável já que foi registrado o maior valor de toda a série.

As medidas de condutividade e pH (Figuras 5B, 5C) foram menores na data posterior à passagem da frente fria, respectivamente 0,1622 e 0,0506. Porém, 3 dias depois do final do evento os valores aumentaram para 0,4966 e 0,1265, respectivamente. A variável amônia (Figura 4B) no dia inicial tinha um valor de 0,7941 e diminuiu gradativamente até atingir o valor mínimo de 0,1465, também no décimo primeiro dia depois do começo (como o pH e a condutividade). Esses valores foram observados em apenas um caso de passagem de frente fria para servir como exemplo. No entanto, a dinâmica entre esses elementos é complexa e

exige uma análise na dimensão espacial, já que os dados foram obtidos em um único ponto do reservatório.

De acordo com Carlile et al. (1989), é necessário determinar a escala de mensuração mais adequada para diferentes processos ou propriedades físicas sendo que diferentes escalas de medidas são necessárias para estudar os vários processos influenciando um fenômeno. A heterogeneidade espacial parece restringir a possibilidade de transpor informação de uma escala para outra. Todavia, em paisagens heterogêneas as medidas obtidas em escalas mais finas geralmente não podem ser somadas diretamente para produzir estimativas regionais. Médias ponderadas nem sempre produzem mensurações razoáveis porque a heterogeneidade pode influenciar o processo de modo não linear.

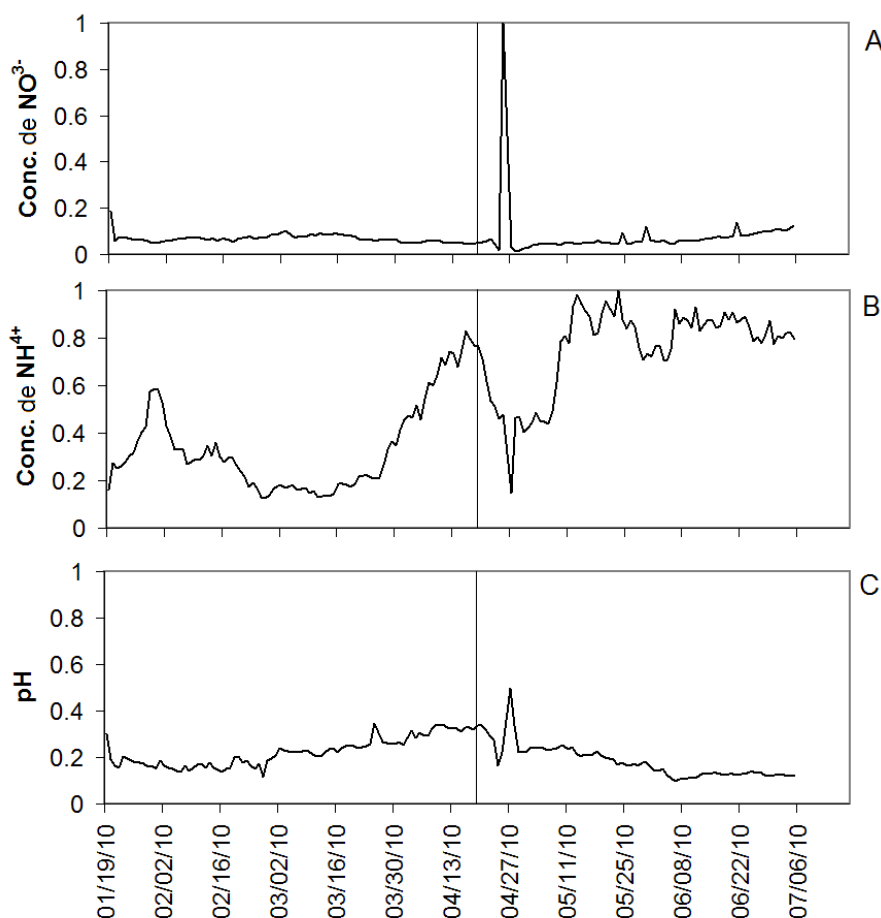


Figura 5 - Variação das concentrações de (A) nitrato, (B) amônia e (C) pH medidos pela boia SIMA. O período de ocorrência da frente fria está marcado na série por uma linha preta vertical.

4 Conclusões

Com a série de dados do sensor MODIS e da boia SIMA foi possível avaliar a influência das frentes frias sobre as variáveis que alteraram a qualidade das águas do Reservatório de Itumbiara, GO. Observou-se que a passagem de frentes frias muda o comportamento dos parâmetros limnológicos. As informações temporais obtidas pela boia SIMA e pelas imagens de satélite foram de relevante importância para a identificação de padrões sazonais e de influência de sistemas transientes que agiram sobre a região do reservatório. Notou-se que no período de inverno, especificamente nos meses de maio a agosto foram contabilizadas as maiores quantidades (5) de eventos de frentes frias. Os valores registrados da variável clorofila depois da passagem das frentes frias foram estatisticamente maiores do que as medidas anteriores aos eventos.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Mestrado. Os autores agradecem à FAPESP (Projeto: 2007/08103-2) pelo auxílio financeiro.

Referências Bibliográficas

Andrade, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185 p. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

Carlile, D. W. et al. Determination of ecological scale. **Landscape Ecology**, v.2, n.4, p.203-213, 1989.

Curtarelli, M.P. ; Alcântara, Enner ; Rennó, CD ; Stech, J.. Physical changes within a large tropical hydroelectric reservoir induced by wintertime cold front activity. **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 18, p. 3079-3093, 2014.

Esteves, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência: FINEP, 1988. 575 p., il.

Fortune, M.; Kousky, V.E. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. **Monthly Weather Review**, v.111, n.1, p.181-196, 1983.

INPE. **Condições climáticas observadas no Brasil em 2009**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2009. Disponível em: http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/Sintese_Climatica_2009.pdf

Kousky, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

Nascimento, R. F. F. **Utilização de dados MERIS e in situ para a caracterização bio-óptica do reservatório de Itumbiara, GO**. 2010. 113 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.15.18.39-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Rebouças, A. de C. (Org). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.

Garg, V.; Jothiprakash, V. Estimation of useful life of a reservoir using sediment trap efficiency. **Journal of Spatial Hydrology**, v.8, n.2, p.1-14, 2008.

Rask, M. et al. An introduction to the limnology of the Finnish Integrated Monitoring lakes. **Boreal Env. Res**, v. 1, n. 3, p 263–274, 1998.

Stech, J. L., Lima, I. B. T., Novo, E. M. L. M., Silva, C. M., Assireu, A. T., Lorenzetti, J. A., Carvalho, J. C., Barbosa, C. C. F., Rosa, R. R.: Telemetric monitoring system for meteorological and limnological data acquisition, **Verh. Internat. Verein. Limnol.**, v. 29, p. 1747–1750, 2006.

Thornton, K. W.; Kimmel, B. L.; Payne, F. E. **Reservoir Limnology: Ecological perspectives**. JohnWiley & Sons: New York, 1990.

Tundisi, J.G.; Matsumura-Tundisi, T.; Luzia, A.P.; Pasoerini, MO.; Chiba, W.; Sebastian, N.Y. Cold fronts and reservoir limnology: an integrated approach towards the ecological dynamics of freshwater ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, p. 815-824, 2010.