

Análise temporal da qualidade da água de reservatório de abastecimento humano por sensoriamento remoto e da ocorrência de doença diarreica aguda em um recorte espacial do semiárido brasileiro

Marcus Andre Fuckner ¹

¹ Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial Sul Área 5 Quadra 3 – 70610-200 – Brasília – DF, Brasil
marcus.fuckner@ana.gov.br

Abstract. The Brazilian semiarid region is characterized by low water availability, intermittent rivers and the massive use of dams as a water source for human supply and other uses. This research used a methodology for analysis of remote sensing images of the MODIS time series for monitoring the spectral response of the water from Armando Ribeiro Gonçalves reservoir in the semiarid and time series of acute diarrheal disease (ADD) occurrence, weekly recorded from 2002 to 2012, in 22 municipalities of Rio Grande do Norte state supplied by this reservoir. The results showed that the prevalence of ADD in these municipalities each year of the time series was not associated with the period of larger influence of chlorophyll-a, an indicator of the eutrophication level of the water, and / or decrease in the amount of water in reservoir, but on the period of greatest influence of inorganic material suspended in the spectral signature of the water associated with rainy periods and the flood of the reservoir. Greater association of ADD occurrence dynamics with local climate dynamics was observed, and other variables such as seasonal rainfall seem to have greater influence to explain the temporal patterns of occurrence of the disease in this region.

Palavras-chave: reservatório, eutroficação, diarreia, semiárido, açude, eutrofização, diarreia, semiárido.

1. Introdução

Um amplo espectro de processos naturais e antrópicos afeta as características físicas, químicas e biológicas da água. A contaminação por excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que conduz à eutrofização, tornou-se um dos problemas de qualidade da água mais difundidos no mundo (Carr e Neary, 2008). Uma das consequências da eutrofização é o aumento da presença de patógenos e da probabilidade de ocorrência de doenças de veiculação hídrica (Tundisi et al., 2006). A eutrofização de reservatórios na região semiárida do Brasil foi analisada por autores como Bouvy et al. (2000), em Pernambuco e Figueirêdo et al. (2007), no Ceará. Os autores encontraram resultados preocupantes uma vez que os reservatórios são fontes de abastecimento humano.

Quanto ao registro de graves danos à saúde devido a eutrofização no semiárido, Teixeira et al. (1993) identificaram associação entre a floração de cianobactérias no reservatório da hidrelétrica de Itaparica e a morte de 88 pessoas, em 1988. Jochimsen et al. (1998), por sua vez, concluíram que devido à contaminação da água de um açude por cianobactérias em 1996, 69 pacientes faleceram após tratamento em uma clínica de hemodiálise de Caruaru, Pernambuco.

O monitoramento da qualidade da água está integrado à rede hidrometeorológica existente no Brasil. Os custos de implantação e operação das estações são elevados, pois demandam sistemas automáticos ou coletas de campo e análises laboratoriais. Complementarmente, séries temporais de sensoriamento remoto permitem suprir lacunas na coleta, armazenagem, consistência e compartilhamento dos dados obtidos através do monitoramento convencional, cobrindo grandes áreas com alta repetitividade, baixo custo e rápido acesso a informação.

O *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), com imagens diárias e composições de oito dias das melhores tomadas de dados, a partir de um controle de qualidade, consiste em uma importante fonte para estudos de qualidade da água por sensoriamento remoto (Feng et al., 2011). Esses estudos apresentam dois enfoques principais: (a) um voltado à turbidez, associado ao material inorgânico em suspensão (Villar, 2013), e (b) outro à eutrofização, associado à concentração de pigmentos tais como a clorofila-a (*Chla*), importante indicador do estado trófico de reservatórios (Ventura, 2013).

Nesse sentido, o objetivo da pesquisa é efetuar uma análise dos padrões temporais de concentração de *Chla* e turbidez do açude Armando Ribeiro Gonçalves (ARG) por sensoriamento remoto e associar os dados obtidos com a ocorrência de episódios de doença diarreica aguda (DDA) nos 22 municípios potiguares abastecidos por esse açude (Figura 1).

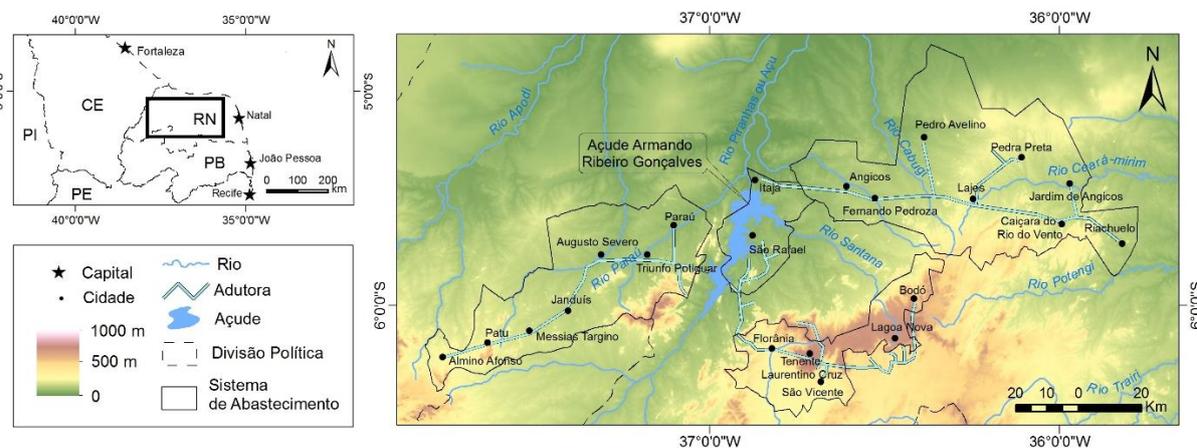


Figura 1. Localização do recorte espacial de estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e de ANA (2011).

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia da pesquisa baseou-se na extração da reflectância de imagens do sensor MODIS. Foi efetuado o processamento de uma série temporal dos produtos *MOD09* (satélite Terra) e *MYD09* (satélite Aqua), em composições de oito dias calculadas a partir das imagens diárias. Os produtos disponibilizam dados de reflectância corrigida para os efeitos da atmosfera, além de informações sobre as condições de aquisição das imagens na banda de qualidade (posição solar e do satélite, condições atmosféricas). Foram processadas 986 imagens com 500 metros de resolução espacial, da cena *H14V09*, de 2002 a 2012, acessíveis através do aplicativo *GetModis*, desenvolvido pelo Programa *The Environmental Research Observatory: Geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon basin* (ORE-HYBAM).

A análise da série temporal de imagens foi efetuada pelo programa *MODIS Reflectance Retrieval over Rivers (Mod3R)* (Martinez et al., 2009)*. A fraca resolução espacial das imagens MODIS induz a presença de pixels misturados. A variabilidade temporal desse processo de mistura espectral implicou o uso do programa *Mod3R* que permite determinar de maneira automatizada os pixels puros de água nos quais não há interferência radiométrica direta das superfícies ribeirinhas. Após ter sido delimitada uma zona de interesse (máscara) na área do espelho d'água, a detecção de pixels puros de água é realizada pelo *MOD3R* em quatro etapas: (1) seleção dos pixels não afetados pelas condições atmosféricas segundo as informações de metadados dos produtos *MOD/MYD09A1*; (2) extração dos pixels localizados na zona de interesse definida; (3) segmentação e classificação dos pixels em grupos homogêneos a partir do algoritmo *K-means* e; (4) detecção automática dos pixels puros de água a partir da resolução iterativa de modelos lineares de mistura espectral. Foram definidas duas máscaras: uma na área localizada mais a montante do reservatório, onde há maior alteração na composição da água ao longo do tempo devido à presença do material inorgânico em suspensão que aflui do Rio Piranhas-Açu e, outra na área mais a jusante do reservatório.

O cálculo dos índices de reflectância nesse estudo foi efetuado a partir da fusão dos relatórios de imagens processadas do Terra (*MOD*) e Aqua (*MYD*) pelo *Mod3R* e a execução

* Desenvolvido pelo *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) e disponível em <<http://www.ore-hybam.org/index.php/fre/Logiciels>>.

de uma rotina de processamento em *Microsoft®Excel*. A concentração de *Chla* foi estimada por um índice espectral que corresponde à diferença entre a reflectância apresentada nas bandas espectrais do verde e do vermelho (Martinez et al., 2011). O valor do índice aumenta com a presença de algas ao passo que apresenta valores negativos em águas com presença de sedimentos (águas turvas). O uso do índice facilita a interpretação das variações temporais da radiometria e a determinação dos períodos de maior turbidez e de eutrofização.

Os dados de volume e de nível do reservatório foram obtidos do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e da ANA. Os dados de precipitação em cinco postos pluviométricos na área de estudo foram obtidos em totalização diária da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). Os dados de ocorrência de DDA foram obtidos por município por semana epidemiológica, da Secretaria de Estado da Saúde Pública do Rio Grande do Norte (SESAP), durante trabalho de campo. A DDA é um grave problema de saúde pública do Brasil. Em 2010 foram registrados, sobre toda a população, 4,341 milhões de casos (MS, 2015), isto desconsiderando o fato de que a doença é subnotificada no país.

A análise da relação entre os índices espectrais e a ocorrência de DDA foi efetuada no período de 2002 a 2012, que compreendeu 576 semanas epidemiológicas. Nesse período 437 imagens MODIS foram classificadas como de qualidade 1 ou 2 para a área do açude ARG à jusante e 352 para a área à montante, perfazendo 76 e 61 % de observações, respectivamente, em relação ao quantitativo de observações de DDA. Os dados de qualidade 2, considerada duvidosa, foram incluídos na análise para aumentar a quantidade de observações. No entanto, um procedimento prévio de consistência foi empregado sobre os dados de nível 2, visando detectar *outliers* de ruído. O procedimento suprimiu valores com diferença de mais de 200 pontos entre os índices de imagens consecutivas (data anterior e posterior), os quais ocorreram em 4 casos para o açude ARG jusante e 2 casos na área a montante.

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a série temporal do índice espectral calculado para o açude ARG. A série histórica mostrou uma tendência de queda do índice no início de cada ano, com posterior retomada de valores elevados. Isto provavelmente se deve a influência do material inorgânico em suspensão e outros componentes opticamente ativos da água na reflectância apresentada após os períodos chuvosos (Figura 3). A alteração da composição da água em virtude da afluência para o reservatório nos períodos de maior volume de chuvas é mais perceptível na área de entrada, denominada ARG montante (Figura 2B).

A análise da precipitação registrada por três estações próximas ao açude ARG, uma a montante do reservatório, na cidade de Jucurutu, outra na porção central do mesmo, em São Rafael, e uma terceira a jusante da barragem, em Açú (Figura 3), permitiu estabelecer uma relação direta com os índices espectrais, notadamente nos anos chuvosos de 2004, 2006 e 2008, destacando-se os volumes registrados em Jucurutu, entrada do reservatório. A relação tende a ser inversa, ou seja, o aumento na precipitação leva a redução nos valores do índice espectral.

Observa-se também uma relação inversamente proporcional entre os valores do índice espectral estimado pelo *MOD3R* (Figura 2) e a evolução do volume de água do reservatório (Figura 4) ao longo da série temporal, havendo redução nos valores do índice em períodos de aumento do volume de água armazenado (enchente).

A Figura 5 apresenta a evolução do total de casos de DDA registrados por semana epidemiológica nos 22 municípios abastecidos pelo açude ARG. A diminuição nos valores do índice espectral (Figura 2) foi verificada em períodos de aumento no registro de casos de DDA, como em 2004, 2006, 2008 e 2009. Nos anos em que houve pequena variação no índice, como em 2005, 2007 e 2010, não foram observados picos tão elevados de incidência da DDA. As maiores ocorrências de DDA foram observadas no período chuvoso, com destaque para 2004, 2006 e 2009, anos esses em que foram registradas chuvas intensas, tendo sido notificados cerca

de quinhentos casos de DDA em uma única semana em cada ano citado. Por essa razão, observou-se que não é o período do aumento das concentrações de *Chla* que está associado ao período de maior ocorrência de DDA, mas, sim, o período de maior concentração de sedimentos em suspensão na água, associado à lavagem da bacia hidrográfica no período chuvoso que, por sua vez, contribui para ocasionar a queda da participação da *Chla* na resposta espectral da água.

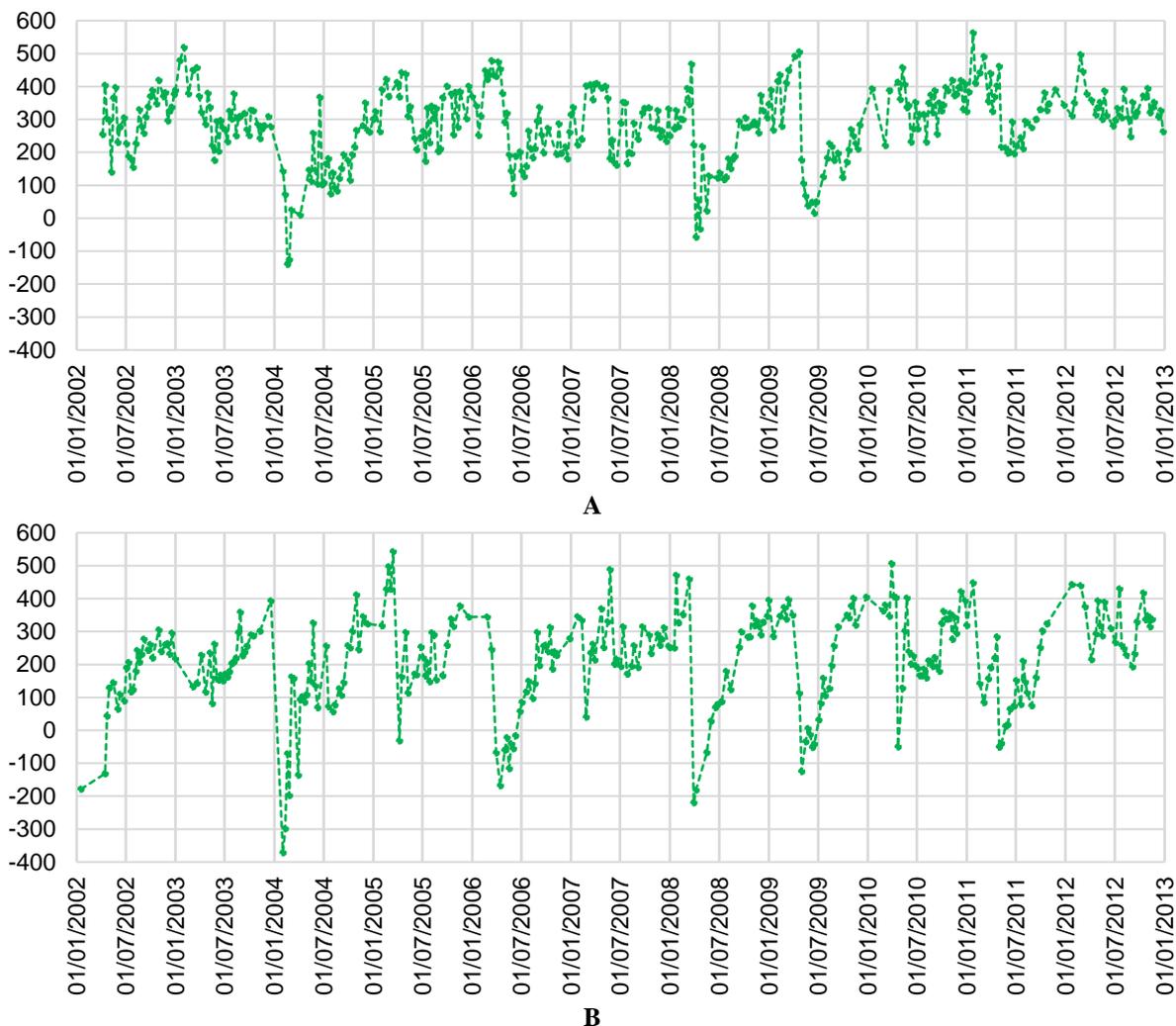


Figura 2. Índice espectral do açude ARG jusante (A) e montante (B) (2002-2012).

Nota: Valores multiplicados por 10^3 . Somente dados de nível de qualidade 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

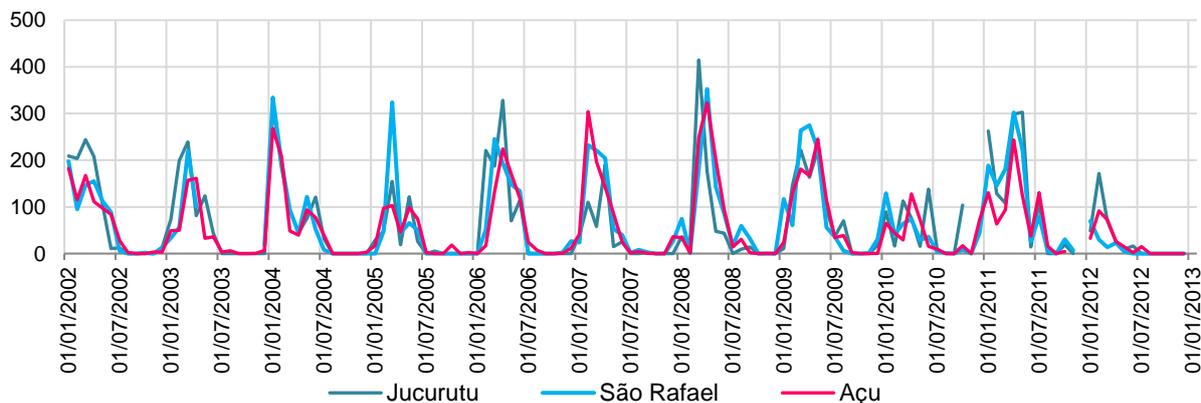


Figura 3. Precipitação mensal (mm) em estações próximas ao açude ARG (2002-2012).

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da EMPARN (dados não publicados).

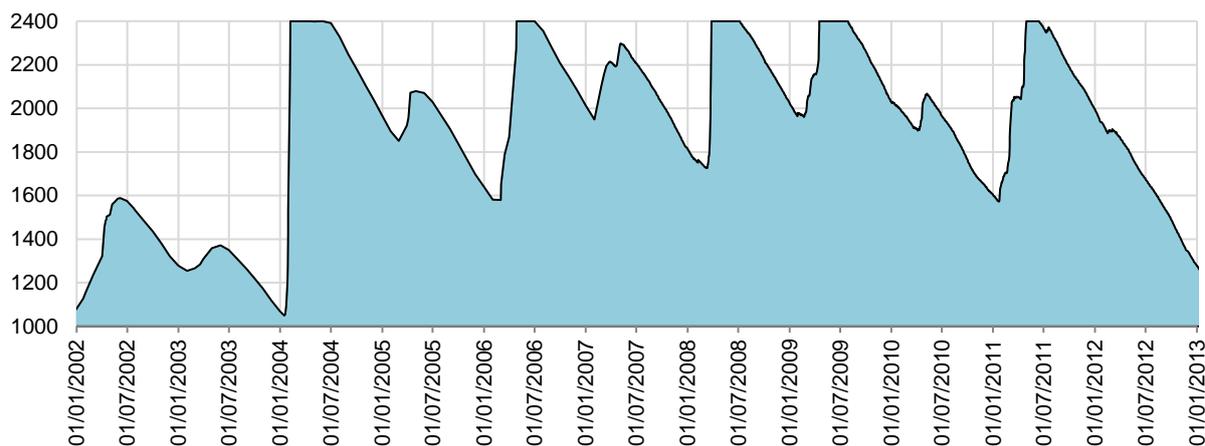


Figura 4. Série histórica volumétrica (hm³) do açude ARG (2002-2012).

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do DNOCS organizados pela ANA.

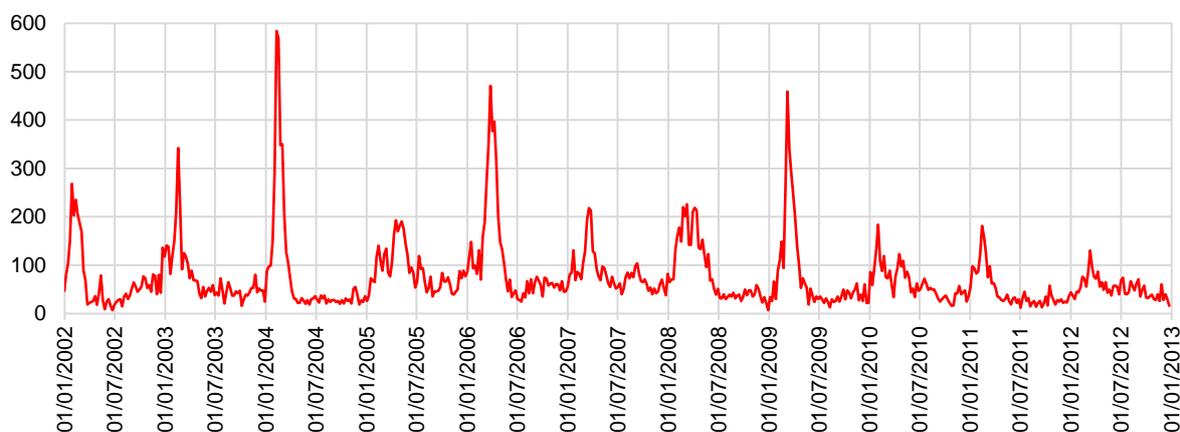


Figura 5. Casos de DDA nos 22 municípios abastecidos pelo açude ARG (2002-2012).

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da SESAP (dados não publicados).

Foi observado que os valores de DDA aumentam no período de chuvas e, em geral, logo após as chuvas (Figura 3). Em decorrência disso os dados resultantes do processamento das imagens *Mod3R* foram utilizados também para avaliar a presença da turbidez da água. Por essa razão, para facilitar a representação, o índice espectral proposto foi invertido para a subtração da reflectância estimada na banda verde em relação à banda vermelha.

A Figura 6 apresenta a evolução das séries temporais desse índice espectral extraído das imagens MODIS e da ocorrência da DDA. Observa-se que as águas do reservatório demandam tempo para estabilização de sua resposta espectral. O aumento dos valores do índice é provocado pela entrada de material inorgânico em suspensão e outros componentes da água em virtude da maior vazão provocada pelas chuvas e conseqüente aumento no volume de água armazenado. Este fenômeno geralmente ocorre nos primeiros meses de cada ano e os valores do índice reduzem paulatinamente ao longo do segundo semestre, quando as águas se tornam mais eutrofizadas. As séries de DDA também apresentam um pico nos primeiros meses do ano, com um crescimento muito rápido no número de casos, que logo é reduzido, permanecendo inferior a cem casos por semana epidemiológica durante o segundo semestre de todos os anos da série. Isto permite concluir que o impacto é intenso e marcante sobre a ocorrência da DDA, no entanto o retorno à condição de estabilidade de ocorrência da doença ocorre rapidamente.

A amplitude das escalas de valores do índice espectral entre as áreas do açude ARG a jusante e a montante também permitem inferir sobre características da qualidade das águas, associadas ao fluxo hidrosedimentar de entrada no reservatório. 51% das observações da área

a jusante apresentaram valores do índice espectral inferiores a -300 enquanto na área a montante o percentual foi de apenas 30%. Uma maior permanência no tempo de valores mais baixos do índice é representativa de águas com uma maior resposta espectral da banda do verde, enquanto o inverso é válido para a mesma observação em relação a banda do vermelho. Pode-se concluir que as águas do reservatório apresentam um gradiente de montante para jusante com águas que tendem a ficar mais turvas a montante e mais eutrofizadas a jusante. Tal fenômeno já fora atestado por Martinez et al. (2011), que encontraram uma relação entre o nível dos reservatórios estudados no semiárido e os índices de eutrofização, definidos a partir de uma álgebra de bandas espectrais e da correlação entre os dados de satélite e medidas da concentração de *Chla* efetuadas em campo. Os autores apontaram uma dinâmica temporal de aumento nas concentrações de *Chla* no açude ARG nos períodos de vazante e redução nos de enchente.

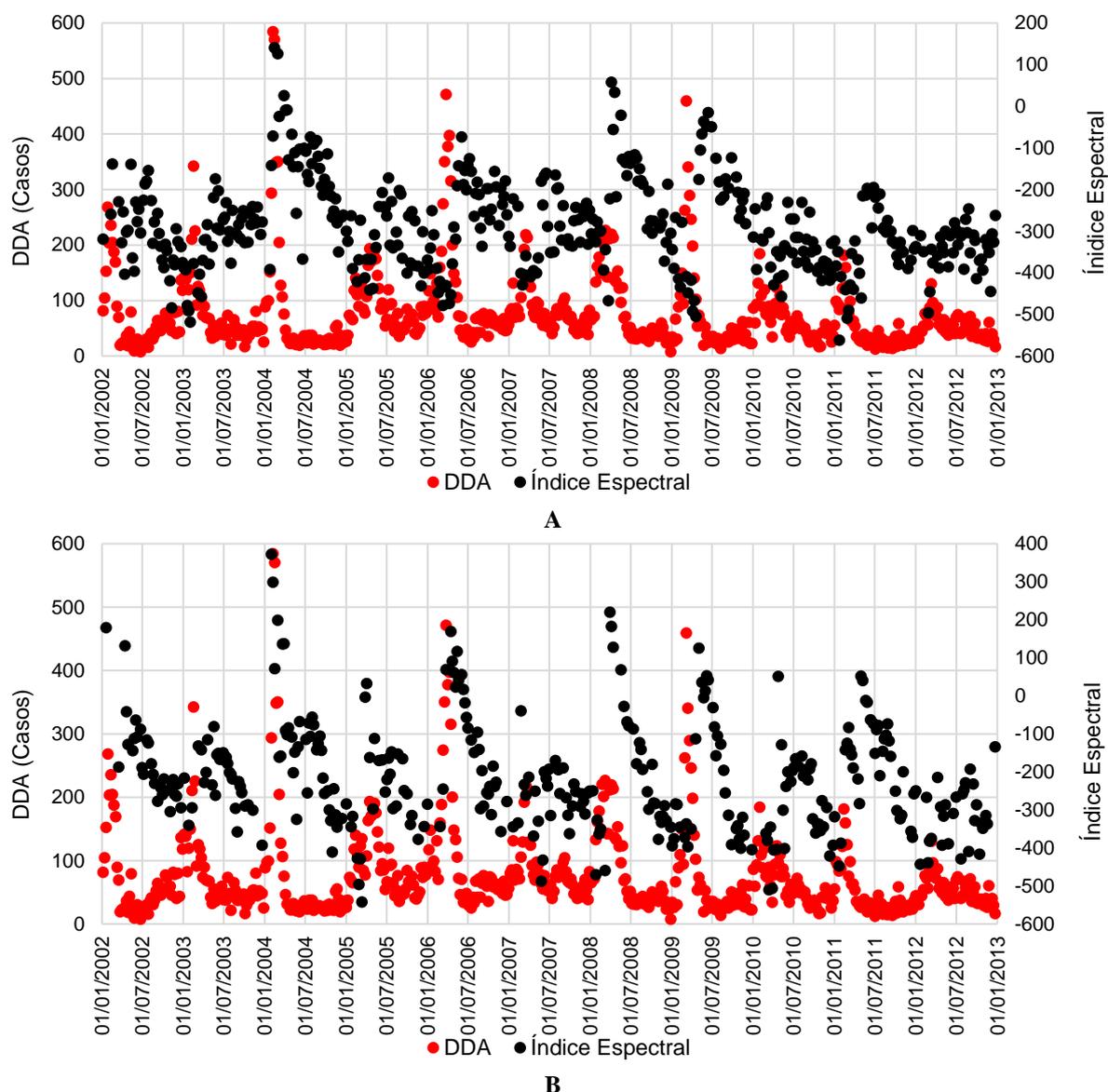


Figura 6. Séries temporais de DDA na área abastecida pelo açude ARG e índices espectrais das imagens MODIS para o açude ARG jusante (A) e montante (B) (2002-2012).
 Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados MODIS e da SESAP (dados não publicados).

A turbulência ocasionada pelas chuvas e o impacto de sedimentos e nutrientes pode ser apenas temporário, dependendo do estado de eutrofização do reservatório. Os sedimentos decantam e a sua influência na resposta espectral da água diminui. Há estudos que evidenciam

diminuição da biomassa fitoplanctônica em reservatórios no período chuvoso e outros que evidenciam aumento ou alterações pouco significativas (Guimarães et al, 2005; Novo et al., 2007; Costa et al., 2009). Por essa razão, Ventura (2013) conclui que as alterações provavelmente derivam da combinação de diversos fatores, como o volume e a intensidade das chuvas, dimensões do açude e uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

A eutrofização ocorre em inúmeros reservatórios, dificultando a definição de áreas prioritárias de intervenção para a melhoria da qualidade da água de abastecimento no Brasil. Investir na coleta e tratamento de esgoto e na diminuição da entrada de nutrientes nos corpos d'água é a melhor saída para a melhoria da qualidade da água armazenada em reservatórios. No entanto, parece haver maior relação entre a turbidez da água e a DDA do que com a *Chla*, sendo este elemento o mais importante a ser considerado quando do estudo das doenças diarreicas. Além dos baixos índices de coleta e tratamento de esgoto, fontes de poluição difusa ou pontual associadas às características da ocupação humana na região constituem um grande problema do semiárido. Em muitos casos não há corpo receptor e a disposição do esgoto é efetuada no leito seco dos cursos d'água, concentrando a contaminação por coliformes fecais. Cursos d'água com regime intermitente, como é o caso da área de estudo, impedem a diluição dos efluentes, e as primeiras chuvas de cada ano efetuam uma lavagem de todo o solo carreando os contaminantes através de seus leitos. Desse modo, a precipitação corresponde a um elemento de impacto importante para a explicação da dinâmica sazonal de ocorrência da DDA na região semiárida.

Apesar das ferramentas de sensoriamento remoto contribuírem para os estudos da qualidade da água de reservatórios, há necessidade de um grande volume de dados auxiliares e trabalho de campo para possibilitar o entendimento de toda a dinâmica envolvida. Também é de fundamental importância envolver as condições climáticas nos estudos, notadamente o regime de chuvas local, pois a variável sazonalidade se mostrou relevante na compreensão das respostas espectrais dos reservatórios e da ocorrência de doenças diarreicas.

Ademais, cumpre ressaltar que, quanto ao abastecimento de água, embora as cidades sejam abastecidas por adutoras ou a partir de pontos de captação direta no reservatório, há municípios em que uma parcela considerável da população não é abastecida pela rede geral. Isto porque as redes gerais abastecem somente as áreas urbanas (em condições de normalidade de chuvas) e, em alguns casos, algumas comunidades rurais. Dessa forma é importante considerar as características espaciais das diferentes fontes de abastecimento de água, inclusive cisternas e carros-pipa e, a disponibilidade de seu atendimento à população ao longo do tempo.

4. Conclusões

O índice espectral calculado sobre os dados das imagens MODIS nas faixas do verde e do vermelho mostrou-se adequado para a análise da evolução da resposta espectral da água ao longo da série temporal de estudo. Trabalhos futuros poderão envolver campanhas de campo para calibrar os resultados obtidos, bem como poderão utilizar dados de monitoramento *in loco* de parâmetros de qualidade da água do reservatório, coletados por diferentes instituições e, ainda, analisar em detalhe características particulares de sua bacia hidrográfica, adotando esta escala espacial para pesquisa e, considerando os usos múltiplos como irrigação e piscicultura.

A análise integrada dos dados de sensoriamento remoto com os dados de saúde permitiu concluir que os períodos de maior indicativo da influência da *Chla* sobre a resposta espectral da água dos reservatórios não foram associados aos períodos de maior ocorrência da DDA nos municípios de estudo, mas sim os períodos de maior influência do material inorgânico em suspensão, associados aos períodos chuvosos. Dessa forma, a hipótese de que uma maior concentração de *Chla* na água levaria a maior ocorrência de DDA foi refutada. Os resultados obtidos com a pesquisa apontaram para uma maior associação da DDA com a dinâmica climática local, sendo que outras variáveis como o regime das chuvas parecem ter maior influência para explicar os padrões temporais de ocorrência da doença.

A queda no volume de água dos reservatórios se mostrou um bom indicador para a constatação da situação de seca. Tendo em vista o fato de que o abastecimento da população pela rede geral de água não é universalizado, características particulares das diferentes fontes de abastecimento de água bem como de suas disponibilidades ao longo do tempo emergem como questões de relevância para o entendimento do processo saúde-doença em relação à DDA.

Agradecimentos

O autor agradece ao Dr. Jean-Michel Martinez (IRD) pelo apoio com a metodologia empregada e revisão do artigo bem como à SESAP pela disponibilização dos dados de DDA.

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Águas (ANA). **Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água**. Brasília: ANA, 2011. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Home.aspx>. Acesso em: 20 abr. 2015.
- Bouvy, M., Falcão, D., Marinho, M., Pagano, M., Moura, A. Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 23, p. 13-27, 2000.
- Carr, G. M. e Neary, J. P. **Water Quality for Ecosystem and Human Health**, 2008. 2ª ed. United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System. Disponível em: http://www.gemswater.org/publications/pdfs/water_quality_human_health.pdf. Acesso em: 15 mar. 2015.
- Costa, I. A. S., Cunha, S. R. D. S., Panosso, R., Araújo, M. F. F., Melo, J. L. S., Eskinazi-Sant'Anna, E. M. Dinâmica de Cianobactérias em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte. **Oecologia Brasiliensis**, v. 13, n. 2, p. 382-401, 2009.
- Feng, L., Hu, C., Chen, X., Li, R., Tian, L., Murch, B. MODIS observations of the bottom topography and its inter-annual variability of Poyang Lake. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2729-2741, 2011.
- Figueirêdo, M. C. B., Teixeira, A. S., Araújo, L. F. P., Rosa, M. F., Paulino, W. D., Mota, S., Araújo, J. C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 399-409, 2007.
- Guimarães, A. O., Melo, A. D., Ceballos, B. S. O., Galvão, C. O., Ribeiro, M. M. R. Aspectos da gestão do açude Epitácio Pessoa (PB) e variação da qualidade de água. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais**, Campo Grande, 2005.
- Jochimsem, E. M. e Azevedo, S. M. F. O. Liver Failure and Death Following Exposure to Microcystin Toxins at a Hemodialysis Center in Brazil. **The New England Journal of Medicine**, v. 36, p. 373-378, 1998.
- Martinez, J. M., Guyot, J. L., Filizola, N., Sondag, F. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. **Catena**, v.79. p. 257-264, 2009.
- Martinez, J. M., Ventura, D., Vieira, M. R., Attayde, J. L., Bubel, A. P., Coimbra, M. R., Oliveira, E. Satellite-based monitoring of reservoir eutrophication in the Brazil Semi-arid region. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Curitiba, 2011.
- Ministério da Saúde (MS). Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). **Informações de Saúde (TABNET)**. Brasília: MS, 2015. Disponível em: <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php>.
- Novo, E. M. L. M., Barbosa, C., Freitas, R. M. Sistemas aquáticos continentais. In: Rudorff, B. T. et al (orgs.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007, p. 265-275.
- Teixeira, M. G., Costa, M. C., Carvalho, V. L., Pereira, M. S., Hage, E. Gastroenteritis Epidemic in the Area of the Itaparica Dam, Brazil. **Bulletin of the Pan American Health Organization**, v. 27, n. 3, p. 244-253, 1993.
- Tundisi, J. G., Matsumura-Tundisi, T., Abe, D. S., Rocha, O., Starling, F. Limnologia de águas interiores: impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos. In: Rebouças, A. C., Braga, B., Tundisi, J. G. (orgs.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 2006, p. 203-240.
- Ventura, D. L. T. **Uso do Sensoriamento Remoto para Monitoramento da Concentração de Clorofila A em Açudes do Semiárido**. 2013. 59p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade de Brasília, 2013.
- Villar, R. A. E. **Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares na Bacia Amazônica a partir de imagens de satélite**. 2013. 226p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.