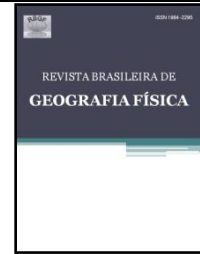




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Bioindicadores e Sensoriamento Remoto como Subsídios à Gestão dos Recursos Hídricos no Semiárido Brasileiro

Thaís Silva Lima¹; Ana Lúcia Bezerra Candeias²; Maristela Casé Costa Cunha³

¹Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal de Pernambuco, Av. Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, CEP 50670-901, Recife, PE, Brasil. E-mail: slima_thais@hotmail.com (autor correspondente). ²Professora Doutora do Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, Av. Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, CEP 50670-901, Recife, PE, Brasil. ³Professora Doutora do Departamento de Educação. Universidade do Estado da Bahia, Rua da Gangorra, 503, Chesf, CEP 48608-240, Paulo Afonso, BA, Brasil.

Artigo recebido em 06/06/2017 e aceito em 25/02/2018

RESUMO

Os impactos provenientes das atividades antrópicas sobre os ecossistemas aquáticos têm gerado grandes preocupações quanto à quantidade e qualidade dos recursos hídricos. No semiárido brasileiro, os reservatórios artificiais apresentam importância tanto de ordem social como econômica, entretanto, o processo de degradação tem comprometido seus múltiplos usos, tornando-se um entrave no âmbito da gestão ambiental. Particularmente, o reservatório Sobradinho, localizado no submédio São Francisco, contribui para diferentes usos, tais como, geração de energia, regularização da vazão do rio, abastecimento, agricultura, entre outros. Atualmente, o reservatório vem sofrendo grandes variações de armazenamento de água devido à variabilidade climática da região. O presente trabalho tem como objetivo apresentar as principais aplicações da comunidade de macroinvertebrados bentônicos e do sensoriamento remoto, enfatizando sua importância como subsídios à gestão de recursos hídricos, especialmente, na região semiárida. Além disso, busca-se descrever os aspectos gerais inerentes ao arcabouço legal e à estrutura institucional da gestão em bacias hidrográficas. Percebe-se a necessidade de estudos mais integrados que possam diagnosticar os fatores que contribuem para a degradação ambiental, servindo como suporte para um adequado gerenciamento dos recursos hídricos. Palavras-chave: gestão, reservatório sobradinho, qualidade ambiental, geotecnologia, ecossistema.

Bioindicators and Remote Sensing as Subsidies for the Management of Water Resources in the Brazilian Semi-arid

ABSTRACT

The impacts of anthropic activities on aquatic ecosystems have generated major concerns about the quantity and quality of water resources. In the Brazilian semi-arid, artificial reservoirs are of both social and economic importance, however, the degradation process has compromised its multiple uses, becoming an obstacle in the ambit of environmental management. Particularly, the Sobradinho reservoir, located in the submedio São Francisco River, contributes to different uses, such as power generation, river flow regulation, supply, agriculture, among others. Actually, the reservoir has undergone great variations of water storage due to the climatic variability of the region. The present work aims to present the main applications of the community of benthic macroinvertebrates and remote sensing, emphasizing their importance as subsidies to the management of water resources, especially in the semi-arid region. In addition, it seeks to describe the general aspects inherent to the legal framework and the institutional structure of management in river basins. There is a need for more integrated studies that can diagnose the factors that contribute to environmental degradation, serving as support for an adequate management of water resources. Keywords: management, sobradinho reservoir, environmental quality, geotechnology, ecosystem.

Introdução

A qualidade e a quantidade das águas vêm sendo comprometidas pela ocupação desordenada

em bacias hidrográficas. Aliado a isso, o desenvolvimento social e econômico tem

contribuído para o aumento da demanda por água, provocando alterações de ordem física, química e biológica nos ecossistemas aquáticos (Souza et al., 2014). A disponibilidade da água depende em grande parte das mudanças climáticas. A variabilidade interanual do clima associada aos fenômenos climáticos pode gerar anomalias, evidenciando os eventos extremos, especialmente nas regiões semiáridas (Marengo, 2008).

A água que provém de reservatórios artificiais apresenta grande importância de ordem social e econômica, devido os seus múltiplos usos. Neste aspecto, é importante avaliar a qualidade da água e sua situação de vulnerabilidade frente às atividades antrópicas, visando a importância da gestão dos recursos hídricos no que se refere ao seu gerenciamento, uso e conservação (Santi et al., 2012).

As comunidades aquáticas vêm sendo utilizadas como ferramentas importantes em programas de monitoramento da qualidade ambiental (Barbola et al., 2011; Rocha et al., 2012). Neste contexto, a comunidade de macroinvertebrados bentônicos pode ser utilizada em avaliações da qualidade da água (Rosenberg e Resh, 1993). Os indivíduos desta comunidade habitam no sedimento aquático e atuam como bioindicadores capazes de refletir às condições ambientais diversas. Neste sentido, podem auxiliar na detecção e prevenção dos impactos negativos (Moura-Silva et al., 2016), contribuindo para uma diagnose da qualidade ecológica da água.

O sensoriamento remoto também se apresenta como uma ferramenta eficiente em estudos ambientais. Os corpos hídricos possuem elementos que oferecem grande potencial para aplicação das técnicas de sensoriamento remoto. Deste modo, é possível desenvolver análises de dados em importantes trechos de bacias hidrográficas através de mapas temáticos, contemplando o uso e ocupação do solo e distribuição espaço-temporal.

Os reservatórios artificiais têm sofrido constantes interferências antrópicas, configurando em sérios problemas ambientais. Neste sentido, vários fatores influenciam na disponibilidade e qualidade da água para seus diversos usos. E importantes atividades socioeconômicas localizadas próximas às margens do reservatório, como a agricultura, têm contribuído para o processo de deterioração deste recurso, uma vez que há inadequação das práticas utilizadas (Melo, 2007).

Em particular, na bacia hidrográfica do rio São Francisco, o reservatório Sobradinho contribui

para os múltiplos usos da região, tais como: geração de energia, regularização da vazão do rio, abastecimento, irrigação, entre outros. Atualmente, esse reservatório vem sofrendo grandes variações de armazenamento de água devido à variabilidade climática da região. Desta forma, destaca-se a necessidade de estudos ambientais que contribuam na preservação e no gerenciamento deste corpo hídrico.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as principais aplicações da comunidade de macroinvertebrados bentônicos e do sensoriamento remoto, enfatizando sua importância como subsídios à gestão de recursos hídricos, especialmente, na região semiárida. Além disso, busca-se descrever os aspectos gerais inerentes ao arcabouço legal e à estrutura institucional da gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

Desenvolvimento

Qualidade ambiental em bacias hidrográficas

Os termos conceituais da qualidade da água não estão exclusivamente vinculados ao seu estado de pureza, mas sim às suas características físicas, químicas e biológicas. O monitoramento destas características é fundamental para obtenção de informações relacionadas às condições ambientais, especialmente em bacias hidrográficas, servindo como subsídio às tomadas de decisão que objetivam, sobretudo, a conservação e o uso sustentável das águas (Abreu e Cunha, 2015).

Tundisi (2008) discute os principais problemas globais relacionados à crise hídrica, dentre estes, destacam-se: expansão dos centros urbanos; aumento da demanda por água; estresse e escassez de água; entre outros. Como estes problemas estão relacionados à qualidade e quantidade dos recursos hídricos, a conservação da biodiversidade e a qualidade de vida da população humana também são comprometidas. O autor apresenta as principais inter-relações dos processos que afetam a qualidade e quantidade da água (Figura 1) e enfatiza que para a mitigação destes problemas deve-se considerar o gerenciamento integrado no âmbito das bacias hidrográficas.

Os diferentes usos do solo aceleram o processo de deterioração da qualidade da água, sendo um dos potenciais impactos negativos que contribuem para o acelerado processo de eutrofização (Nogueira et al., 2015). Ou seja, o nível elevado de eutrofização, indica uma resposta da pressão causada pelas atividades antrópicas.

De acordo com Esteves (1998), a eutrofização refere-se ao aumento da concentração de nutrientes nos ambientes aquáticos, especialmente fósforo e nitrogênio e como implicação deste processo, o grau de trofia do corpo hídrico pode ser alterado entre os estados oligotrófico e mesotrófico para os estados eutrófico e hipereutrófico. Para Lopes et al. (2015), em lagos e reservatórios o enriquecimento de nutrientes é a causa principal de diversas condições indesejáveis, tais como: proliferação de algas nocivas, mortandade de peixes e crescimento excessivo de macrófitas aquáticas.

O desequilíbrio no crescimento de macrófitas aquáticas deve-se principalmente à falta

de predadores e ao aumento do nível de eutrofização do ambiente. Em virtude disso, os gestores de reservatórios tendo em vista o controle desse crescimento também devem ter ações que controlem os usos e ocupações da bacia hidrográfica (Esteves, 1998; Pompêo, 2008).

De acordo com Gunkel et al. (2015), o processo de eutrofização em reservatórios tropicais ocorre diferentemente nos ecossistemas temperados. A mudança no nível da água devido às condições operacionais da hidrelétrica torna-se o principal problema nos reservatórios, comprometendo em grande parte, o uso múltiplo dos mesmos.

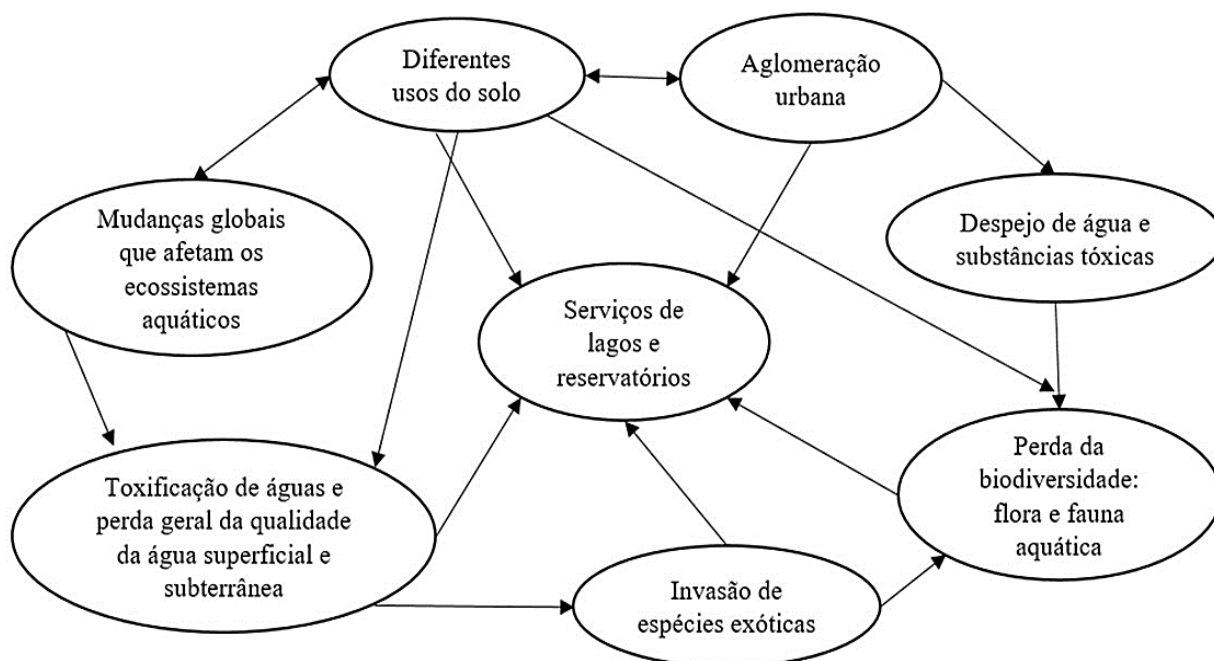


Figura 1. Representação das inter-relações dos principais problemas globais que interferem nos ecossistemas aquáticos. Fonte: Tundisi (2008).

Indicadores ambientais

Em termos gerais, Mendes (2006) define que um indicador “é uma medição que se relaciona com mudança de qualidade ou mudança no estado de algo que se pretende avaliar, fornecendo informação da condição de um determinado fenômeno”. A utilização de indicadores da qualidade de água consiste, portanto, no emprego de variáveis que se correlacionam com as alterações ocorridas no ecossistema aquático, sejam estas alterações de origens naturais ou antrópicas (Toledo e Nicoletta, 2002).

Em relação aos bioindicadores, Silveira (2004) enfatiza que os estudos baseados apenas em

algumas espécies indicadoras são considerados de formato simplista, com isso, os organismos bioindicadores são representados por comunidades indicadoras. Estas comunidades são capazes de fornecer informações úteis para o conhecimento científico e atividades de manejo, sendo componentes importantes para o gerenciamento ambiental. Entre os indicadores biológicos mais utilizados para avaliar ecossistemas fluviais estão os macroinvertebrados bentônicos (Dias et al., 2012).

Segundo Landim-Neto et al. (2014), os indicadores ambientais definitivos para a qualidade ambiental de uma bacia hidrográfica podem ser

identificados por: (a) fatores sociais que interferem no sistema ambiental, com base nas atividades desenvolvidas na área de influência da bacia hidrográfica estudada; (b) degradação dos recursos hídricos, incorporados às formas de uso e ocupação da bacia; (c) estado de poluição hídrica.

Para Nova et al. (2015), o uso de indicadores ambientais com auxílio de geotecnologias pode fornecer informações de advertência e prevenção referentes às condições ambientais. Além disso, o emprego de geotecnologias em pesquisas ambientais constitui uma ferramenta fundamental para aquisição e processamento de dados e análises espaciais, contribuindo para gestão ambiental.

Macroinvertebrados bentônicos

Os macroinvertebrados constituem uma comunidade de organismos bentônicos (*benthos* de origem grega significa profundidade) que vivem no fundo de ecossistemas aquáticos durante parte ou toda sua vida (Esteves, 1998). Apresentam ampla diversidade de grupos taxonômicos, tais como, platelmintos, anelídeos, nematódeos, moluscos e artrópodes, incluindo crustáceos e várias ordens de insetos. Algumas características da biologia e ecologia dos principais grupos estão descritas no Quadro 1.

A distribuição e abundância destes indivíduos bentônicos podem ser controladas por fatores biogeográficos e características do ambiente, como, disponibilidade e qualidade do alimento, tipo de sedimento (ex. arenoso, argiloso) e substrato (ex. macrófitas aquáticas), temperatura, oxigênio dissolvido, pH, entre outros (Goulart e Callisto, 2003; Santana et al., 2009).

Em termos ecológicos, são fundamentais nas cadeias tróficas, pois participam do fluxo de energia e na ciclagem de nutrientes (Thomazi et al., 2008), sendo considerados bioindicadores (indicadores biológicos) capazes de refletir o nível de poluição ou impacto ambiental dos corpos aquáticos. Assim, podem ser classificados como organismos sensíveis (intolerantes), tolerantes ou resistentes em relação à poluição (Callisto et al., 2001).

Segundo Goulart e Callisto (2003), os organismos considerados sensíveis ou intolerantes são representados principalmente pelos insetos aquáticos, e necessitam de elevadas concentrações de oxigênio dissolvido na água. O grupo dos organismos tolerantes não necessita de altas concentrações de oxigênio dissolvido na água, pois a maioria utiliza o oxigênio atmosférico. Já os

organismos resistentes são capazes de viver com depleção total de oxigênio por várias horas, além disso, são detritívoros, se alimentando da matéria orgânica depositada no sedimento, o que favorece adaptação aos mais diversos ambientes.

De acordo com Rosenberg e Resh (1993), prefere-se utilizar esses organismos bentônicos devido as seguintes atribuições: a) ciclo de vida longo, o que permite respostas temporais; b) relativamente grandes e sésseis ou de baixa mobilidade; c) possuir significativa diversidade biológica; d) fácil coleta, com procedimentos de amostragem padronizados e de baixo custo; e) identificação taxonômica relativamente simples; f) indicar estado trófico do ambiente.

Trabalhos científicos têm sido desenvolvidos referentes a dinâmica, estrutura e composição de invertebrados bentônicos associados ao sedimento (Brito-Junior et al., 2005; Souza e Abílio, 2006; Abílio et al., 2007; Andrade et al., 2008; Souza et al., 2008). Outros estudos relatam a abundância e composição destes organismos associados às macrófitas aquáticas (Abílio, 2002; Abílio et al., 2006; Santana et al., 2009; Dias et al., 2012; Silva e Henry, 2013).

Atualmente, esses organismos vêm sendo utilizados como uma ferramenta importante em estudos de avaliação da qualidade ambiental. Segundo Dias et al. (2012), a utilização de bioindicadores é uma forma de avaliar a situação ecológica da água. De acordo com Barbola et al. (2011), o conhecimento desta comunidade aquática contribui para a avaliação da qualidade da água e para construção de ações, objetivando à conservação da biodiversidade.

Assim, têm-se aplicado diversos índices bióticos utilizando os macroinvertebrados bentônicos como um parâmetro de avaliação do ambiente aquático. De acordo com Gonçalves e Menezes (2011), o uso de índices bióticos como ferramenta para o biomonitoramento da qualidade de recursos hídricos tem sido eficaz na análise de ambientes lóticos e lênticos.

Ressalta-se a importância dos estudos ambientais voltados à utilização desta fauna e de outros instrumentos que forneçam a integração das informações inerentes à qualidade hídrica, considerando as diferentes dimensões. Neste intuito, destaca-se a aplicação das técnicas do sensoriamento remoto, que atualmente, têm sido realizadas em diversas pesquisas com diferentes finalidades, no entanto, no âmbito dos bioindicadores, ainda são escassos.

Quadro 1. Principais grupos taxonômicos de macroinvertebrados e suas respectivas características biológicas e ecológicas. Fonte: Gullan e Cranston (2008); Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008); Cerutti (2015).

GRUPOS	CARACTERÍSTICAS
Platelmintos	Vermes achatados de vida livre, encontrados associados a substratos, em águas pouco profundas e bem oxigenadas nos ambientes lênticos e lóticos. Possuem hábito alimentar carnívoro e detritívoro.
Anelídeos	As duas principais classes são Polichaeta e Oligochaeta, sendo que a primeira tem poucos representantes em águas interiores. Oligochaeta ocorre amplamente em diversos ambientes aquáticos, tendo hábito alimentar herbívoro e detritívoro. A classe Hirudinea (sanguessugas) são basicamente predadoras de macroinvertebrados ou ectoparasitas de vertebrados aquáticos.
Moluscos	Filo altamente diversificado, ocorrendo em ambientes lênticos e lóticos, associados ao substrato de fundo ou a plantas aquáticas (vegetação marginal e macrófitas). Dentre os moluscos, destacam-se os bivalves (filtradores) e os gastrópodes (herbívoros e raspadores).
Crustáceos	Possuem grande importância na estrutura de ambientes lênticos ou lóticos, ocorrendo associados a barrancos, vegetação marginal ou banco de macrófitas. Possuem representantes predadores, os quais utilizam hábito de alimentação raptorial, fragmentadores ou raspadores.
Ordens de Insetos	CARACTERÍSTICAS
Ephemeroptera	Indicadores de águas limpas e bem oxigenadas, ocorrendo preferencialmente em águas rápidas. As ninfas possuem hábito alimentar raspador ou filtrador.
Odonata	Possuem representantes marinhos, em águas salobras e em áreas de inundação temporárias. Ocorrem em rios e lagos, estando associadas ao sedimento, vegetação marginal e macrófitas. As larvas são predadoras.
Coleoptera	Organismos cosmopolitas, aquáticos ou semiaquáticos, ocorrendo em águas doces, salobras e salinas. Colonizam ambientes com vegetação aquática, além de substratos como troncos e folhiosos. Larvas e adultos possuem hábito alimentar predador, filtrador ou raspador.
Trichoptera	Indicadores de águas limpas e bem oxigenadas. Ocorrem em águas quentes e frias, em ambientes lóticos ou lênticos. Algumas espécies constroem refúgios utilizando areia, seda, folhas e galhos. As larvas podem ser predadoras, raspadoras ou filtradoras.
Diptera	Ocorrem em abundância nos ambientes aquáticos, tanto em águas lóticas e lênticas. Pelo fato de algumas famílias suportarem ambientes com baixa oxigenação e com altas concentrações de matéria orgânica, são considerados indicadores de locais impactados. O hábito alimentar pode ser filtrador, coletor ou predador.

Índices bióticos

Em geral, os índices da qualidade da água objetivam transformar os dados em um formato mais acessível e de fácil compreensão para os gestores e usuários. E são utilizados como uma forma de sintetizar informações da qualidade da

água, integrando os resultados de diferentes variáveis e indicadores (Landim-Neto et al., 2014).

De acordo com Baptista (2008), os índices bióticos surgiram a partir da preocupação de avaliar a qualidade ambiental dos recursos hídricos, sendo observado que as análises oriundas apenas dos parâmetros físicos e químicos não eram

suficientes para medir a qualidade da água de forma integrada.

A partir do século XX, os pesquisadores alemães Kolkwitz e Marsson (1909) criaram uma base conceitual dos primeiros métodos para a elaboração de um índice biótico, o qual ficou conhecido como índice de saprobidade (o nível de poluição). Esse índice foi desenvolvido como uma medida de contaminação, com base na presença de principalmente, bactérias, fungos, algas e protozoários (Baptista, 2008; Monteiro et al., 2008; Docile e Figueiró, 2013).

Na Europa, os esforços conjuntos foram pioneiros para testar a aplicabilidade do sistema saprobico, e a partir disso, outras metodologias foram testadas para aplicação dos índices bióticos (Buss et al., 2003). Em 1976, um grupo de pesquisa foi formado na Grã-Bretanha para discutir e sintetizar o conhecimento sobre estes índices, gerando o sistema Biological Monitoring Working Party Score System – BMWP (Docile e Figueiró, 2013).

O índice BMWP, de caráter qualitativo, consiste em classificar a qualidade do corpo hídrico, com base na presença dos organismos da comunidade de macroinvertebrados bentônicos. É composto por nove grupos taxonômicos, que recebem um score de 1 a 10, levando em consideração o nível de tolerância dos organismos quanto à poluição orgânica, sendo que quanto maior a tolerância do organismo ao impacto, menor a pontuação, e os organismos mais sensíveis à poluição recebem pontuação maior (Alba-Tercedor e Sánchez-Ortega, 1988).

Este índice também tem sido usado como um importante instrumento para avaliação da qualidade ambiental em bacias hidrográficas. De acordo com Czerniawska-Kusza (2005), estudos científicos em diferentes países foram desenvolvidos com aplicação do BMWP, no Reino Unido (Armitage et al., 1983), no Canadá (Barton e Metcalfe-Smith, 1992), na Espanha (Zamora-Munoz e Alba-Tercedor, 1996), na Argentina (Capitulo et al., 2001), e Tailândia (Mustow, 2002), entre outros.

Segundo Baptista (2008), no Brasil, os primeiros trabalhos científicos que utilizaram o BMWP foram realizados por Junqueira e Campo (1998) na bacia Hidrográfica rio das Velhas, em Minas Gerais, e por Junqueira et al. (2000) no Estado de Goiás. E a partir destes, outros estudos têm sido desenvolvidos, como os realizados por Oliveira e Callisto (2010) e Silva et al. (2016).

Sensoriamento remoto

No contexto histórico, o sensoriamento remoto teve grande marco nos anos 60, sendo uma das tecnologias mais sucedidas de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global (Meneses, 2012).

A década de 60 ficou marcada como a década da corrida espacial, pois a origem do sensoriamento remoto ocorreu devido ao desenvolvimento da era espacial, de forma a obter seus primeiros avanços. Entretanto, o marco de grande importância ocorreu pelo lançamento do primeiro satélite (ERTS-1) pelos Estados Unidos, que posteriormente foi renomeado para Landsat 1, colocado em órbita em 1972 (Florenzano, 2011; Meneses, 2012).

O termo Sensoriamento Remoto refere-se à obtenção de informações dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico entre o sensor e o objeto estudado. De acordo com Novo (2011), o uso do sensoriamento remoto tem a finalidade de observar fatos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície da terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética (REM) e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações.

O sol é a principal fonte de radiação eletromagnética (REM) utilizada para o sensoriamento remoto. Desta maneira, a REM é captada através dos sistemas sensores, sendo refletida ou emitida pelos objetos da superfície terrestre. Ou seja, a REM incide na superfície da terra, e parte dela é refletida para o espaço, e pode ser captada pelo sistema sensor, deste modo, importantes informações da superfície terrestre poderão ser obtidas (Novo, 2007; Jensen, 2009).

Nas imagens orbitais, cada banda possui uma resolução espectral, que define o intervalo da faixa espectral amostrada pelo sistema sensor. Quanto maior o número de bandas de um sensor, maior a faixa do espectro amostrada e maior a capacidade de discriminação dos objetos da superfície terrestre. Portanto, expressa a capacidade de um sensor registrar a radiação em diferentes regiões do espectro (Souza et al., 2007; Kuplich et al., 2016).

Além disso, as resoluções espacial, temporal e radiométrica são outros parâmetros importantes que podemos observar nos produtos do sensoriamento remoto (Quadro 2). Em geral, a resolução espacial permite ver o nível de detalhe que o alvo apresenta, e a resolução temporal é definida pela frequência de passagem do satélite à mesma área na superfície terrestre (Kuplich et al.,

2016). Já a resolução radiométrica refere-se à REM refletida e/ou emitida pelos alvos, sendo o valor da intensidade o que difere de um alvo para outro (Souza et al., 2007).

Em relação ao comportamento espectral, segundo Kuplich et al. (2016), cada objeto da superfície da terra tem uma maneira peculiar de refletir a REM, conhecida como assinatura espectral. Deste modo, cada alvo estudado possui uma resposta espectral distinta, devido as diferentes composições físico-químicas de cada um, conseqüentemente, cada alvo tem sua própria assinatura espectral (Figueiredo, 2005).

Quanto ao comportamento espectral da água, Novo (2001) explica a importância de se observar as cores que os alvos apresentam nas imagens de satélite, sendo uma das questões fundamentais para interpretação destas.

De acordo com a autora, a interpretação da variação das cores da água em imagens de satélite torna-se mais complexa em comparação com outros alvos naturais, pelas seguintes razões: a) a região de maior incidência da luz na água (400 a 500 nm) e de maior interação entre a REM e os componentes da coluna d'água é afetada pela atmosfera; b) os elementos opticamente ativos da água apresentam espectros de absorção semelhantes, o que muitas vezes torna difícil sua discriminação quando ocorrem simultaneamente no ambiente; c) a reflectância da água é muito pequena, faz com que os sensores disponíveis sejam muitas vezes insensíveis às alterações das cores; d) a reflectância da superfície da água é mais elevada que a do volume, sendo afetada por fatores externos, como vento e geometria de aquisição.

Quadro 2. Produtos da Série Landsat e os tipos de resoluções. Fonte: EMBRAPA (2016).

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (µm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica
TM Landsat 5	Banda 1 - Azul	0,45 - 0,52	30	16 dias	8 Bits
	Banda 2 - Verde	0,50 - 0,60			
	Banda 3 - Vermelho	0,63 - 0,69			
	Banda 4 - Infraverm. Próximo	0,76 - 0,90	120		
	Banda 5 - Infraverm. Médio	1,55 - 1,75			
	Banda 6 - Infraverm. Termal	10,4 - 12,5	30		
	Banda 7 - Infraverm. Médio	2,08 - 2,35			
OLI Landsat 8	Banda 1 - Coastal aerosol	0,43 - 0,45	30	16 dias	16 Bits
	Banda 2 - Azul	0,45 - 0,51			
	Banda 3 - Verde	0,53 - 0,59			
	Banda 4 - - Vermelho	0,64 - 0,67			
	Banda 5 - Infraverm. Próximo	0,85 - 0,88			
	Banda 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	15		
	Banda 7 - SWIR 2	2,11 - 2,29			
	Banda 8 - Pancromática	0,50 - 0,68	30		
	Banda 9 - Cirrus	1,36 - 1,38			

Aplicações do sensoriamento remoto em recursos hídricos

Em relação aos recursos hídricos, Novo (2007) mostra qual capacidade os sensores orbitais têm de medir os parâmetros ambientais para o monitoramento da qualidade da água. No Quadro 3 estão descritos alguns parâmetros que podem ser medidos pelo sensoriamento remoto e quais possuem potencial futuro. Apesar que os parâmetros químicos e biológicos ainda sejam limitados pela tecnologia, é possível determinar alguns parâmetros dinâmicos.

Segundo Novo (2011), os dados fornecidos pelos sistemas remotos apresentam várias utilidades para diversas aplicações, dentre as quais se destacam: hidrológicas (mapeamento de áreas afetadas por inundações, avaliação de consumo de água por irrigação, modelagem hidrológica) e limnológicas (caracterização da vegetação aquática, avaliação do impacto do uso da terra em sistemas aquáticos).

Aplicações do sensoriamento remoto vêm sendo realizadas em estudos relacionados à avaliação da qualidade ambiental, especialmente

em reservatórios. Segundo Lopes et al. (2014), o monitoramento da qualidade da água é fundamental nos dias atuais, e a utilização de dados do sensoriamento remoto demonstra grande potencial para isso, permitindo um monitoramento eficaz tanto em escala espacial como temporal.

No Estado do Piauí, Silva et al. (2012) realizaram uma análise temporal da variação da lâmina d'água na lagoa de Parnaguá, utilizando imagens digitais obtidas pelo sensor Landsat-TM. Conforme os autores, o sensoriamento remoto é uma técnica que apresenta eficiência, com custo relativamente baixo e de fácil atualização.

Quadro 3. Parâmetros físicos, químicos, biológicos, ecológicos, dinâmicos e geométricos que podem ser medidos pelo sensoriamento remoto. Fonte: Adaptado de Novo (2007).

Parâmetros		Métodos convencionais	Capacidade de sensoriamento remoto
Físicos	Temperatura da água	Radiometria <i>in situ</i>	Sim
	Turbidez	Disco de Secchi, Turbidímetro	
	Cor	Filtração e determinação da absorção espectral 254 nm	
	Profundidade de zona eufótica	Perfis de irradiância em subsuperfície	
Químicos	Carbono orgânico dissolvido	Oxidação catalítica Espectroscopia de infravermelho	Parcialmente matéria orgânica dissolvida
	Fósforo Total	Digestão, mineralização, fotometria.	Esperado
	Óleos	-	Sim
Biológicos	Pigmentos clorofilados	HPLC, Extração e espectrofotometria	Sim
	Pigmentos acessórios		
	Biomassa fitoplantônica	Filtração e Pesagem	Esperado
	Detritos concentração	-	Sim
Ecológicos	Produção primária líquida	Garrafas de incubação	Sim
	Estado trófico da água	Índices de estado trófico	Esperado
	Macrófitas	-	Sim
Dinâmicos	Sedimentos em suspensão	Gravimétrico	Sim
	Nível da água	Réguas, limnógrafo	
Geométricos	Área do corpo d'água	Mapeamento	Sim
	Morfometria	Topografia/geomorfologia	

Estudo realizado por Costa et al. (2012) objetivou avaliar a qualidade da água no reservatório de Manso-MT através do Índice da

Qualidade da Água (IQA) e imagens orbitais. Foi gerado mapa de distribuição da concentração de fósforo por meio de imagens de satélite Landsat-5.

Concluem que a avaliação hídrica do reservatório com a utilização do sensoriamento remoto mostra-se eficaz, fornecendo informações sobre a dinâmica trófica e a qualidade da água.

Lopes et al. (2014) em estudo no reservatório Orós, Ceará, analisaram as variáveis limnológicas também a partir do sensoriamento remoto. Realizaram análises de correlação entre o fator de reflectância bidirecional e os dados de concentrações de sedimentos inorgânicos, condutividade elétrica, turbidez e transparência, gerando os modelos de regressão simples. Os autores mencionam que os modelos desenvolvidos no estudo indicaram que as variáveis limnológicas podem ser quantificadas remotamente.

Nova et al. (2015) realizaram avaliação ambiental no estado de Alagoas, no baixo curso do rio São Francisco, identificando os principais usos da terra e os indicadores ambientais de impactos negativos, por meio de geotecnologias e aplicação de check lists. Além de observações e levantamento *in loco*, realizaram mapeamento espaço-temporal a partir de imagens digitais multiespectrais. Concluem que a metodologia sugerida permite a agilidade do diagnóstico, sendo fundamental à gestão e ao monitoramento da área.

No reservatório Itaparica, submédio São Francisco, a avaliação do comportamento da clorofila-a através de imagens do sensor Landsat-TM (bandas 1 a 5 e 7) foi estudada por Lopes et al. (2015). Avaliaram a distribuição e ocorrência da clorofila-a, gerando em seus resultados um mapa de sua distribuição espacial. Relevam que a modelagem realizada, utilizando imagens de satélite pode auxiliar no monitoramento com características espaciais e não pontuais. A Figura 2 representa exemplo da aplicação do sensoriamento remoto em recursos hídricos.

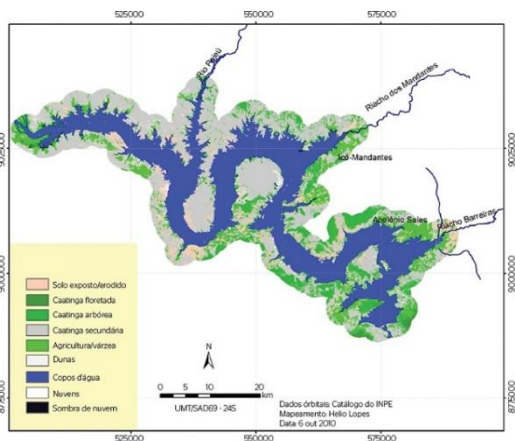


Figura 2. Mapa de uso e ocupação do solo a partir de técnicas do sensoriamento remoto. Fonte: Lopes et al. (2015).

Pereira et al. (2016) utilizando imagens do satélite Landsat-8, propõem novos Índices de Água, comparando com outros já existentes, com finalidade de mapear e delimitar os corpos hídricos. Os autores, realizaram os testes na área do reservatório de Itaipu, na bacia hidrográfica do rio Paraná, concluindo que a técnica utilizada permite monitorar os corpos hídricos em escala espacial e temporal de maneira automática, sendo uma ferramenta importante para os gestores de bacias hidrográficas.

Diante disso, o estudo das imagens de sensoriamento remoto pode ser realizado a partir de uma única banda, razão de bandas, modelagem ou composição colorida. O monitoramento de grandes áreas pode ser feito por meio de técnicas de geoprocessamento, e mesmo em locais de difícil acesso, é possível obter informações quanto à qualidade ambiental, inclusive de toda área da bacia hidrográfica.

Gestão de recursos hídricos

O desenvolvimento de atividades econômicas e o desordenado crescimento populacional vêm causando sérios problemas aos recursos hídricos. Em função disso, as instâncias públicas e civis articularam-se para criação de legislação e de políticas específicas, com o intuito de fundamentar a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos (IGAM, 2014).

A gestão de recursos hídricos no Brasil é orientada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) instituída pela Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, a qual criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Desta forma, preconiza-se uma gestão integrada e participativa, que visa principalmente garantir a disponibilidade de água à atual e às próximas gerações, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos (BRASIL, 1997).

De modo geral, o SINGREH integra arranjos institucionais com inserção de espaços participativos de discussão e gestão na esfera nacional, na esfera estadual e no âmbito das bacias hidrográficas. Sua estrutura institucional é composta pelas instâncias de formulação e deliberação, de formulação de políticas governamentais, e de implementação e regulação (ANA, 2013), conforme representado na Figura 3. De acordo com Buss (2008), teoricamente, esta estrutura promove a formação de espaços nos quais

todos os atores sociais envolvidos podem expor seus interesses e discuti-los de forma democrática.



Figura 3. Estrutura institucional do SINGREH. Fonte: ANA (2011).

Com o intuito de implementar a PNRH, foi criada Agência Nacional de Águas (ANA) instituída pela Lei nº 9.984 de 2000, um órgão regulador com vínculo ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), responsável sobretudo pela implementação, operacionalização, controle e avaliação dos instrumentos de gestão e outras

funções inerentes aos recursos hídricos (ANA, 2011).

Em apoio à gestão dos recursos hídricos, a ANA realiza o monitoramento da Rede Hidrometeorológica, sendo que, dos 12.963 mil rios cadastrados no Sistema de Informações Hidrológicas, a ANA monitora 2.176. Os dados de volume de chuvas, evaporação da água, nível e vazão dos rios, quantidade de sedimentos e qualidade das águas são mensurados através das estações de monitoramento, distribuídas nas bacias hidrográficas. Sendo estas informações hidrológicas a base para a concessão pela ANA, de outorga pelo uso de recursos hídricos dos rios federais (ANA, 2016).

A Figura 4 mostra a evolução espaço-temporal das estações de monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Observamos que nos anos 1980 e 1990 apenas as estações da ANA avaliava a qualidade da água na região do submédio São Francisco, já a partir do ano 2000, observa-se de modo geral, uma avaliação mais intensificada e algumas estações de monitoramento de outras entidades.

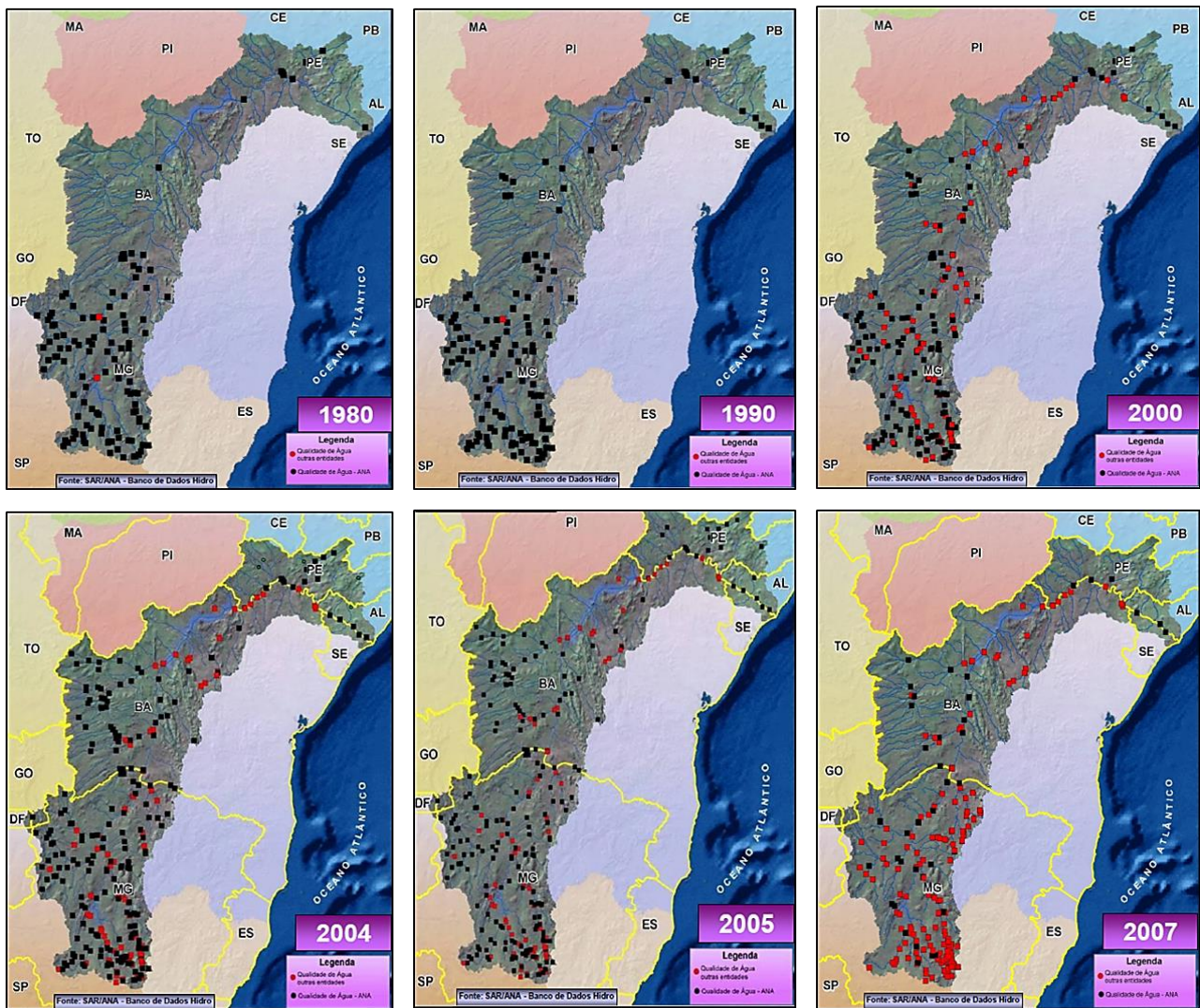


Figura 4. Evolução do monitoramento da Rede Hidrometeorológica (qualidade da água) na bacia Hidrográfica do rio São Francisco entre o período de 1980 a 2007. Fonte: ANA (2016).

Dentre os fundamentos da Lei nº9.433/1997, destaca-se o art.1, inciso VI, que estabelece o seguinte: “a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades”. Segundo Rodrigues et al. (2008), a lei propõe um modelo de gestão de recursos hídricos que tem como base a consolidação das relações entre o Poder Público, a sociedade civil organizada e os usuários, sendo que os Comitês de Bacia são bons exemplos de estabelecimento destas relações.

Os Comitês de Bacias Hidrográficas têm como atribuição legal deliberar sobre a gestão das águas em consonância com o poder público, e desempenham importante papel neste sistema participativo de gestão. Dentre outras competências no âmbito da sua área de atuação, são responsáveis pela aprovação da adequada aplicação dos Planos de Recursos Hídricos da

bacia, que permitem integrar e articular os demais instrumentos da Política (ANA, 2011).

As decisões sobre os usos dos rios em todo o País são tomadas pelos Comitês de Bacias Hidrográficas, constituídos por um terço (1/3) dos representantes da sociedade civil, do estado e dos municípios.

No período entre os anos 2013 e 2016, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF) esteve representado por 32,2% do poder público, 25,8% da sociedade civil, 38,7% dos usuários e 3,3% da comunidade indígena. Dentre os Estados com maior representação no Comitê destacam-se: Minas Gerais, Bahia e Pernambuco (Arruda, 2015).

Conforme o art. 41 da Lei nº 9.433/1997, as Agências de Água ou de Bacia exercem função de secretaria executiva dos seus respectivos Comitês de Bacia. Desta forma, cabem as entidades que exercem função de Agência de água (Figura 5)

oferecer subsídios técnicos à discussão sobre o planejamento e a gestão dos usos da água no âmbito de sua área de atuação.

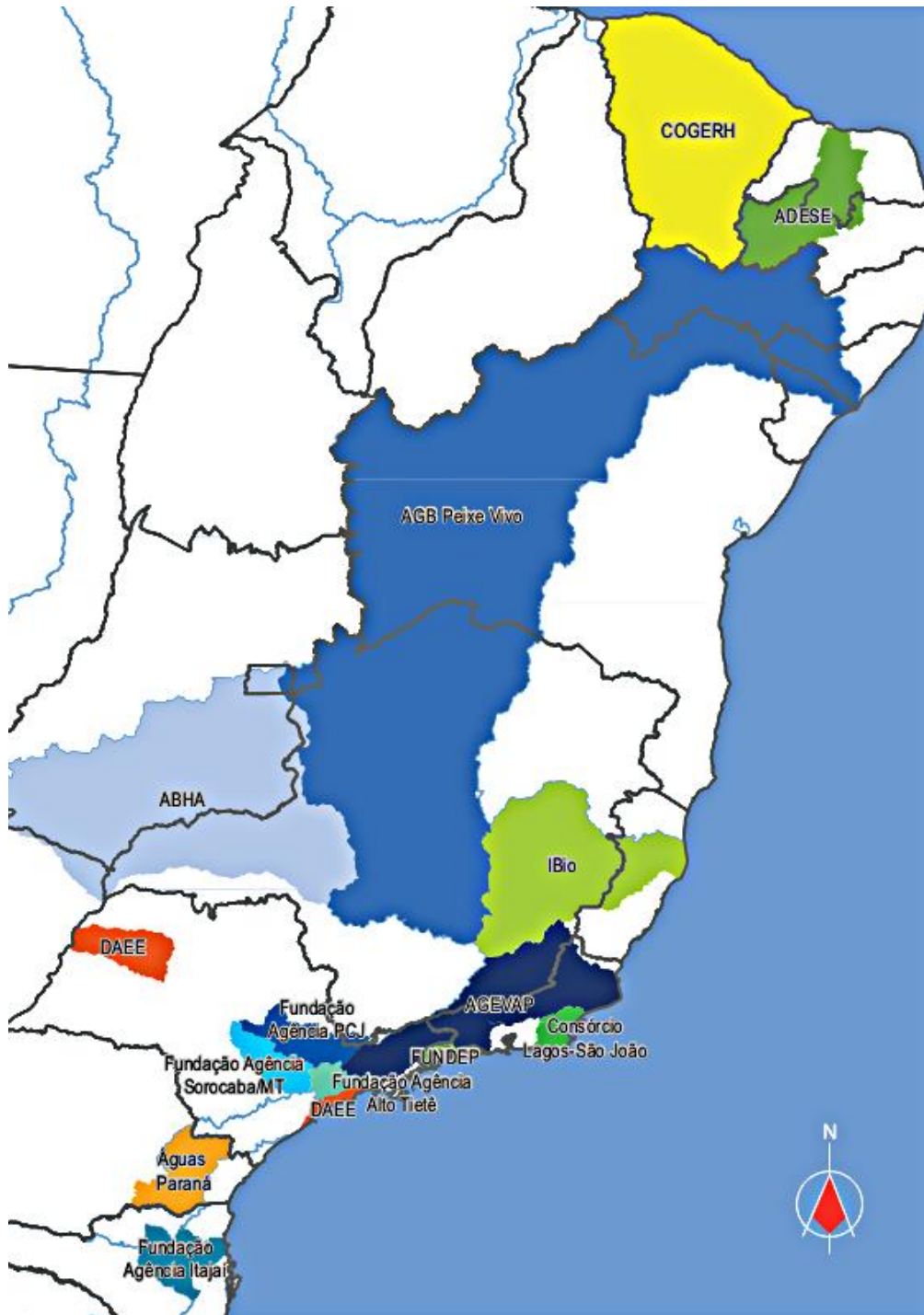


Figura 5, Área de abrangência das agências de bacia. Fonte: ANA (2014).

Os instrumentos que integram a Política Nacional de Recursos Hídricos estão inter-relacionados e formam a base para regulação, planejamento e apoio para a gestão de recursos hídricos, a saber: (a) Planos de Recursos Hídricos; (b) enquadramento dos corpos de água em classes,

segundo os usos preponderantes da água; (c) outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; (d) cobrança pelo uso de recursos hídricos; (e) compensação a municípios; (f) Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Segundo Porto e Porto (2008), os instrumentos de gestão

possuem objetivos de aplicação distintos e devem ser utilizados para alcançar diferentes fins.

Quanto ao enquadramento dos corpos de água, a Resolução de nº357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) promulgada em 17 de março de 2005 dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, estabelecendo condições e padrões de lançamentos de efluentes. Particularmente, o rio São Francisco está classificado como classe 2, águas doces que podem ser destinadas: (a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; (b) à proteção das comunidades aquáticas; (c) à recreação de contato primário; (d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; (e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Destaca-se, que através do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (SIRH) é possível obter informações sistematizadas inerentes à qualidade e disponibilidade da água, podendo contribuir para resolução de problemas que comprometem os múltiplos usos em reservatórios, além disso, viabiliza o processo decisório da gestão. No art. 25 da Lei nº 9.433/1997 define que o Sistema de Informações “é um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão”.

De acordo com Sobral (2011), o Sistema de Informações surgiu da necessidade de democratizar o processo de gestão participativa, constituindo-se em um importante instrumento para democratização de informações. Desta forma, o Sistema de Informações é um instrumento de apoio à implementação da Política e do SINGREH. Além disso, as informações e os dados que integram o SIRH devem oferecer suporte à construção e aplicação dos demais instrumentos, sendo fundamental ao processo de tomada de decisão dos gestores.

Bacia hidrográfica do rio São Francisco

A bacia hidrográfica do rio São Francisco está dividida em quatro regiões fisiográficas denominadas de Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, com área total de 619.543 Km² e 2.800 Km de extensão. Abrange 521 municípios distribuídos entre os estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e parte do Distrito Federal, ocupando cerca de 7,5% da população nacional (Soares, 2013).

Conhecido como “Rio da Integração Nacional”, o rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, escoando no sentido Sul-Norte, e sua foz entre os estados de Alagoas e Sergipe, contribuindo com 73% da oferta hídrica superficial para o Nordeste. Possui cobertura vegetal que inclui fragmentos de Cerrado no Alto e Médio, Caatinga no Médio e Submédio e de Mata Atlântica no Alto São Francisco (Soares, 2013).

A agricultura é uma das atividades econômicas de grande importância, porém a região possui fortes contrastes socioeconômicos, devido a existência de áreas com situação crítica de pobreza. Como reflexo das principais atividades econômicas da bacia, destaca-se a necessidade de recuperação ambiental das áreas degradadas, para mitigação dos impactos ambientais existentes (ANA, 2016).

A regularização das vazões do rio São Francisco proporcionada pelos grandes reservatórios oferta maior segurança operacional de diversas captações para abastecimento de água. Em termos de capacidade, os principais reservatórios são: Três Marias, Sobradinho e Itaparica, que somam um volume útil com capacidade de 47.495 milhões de m³, sendo que o reservatório Sobradinho contribui com até 60% deste volume (ANA, 2015).

Caracterização do Reservatório Sobradinho

O reservatório Sobradinho situa-se no estado da Bahia, no submédio São Francisco (Figura 6), e possui cerca de 320 km de extensão, sendo considerado um dos maiores lagos artificiais do mundo. Na sua cota máxima de 392,5m armazena 34,1 bilhões de metros cúbicos, e além da geração de energia elétrica, também desempenha importante papel na regularização das vazões para operação das demais usinas da bacia (MMA, 2010).



Figura 6. Localização geográfica do reservatório Sobradinho. Fonte: Lopes et al. (2013).

A área do Submédio São Francisco inclui diferentes regiões que estão divididas em lóticis, de transição e lênticos ao longo de sua extensão (Figura 7). Segundo Silveira (2004), os ecossistemas lóticos (rios, riachos e córregos)

caracterizam-se pela grande variabilidade e complexidade de parâmetros abióticos e bióticos, tornando-os dinâmicos. A complexidade existente neste sistema deve-se ao uso da terra, geologia, tamanho da bacia de drenagem, além das condições climáticas locais (Toledo e Nicolella, 2002).

Os ambientes lóticos apresentam condições mais instáveis, e de maneira geral, as comunidades aquáticas sofrem influência dos períodos sazonais, que determinam a hidrologia do ambiente e alterações dos níveis de vazão, podendo ocasionar o aporte de material em suspensão para coluna d'água e redução da transparência e da diluição dos nutrientes (CETESB, 2006).

Já os ambientes lênticos (lagos, lagoas, reservatórios) tratam-se de um sistema relativamente fechado, de baixo fluxo, desta forma, os organismos aquáticos conseguem maior estabilidade no meio, apresentando uma diversidade significativa.

Em contrapartida, o fluxo unidirecional da corrente impõe uma grande limitação ao estabelecimento dos organismos nos ambientes lóticos (Silveira, 2004). Um gerenciamento adequado para estes diferentes ecossistemas deve ser realizado pela gestão de reservatórios, considerando as características intrínsecas de cada sistema.

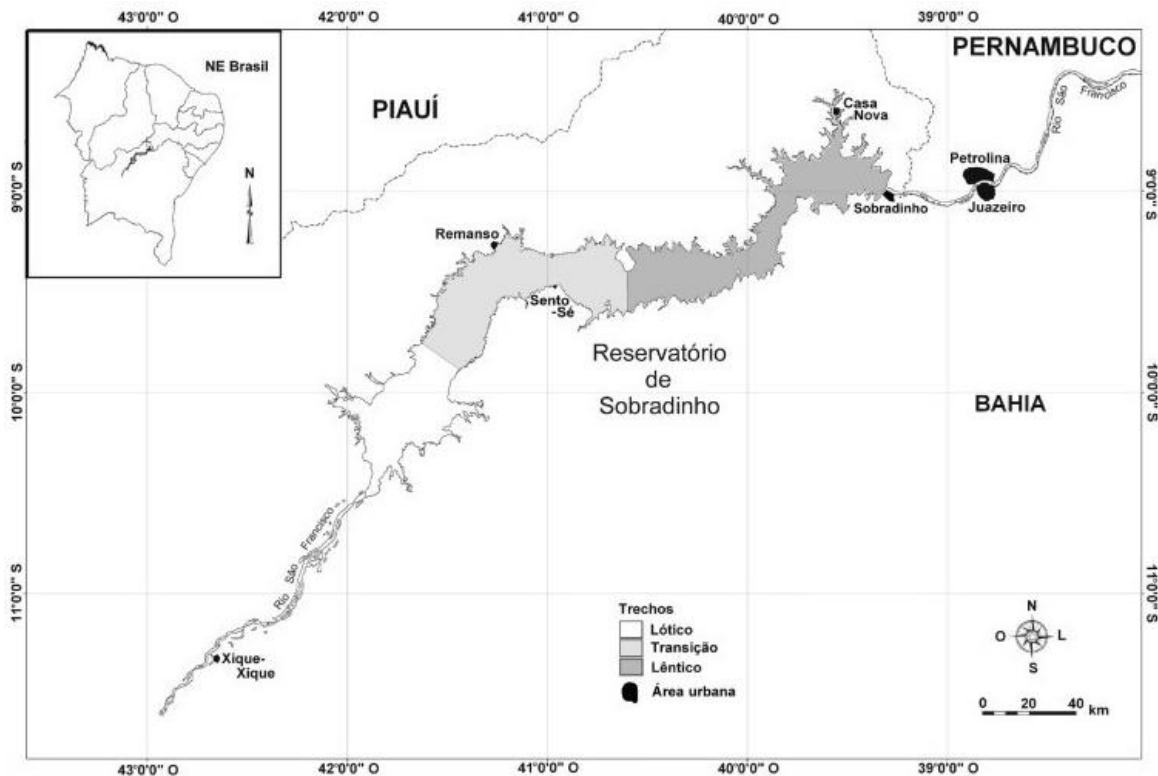


Figura 7. Regiões Lóticas, de transição (rio-reservatório) e lênticas do submédio São Francisco. Fonte: Medeiros et al. (2014).

Importante destacar, que o sensoriamento remoto apresenta potencialidade para estes ambientes (lóticos e lênticos), servindo como subsídio na tomada de decisão no gerenciamento do reservatório. As informações e os dados fornecidos por esta ferramenta permitem avaliar as condições ambientais de forma integrada, considerando o ecossistema aquático como um todo. Neste contexto, alguns estudos foram realizados em áreas do reservatório Sobradinho, aplicando técnicas do sensoriamento remoto, destacando os trabalhos realizados por Silva et al. (2005b), Santos (2012), Fernandes (2015) e Lopes et al. (2015).

O uso do sensoriamento remoto pela gestão de recursos hídricos ainda é incipiente, devido a isso, muitos dados passíveis de se transformar em informação, não são utilizados por falta de compreensão das necessidades mútuas. Essa problemática também deve-se à falta generalizada de conhecimentos mais básicos sobre a tecnologia, ocorrendo muitas vezes expectativas irrealistas sobre o seu potencial, induzindo ao descrédito (Novo, 2007).

Em relação à vazão, o reservatório Sobradinho possui como meta a liberação de uma vazão mínima de 1.300 m³/s, sendo o principal reservatório de água no Nordeste brasileiro. Entretanto, vem sofrendo com os períodos prolongados de seca, o que tem atingido o regime de sua vazão, consequentemente, tem comprometido seus usos múltiplos, especialmente, para geração de energia, abastecimento e agricultura.

Em 2015, o reservatório atingiu o nível mais baixo de seu volume útil registrado na série histórica dos últimos dez anos, ameaçando alcançar o “volume morto”. A Figura 8 representa este cenário, com o percentual do volume útil entre janeiro de 2013 a novembro de 2016, exibindo a situação do nível de vazão do último mês observado. O regime de vazão gera modificações das áreas de margem do reservatório, alterando o limite das regiões lóticas, de transição e lênticas. Portanto, existe uma dinâmica de alterações físicas do corpo hídrico.

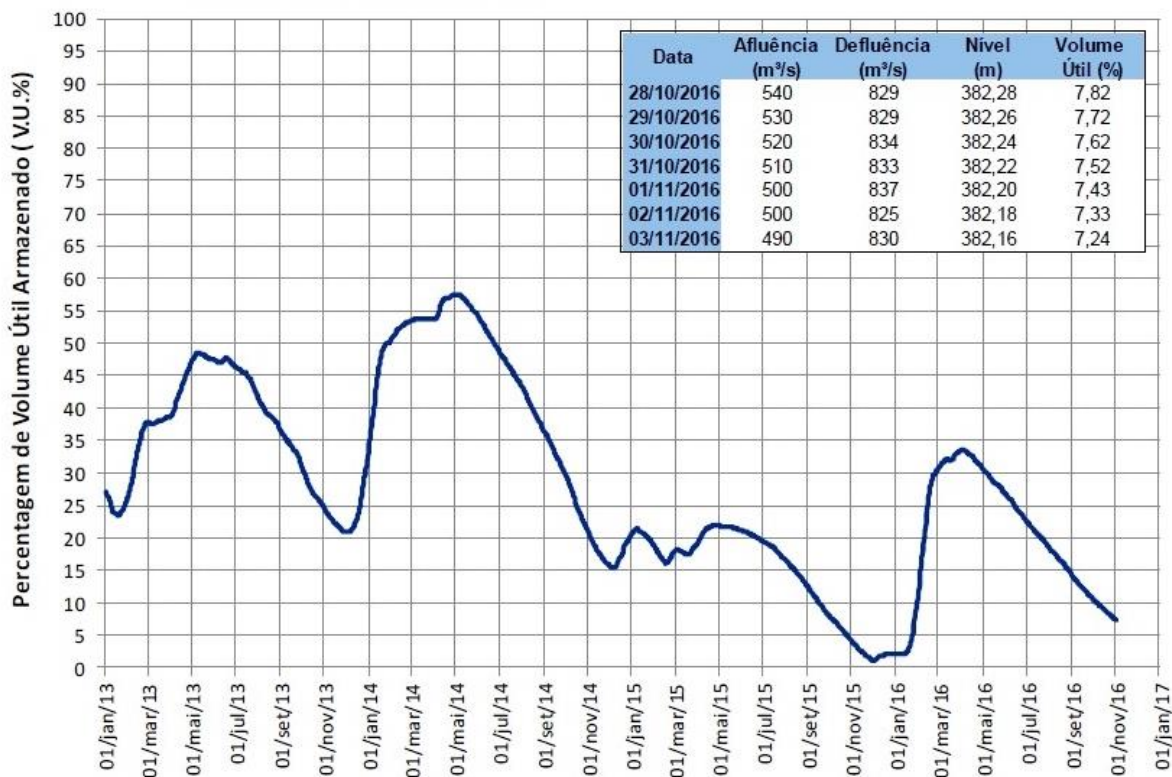


Figura 8. Volume útil (%) do reservatório Sobradinho no período entre janeiro de 2013 a novembro de 2016. Fonte: ONS (2016).

A Agência Nacional das Águas (ANA) é responsável por definir e fiscalizar as condições de operação do reservatório, estabelecendo regras de

operação que são revisadas periodicamente, considerando os usos múltiplos. A Resolução nº 1283/2016 dispõe sobre a redução temporária da

descarga mínima defluente (1.300 m³/s para 700 m³/s) do reservatório Sobradinho, configurando o cenário crítico da água na região semiárida.

A redução de vazões mínimas causa impactos negativos aos usuários e aos serviços ambientais. Tais impactos podem promover consideravelmente, aumento do tempo de residência (tempo médio de permanência da água no corpo hídrico) da água no reservatório. Com isso, os processos de concentração de nutrientes e a diminuição da capacidade de autodepuração do corpo d'água causam impactos significativos à comunidade aquática, podendo aumentar o desenvolvimento de algas que causam prejuízos para as captações de abastecimento (CBHSF, 2013).

De acordo com Gunkel et al. (2015), a promoção dos serviços de ecossistemas aquáticos tem enfoque bem-sucedido para uma gestão avançada de reservatórios. Segundo Koch et al. (2015), a variação no regime de vazões em decorrência das escolhas de operação de reservatórios compromete as condições ecológicas do rio. Os autores ainda mencionam que normalmente, o debate atribui importância em como gerenciar reservatórios de forma a proporcionar vazões ecológicas que conservem os serviços ecossistêmicos, levando em conta os seus diferentes usos.

Trabalhos foram realizados (Pinto et al., 2011; Medeiros et al., 2014) com o intuito de estudar a influência do ciclo hidrológico sobre a composição de espécies aquáticas do reservatório Sobradinho. A ocorrência de algumas espécies da região depende da disponibilidade e variedade dos recursos alimentares, sendo o regime hidrológico um fator que reflete uma amplitude restrita de nicho trófico para as espécies. Desta forma, impactos socioeconômicos também são gerados.

Costa et al. (2008) avaliaram a influência do ciclo hidrológico sobre as concentrações de fósforo em diferentes trechos (lótico, transição e lêntico) no reservatório Sobradinho. Os autores observaram que a água de afluência ao reservatório é responsável pela elevação da concentração dos níveis de fósforo total e que, após o enchimento do reservatório, existe uma estabilização natural do ambiente, favorecendo a diminuição das concentrações do nutriente.

Outros estudos foram desenvolvidos (Queiroz et al., 2000; Borges et al., 2010) no reservatório Sobradinho utilizando a comunidade de macroinvertebrados bentônicos. Santos et al. (2016) analisaram o padrão longitudinal desta comunidade aquática ao longo de uma cascata de

reservatórios (Sobradinho, Moxotó, Itaparica, Xingó, PA-IV e PA-I) no rio São Francisco. Os autores concluem que os resultados do estudo fornecem subsídios à gestão dos sistemas aquáticos, e que cada reservatório deve ser analisado individualmente, considerando o regime operacional, as comunidades biológicas e as espécies locais.

As regiões mais planas do entorno do reservatório Sobradinho são ocupadas pela pecuária extensiva (bovinos e caprinos) e por projetos agrícolas, empresariais e de subsistência, e algumas áreas cultivadas utilizam agroquímicos, o que pode comprometer a saúde hídrica do reservatório (MMA, 2010). Assim, torna-se necessário maiores esforços da gestão, tendo em vista o fluxo deste sistema aquático e sua importância para região semiárida.

Conclusão

A partir dos estudos apontados, observamos que os bioindicadores e as técnicas de sensoriamento remoto demonstram potencial para análise da qualidade ambiental em bacias hidrográficas, entretanto, para o reservatório Sobradinho os estudos ainda são incipientes.

Dentre as aplicações de sensoriamento remoto, destaca-se a elaboração de mapas de uso e ocupação do solo e de distribuição espacial das concentrações de nutrientes da água como metodologias fundamentais no monitoramento em reservatórios.

Diante disso, percebe-se a necessidade de estudos mais integrados que possam diagnosticar as fontes pontuais e difusas que contribuem para a degradação ambiental nos corpos hídricos. Assim, os bioindicadores aquáticos e as geotecnologias constituem-se em ferramentas importantes para avaliações ambientais, servindo como suporte para um adequado gerenciamento dos recursos hídricos.

Agradecimentos

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor.

Referências

Abílio, F.J.P., 2002. Gastrópodes e outros invertebrados bentônicos do sedimento litorâneo e associado a macrófitas aquáticas em açudes do semi-árido Paraibano, Nordeste do

- Brasil. Tese (Doutorado). São Carlos, UFSCAR.
- Abílio, F.J.P., Fonseca-Gessner, A.A., Leite, R.L., Ruffo, T.L.M., 2006. Gastrópodes e outros invertebrados do sedimento e associados à macrófita *Eichhornia crassipes* de um açude hipertrófico do semi-árido Paraibano. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 1, 165-178.
- Abílio, F.J.P., Ruffo, T.L.M., Souza, A.H.F.F., Florentino, H.S., Oliveira-Junior, E.T., Meireles, B.N., Santana, A.C.D., 2007. Macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores de qualidade ambiental de corpos aquáticos da caatinga. *Revista Oecologia Brasiliense* 11, 397-409.
- Abreu, C.H.M., Cunha, A.C., 2015. Qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais sob impactos ambientais no baixo Rio Jari-AP: Revisão descritiva. *Revista Biota Amazônia, Macapá* 5, 119-131.
- Alba-Tercedor, J., Sánchez-Ortega, A., 1988. Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellawell (1978). *Limnética* 4, 51-56.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2011. O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz. ANA, Brasília. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, 1).
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2013. Alternativas organizacionais para gestão de recursos hídricos. ANA, Brasília. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, 3).
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2014. Agência de água: O que é, o que faz e como funciona. ANA, Brasília. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, 4).
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2015. Conjuntura dos recursos hídricos: informe 2015. Disponível: http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf/view. Acesso: 27 out. 2016.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2016. Evolução da rede hidrometeorológica na região hidrográfica do São Francisco. Disponível: <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/rhs/aofrancisco.pdf>. Acesso: 05 nov. 2016.
- Andrade, H.T.A., Santiago, A.S., Medeiros, J.F., 2008. Estrutura da comunidade de invertebrados bentônicos com enfoque nos insetos aquáticos do rio Piranhas-Assu, Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista EntomoBrasilis* 1, 51-56.
- Armitage, P.D., Moss, D., Wright, J.T., Furse, M.T., 1983. The performance of the new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running water sites. *Water Research* 17, 333-347.
- Arruda, N.O., 2015. Controle do aporte de fósforo no reservatório de Itaparica localizado no semiárido nordestino. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- Baptista, D.F., 2008. Uso de macroinvertebrados em procedimentos de biomonitoramento em ecossistemas aquáticos. *Revista Oecologia Brasiliensis* 12, 425-441.
- Barbola, I.F., Moraes, M.F.P.G., Anazawa, T.M., Nascimento, E.A., Sepka, E.R.; Polegatto, C.M., Milléo, J., Schühli, G.S., 2011. Avaliação da comunidade de macroinvertebrados aquáticos como ferramenta para o monitoramento de um reservatório na bacia do rio Pitangui, Paraná, Brasil. *Iheringia, Série Zoologia* 10, 15-23.
- Barton, D.R., Metcalfe-Smith, J.L., 1992. A comparison of sampling techniques and summary indices for assessment of water quality in the Yamaska river, Quebec, based on benthic macroinvertebrates. *Environmental Monitoring and Assessment* 21, 225-244.
- Borges, H.L. F., Melo, V.F., Lima, E.L.A., Queiroz, A.C.S., Severi, W., 2010. Caracterização da comunidade de macroinvertebrados bentônicos no reservatório de Sobradinho e submédio rio São Francisco, in: Moura, A.N., Araújo, E.L., Bittencourt-Oliveira, M.C., Pimentel, R.M.M., Albuquerque, U.P. (Eds.), *Reservatórios do nordeste do Brasil: biodiversidade, ecologia e manejo*. Canal6, Bauru, pp.479-502.
- BRASIL, 1997. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro.
- Brito-Junior, L., Abílio, F.J.P., Watanabe, T., 2005. Insetos aquáticos do açude São José dos Cordeiros (Semi-árido Paraibano) com ênfase em Chironomidae. *Entomología y Vectores* 12, 149-157.
- Buss, D.F., 2008. Desenvolvimento de Protocolos de Bioavaliação Rápida da qualidade da água de rios e seu uso por agentes comunitários na gestão de recursos hídricos. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, ENSP.
- Buss, D.F., Baptista, D.F., Nessimian, J.L., 2003. Bases conceituais para a aplicação de biomonitoramento em programas de avaliação da qualidade da água de rios. *Cadernos Saúde Pública* 19, 465-473.

- Callisto, M., Moretti, M., Goulart, M.D.C., 2001. Macroinvertebrados bentônicos como ferramenta para avaliar a saúde de riachos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 6, 71-82.
- Capitulo, A.R., Tangorra, M., Ocon, C., 2001. Use of benthic macroinvertebrates to assess the biological status of Pampean streams in Argentina. *Aquatic Ecology* 35, 109-119.
- CBHSH. Comitê de Bacia Hidrográfica do São Francisco, 2013. Oficinas participativas sobre usos múltiplos das águas do rio São Francisco. Disponível: http://cbhsaofrancisco.org.br/?wpfb_dl=1636. Acesso: 26 mar. 2016.
- Cerutti, V.E., 2015. Variação espaço-temporal dos macroinvertebrados bentônicos e nectônicos no reservatório do rio Verde, Paraná, Brasil. Dissertação (Mestrado). Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2006. Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2005. Disponível: http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/rel_aguas_int_2005.pdf. Acesso: 18 mar. 2017.
- Costa, B.D.F., Pessôa, M.N.C., Lima, A.E., Prado, M.D.C., Santos, T.C.P., Antonello, M.M.B., Calado-Neto, A.V., Antonello, A., Severi, W., 2008. Influência do ciclo hidrológico do reservatório de Sobradinho sobre a carga de fósforo total. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca* 3, 31-34.
- Costa, I.B.C., Oliveira, S.M.L., Santos, J.W.M.C., 2012. Avaliação da qualidade da água do reservatório de Manso através do sensoriamento remoto orbital (Landsat-5/tm). *Revista Biodiversidade* 11, 31-42.
- Czerniawska-Kusza, I., 2005. Comparing modified biological monitoring working party score system and several biological indices based on macroinvertebrates for water-quality assessment. *Limnologica* 35, 169-176.
- Dias, A.M., Dantas, I.M., Mota, J.C.M., Silveira-Neto, P.G., Rodrigues, W.A., 2012. Macroinvertebrados Bentônicos Associados à Macrófitas aquáticas em um Trecho do Rio Mossoró. Mossoró-RN. *Revista Verde* 7, 36-39.
- Docile, T.N., Figueiró, R., 2013. Histórico e perspectivas da utilização de macroinvertebrados no monitoramento biológico de ecossistemas aquáticos no Brasil. *Acta Scientiae & Technicae* 1, 31-44.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2016. Monitoramento por satélite. Disponível: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html. Acesso: 14 nov. 2016.
- Esteves, F.A., 1998. Fundamentos de Limnologia. Comunidade Bentônica, 2 ed. Interciência, Rio de Janeiro.
- Fernandes, J.G., 2015. Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- Figueiredo, D., 2005. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Disponível: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/sigabrasil/manuais/conceitos_sm.pdf. Acesso: 10 ago. 2016.
- Florenzano, T.G., 2011. Imagens de Satélite para Estudos Ambientais. Oficina de textos, São Paulo.
- Gonçalves, F.B., Menezes, M.S., 2011. A comparative analysis of biotic indices that use macroinvertebrates to assess water quality in a coastal river of Paraná state, southern Brazil. *Biota Neotropica* 11, 27-36.
- Goulart, M.D., Callisto, M., 2003. Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudos de impacto ambiental. *Revista FAPAM* 2, 153-164.
- Gullan, P.J., Cranston, P.S., 2008. Os Insetos: Um resumo de Entomologia. 3 ed. Roca, São Paulo.
- Gunkel, G., Lima, D., Selge, F., Sobral, M., Calado, S., 2015. Aquatic ecosystem services of reservoirs in semi-arid areas: sustainability and reservoir management, in: Brebbia, C.A. (Ed.), *River Basin Management VIII*. WIT Press, UK, 187-200.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão Das Águas, 2014. Monitoramento da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2013. Disponível: http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/qualidade_aguas/2014/resumo-executivo-2013.pdf. Acesso: 10 jun. 2016.
- Jensen, J. R., 2009. Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres, 2 ed. Parêntese, São Paulo.
- Junqueira, M.V., Amarante, M.C., Dias, C.F.S., FRANÇA, E.S., 2000. Biomonitoramento da qualidade das águas da bacia do alto rio das Velhas (MG/Brasil) através de macroinvertebrados. *Acta Limnologica Brasiliensia* 12, 73-87.
- Junqueira, V.M., Campo, S.C.M., 1998. Adaptation of the BMWP for water quality evaluation to Rio das Velhas watershed (Minas

- Gerai, Brazil). *Acta Limnologica Brasiliensia* 10, 125–135.
- Koch, H., Selge F., Azevedo, J.R., Da Silva, G.N. S., Siegmund-Schultze, M., Hattermann, F.F., 2015. Incluindo aspectos ecológicos na gestão de reservatórios: opções de gestão no Sub-médio e Baixo do rio São Francisco. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília.
- Kolkwitz, R., Marsson, M., 1909. Oekologie der tierischen Saprobien. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 2, 126-152.
- Kuplich, T.M., Barbieri, D.W., Moreira, A., Quadros, F.L.F., Trentin, A.B., Corazza, R., Deprá, B., 2016. Algumas aplicações de sensoriamento remoto em estudos de vegetação campestre no RS. Disponível: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.02.13.31/doc/publicacao.pdf>. Acesso: 10 ago. 2016.
- Landim-Neto, F.O., Gorayeb, A., Pereira Filho, N.S., Silva, E.V., 2014. Os impactos da indústria portuária em uma bacia hidrográfica do Nordeste do Brasil: Análise de indicadores ambientais. *Revista Eletrônica do Prodem* 8, 20-34.
- Lopes, F.B., Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L.M., Andrade, E.M., Chaves, L.C.G., 2014. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 13-19.
- Lopes, H. (*in memoriam*), Sobral, M.C., Gunkel, G., Candeias, A.L., Melo, G., 2015. Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental* 20, 475-484.
- Lopes, H.L., Neto, A.R., Cirilo, J.A., 2013. Modelagem batimétrica no reservatório de Sobradinho: I - Geração e avaliação de superfícies batimétricas utilizando interpoladores espaciais. *Revista Brasileira de Cartografia* 5, 907-922.
- Marengo, J.A., 2008. Água e mudanças climáticas. *Revista Estudos Avançados* 22, 83-96.
- Medeiros, T.N., Rocha, A.A.F., Santos, N.C.L., Severi, W., 2014. Influência do nível hidrológico sobre a dieta de *Leporinus reinhardtii* (Characiformes, Anostomidae) em um reservatório do semiárido brasileiro. *Iheringia, Série Zoologia* 104, 290-298.
- Melo, G.L., 2007. Estudo da qualidade da água do reservatório de Itaparica localizado na bacia do rio São Francisco. Dissertação (Mestrado). Recife, UFPE.
- Mendes, C.A., 2006. Técnicas de Análise Ambiental, in: Tucci, C.E.M., Mendes, C.A. (Org.), *Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp. 169-220.
- Meneses, P.R., 2012. Princípios de Sensoriamento Remoto, in: Meneses, P.R., Almeida, T. (Org.), *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. CNPq, Brasília, pp. 1-31.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2010. Levantamento dos usuários de recursos hídricos e da situação dos remanescentes florestais do entorno do reservatório de Sobradinho. Brasília.
- Monteiro, T.R., Oliveira, L.G., Godoy, B.S., 2008. Biomonitoramento da qualidade da água utilizando macroinvertebrados bentônicos: Adaptação do Índice Biótico BMWP' à bacia do rio Meia Ponte-GO. *Revista Oecologia Brasiliensis* 12, 553-563.
- Moura-Silva, M.S.G., Graciano, T.S., Losekann, M.E., Luiz, A.J.B., 2016. Assessment of benthic macroinvertebrates at Nile tilapia production using artificial substrate samplers. *Brazilian Journal of Biology* 76, 735-742.
- Mustow, S.E., 2002. Biological monitoring of rivers in Thailand: Use and adaptation of the BMWP score. *Hydrobiologia* 479, 191-229.
- Nogueira, P.F., Cabral, J.B.P., Oliveira, S.F., Rocha, I.R., 2015. Eutrofização no reservatório da UHE Foz do rio Claro (GO). *Revista do Departamento de Geografia da USP* 30, 19-33.
- Nova, F.V.P.V., Torres, M.F.A., Coelho, M.P., 2015. Uso e ocupação da terra e indicadores ambientais de impactos negativos: baixo curso do rio São Francisco, estado de Alagoas, Brasil. *Boletim de Geografia* 33, 1-14.
- Novo, E.M.L.M., 2001. Comportamento Espectral da Água, in: Menezes, P.R., Madeira-Netto, J.S. (Org.), *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. Editora Universitária de Brasília, Planaltina, pp.262.
- Novo, E.M.L.M., 2007. Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo.
- Novo, E.M.L.M., 2011. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. 4 ed. Blucher, São Paulo.
- Oliveira, A., Callisto, M., 2010. Benthic macroinvertebrates as bioindicators of water

- quality in an Atlantic forest fragmente. *Iheringia, Série Zoologia* 100, 291-300.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2016. Acompanhamento da Bacia do Rio São Francisco. Disponível: http://arquivos.ana.gov.br/saladesituacao/BoletinsDiarios/SF_07-11-2016.pdf. Acesso: 03 nov. 2016.
- Pereira, G.H.A, Lohmann, M., Maganhotto, R.F., 2016. Proposta e avaliação de índices para delimitar e mapear corpos d'água utilizando imagens do satélite LANDSAT 8. *Revista Brasileira de Geografia Física* 09, 1956-1968.
- Pinto, G.A., Rocha, A.A.F., Santos, N.C.L., Medeiros, T.N., Severi, W., 2011. Variação sazonal na dieta de *Triporthus guentheri* (Garman, 1890) (Actinopterygii: Characidae), no reservatório de Sobradinho, rio São Francisco, BA. *Boletim do Instituto de Pesca* 37, 295-306.
- Pompêo, M., 2008. Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas. *Revista Oecologia Brasiliensis* 12, 406-424.
- Porto, M.F.A., Porto, R.L, 2008. Gestão de bacias hidrográficas. *Revista Estudos avançados* 22, 43-60.
- Queiroz, J.F., Trivinho-Strixino, S., Nascimento, V.M.C., 2000. Organismos bentônicos bioindicadores da qualidade das águas da bacia do médio São Francisco. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna-SP. (Comunicado Técnico, 3).
- Rocha, C.M.C., Alves, A.E., Cardoso, A.S., Cunha, M.C.C., 2012. Macrófitas aquáticas como parâmetro no monitoramento ambiental da qualidade da água. *Revista Brasileira de Geografia Física* 4, 970-983.
- Rodrigues, A.S.L., Malafaia, G., Castro, P.T.A., 2008. Protocolos de avaliação rápida de rios e a inserção da sociedade no monitoramento dos recursos hídricos. *Revista Ambiente & Agua* 3, 143-155.
- Rosenberg, D.M., Resh, V.H., 1993. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*, 1 ed. Chapman & Hall, New York.
- Santana, A.C.D., Souza, A.H.F.F., Ribeiro, L.L., Abílio, F.J.P., 2009. Macroinvertebrados associados à macrófita aquática *Najas marina* L. do riacho Avelós, na região semi-árida do Brasil. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 9, 32-46.
- Santi, G.M., Furtado, C.M., Menezes, R.S., Keppeler, E.C., 2012. Variabilidade espacial de parâmetros e indicadores de qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco, Rio Branco, Acre, Brasil. *Revista Ecologia Aplicada* 11, 23-31.
- Santos, J.G., 2012. Investigação metodológica de detecção de bordas de reservatório. Estudo de caso: Reservatório de Sobradinho-BA. Dissertação (Mestrado). Recife, UFPE.
- Santos, N.C.L., Santana, H.S., Dias, R.M., Borges, H.L.F., Melo, V.F., Severi, W., Gomes, L.C., Agostinho, A.A., 2016. Distribution of benthic macroinvertebrates in a tropical reservoir cascade. *Hydrobiologia* 765, 265-275.
- Silva, B.B., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens landsat5-TM. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 243-252.
- Silva, C.R., Lima, E.P., Machado, J.S., 2012. Análise temporal do espelho d'água da Lagoa Parnaíba (PI) usando imagens digitais. *Revista Ambiência* 8, 909-919.
- Silva, C.V., Henry, R., 2013. Aquatic macroinvertebrates associated with *Eichhornia azurea* (Swartz) Kunth and relationships with abiotic factors in marginal lentic ecosystems (São Paulo, Brazil). *Brazilian Journal of Biology* 73, 149-162.
- Silva, K.Y.S., Everton, N.S., Melo, M.A.D., 2016. Aplicação dos índices biológicos *Biological Monitoring Working Party* e *Average Score per Taxon* para avaliar a qualidade de água do rio Ouricuri no Município de Capanema, Estado do Pará, Brasil. *Revista Pan-Amazônica de Saúde* 7, 13-22.
- Silveira, M.P., 2004. Aplicação do biomonitoramento para avaliação da qualidade da água em rios. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna-SP. (Documentos, 36).
- Soares, E., 2013. Seca no Nordeste e a transposição do rio São Francisco. *Geografias* 9, 75-86.
- Sobral, M.C., 2011. Estratégia de Gestão dos Recursos Hídricos no Semiárido Brasileiro. *Revista Eletrônica do Prodemá* 7, 76-82.
- Souza, A.H.F.F., Abílio, F.J.P., 2006. Zoobentos de duas lagoas intermitentes da caatinga paraibana e as influências do ciclo hidrológico. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 1, 146-164.
- Souza, A.H.F.F., Abílio, F.J.P., Ribeiro, L.L., 2008. Colonização e Sucessão Ecológica do Zoobentos em Substratos Artificiais no Açude Jatobá I, Patos - PB, Brasil. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 8, 125-144.
- Souza, C.C., Moreira, A.A., Schimith, R.S., Brandão, P.C., Silva, E., 2007. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil: Uma

- revisão bibliográfica. Revista Ciência Florestal 17, 409-417.
- Souza, J.R., Moraes, M.E.B., Sonoda, S.L., Santos, H.C.R.G., 2014. A importância da qualidade da água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. Revista Eletrônica do Prodem 8, 26-45.
- Thomazi, R.D., Kiifer, W.P., Ferreira Jr, P.D., Sá, F.S., 2008. A sucessão ecológica sazonal de macroinvertebrados bentônicos em diferentes tipos de atratores artificiais no rio Bubu, Cariacica-ES. Revista Natureza On Line 6, 1-8.
- Toledo, L.G., Nicolella, G., 2002. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. Scientia Agrícola 59, 181-186.
- Tundisi, J.G., 2008. Recursos hídricos no futuro: Problemas e soluções. Estudos Avançados 22, 1-16.
- Tundisi, J.G., Matsumura-Tundisi, T., 2008. Limnologia, 1 ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Zamora-Munoz, C., Alba-Tercedor, J., 1996. Bioassessment of organically polluted Spanish rivers, using a biotic index and multivariate methods. Journal of the North American Benthological Society 15, 332-352.