

ANÁLISE MULTIVARIADA NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE FOZ DO AREIA, ESTADO DO PARANÁ

APPLYING MULTIVARIATE ANALYSIS TECHNIQUES FOR THE
EVALUATION OF WATER QUALITY OF FOZ DO AREIA RESERVOIR, STATE OF PARANÁ

Nicole Machuca Brassac de Arruda

Bióloga. Doutora em Engenharia Floresta pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professora da Universidade Positivo. Pesquisadora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Curitiba (PR), Brasil.

Nivaldo Eduardo Rizzi

Engenheiro Florestal. Doutor em Ciencias y Tecnicas del Agua y Medio Ambiente pela Universidad de Cantabria (UNICAN), Espanha. Professor do Departamento de Ciências Florestais da UFPR – Curitiba (PR), Brasil.

Tânia Lúcia Graf de Miranda

Engenheira Agrônoma. Doutora em Meio Ambiente e Desenvolvimento pela UFPR. Pesquisadora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Curitiba (PR), Brasil.

Endereço para correspondência:

Nicole Machuca Brassac de Arruda – Rodovia BR 116, Km 98, 8813 – Jardim das Américas – 81531-980 – Curitiba (PR), Brasil – Email: n.brassac@lactec.org.br

RESUMO

O reservatório de Foz do Areia, formado em 1980, localiza-se no rio Iguaçu e tem finalidade de geração de energia. A qualidade de suas águas é monitorada desde 2005, gerando uma extensa matriz de dados. A Análise Fatorial (AF) é empregada como ferramenta de estudo de matrizes como esta, condensando dados, com mínima perda de informação. A AF foi aplicada para avaliação de dados de cinco estações de monitoramento no local. A variância explicada esteve entre 71,1 e 84,3%, com a retenção de 5 a 6 fatores, por estação. Na estação a montante do reservatório, o aporte de poluentes foi relacionado à área da bacia de contribuição, que se caracteriza pela diversidade de usos do solo. Nas estações de reservatório, o fator eutrofização foi destacado, evidenciado pela ocorrência eventual de florações, que interferem na qualidade da água. A estação a jusante do reservatório caracterizou-se por fontes pontuais de poluentes, evidenciando também a qualidade da água restituída.

Palavras-chave: Rio Iguaçu; reservatório hidrelétrico; análise multivariada; eutrofização.

ABSTRACT

Foz do Areia reservoir is located in the Iguaçu River, and was formed in 1980 with the objective of energy generation. The quality of its water is monitored since 2005, generating an extensive data matrix. The Factor Analysis (FA) is used as a tool to study data matrices like this, condensing data with minimal loss of information. Factor analysis was applied to evaluate data from five monitoring stations on that site. Five to six factors were retained per sampling station, with explained variance between 71.1 and 84.3%. In the upstream sampling station, the contribution of pollutants to the water body was related to the basin's contribution, a basin that drains a large area and with complex land uses. In reservoir sampling stations, the eutrophication factor was highlighted, as shown by the occasional occurrence of algal blooms, which affect water quality. The downstream station was characterized by point sources, also showing the influence of the water quality that is returned to the river.

Keywords: Iguaçu River; hydropower reservoir; multivariate analysis; eutrophication.

INTRODUÇÃO

Dos vários recursos disponíveis na natureza, a água está entre os mais importantes e o principal recurso necessário à manutenção da vida. Entre as múltiplas aplicações da água estão a potabilidade, a balneabilidade, as atividades domésticas e industriais, bem como a diluição de seus efluentes, a irrigação, a criação de animais e a geração de energia (KHAN & ANSARI, 2005).

No Brasil, a utilização da água para a geração de energia é de vital importância para a manutenção da matriz energética nacional. Atualmente responsável por 14,7% da matriz energética brasileira e 81,8% da matriz elétrica do país, a energia hidráulica advém do barramento de rios e da consequente formação de reservatórios localizados principalmente nas Regiões Sul e Sudeste (SOARES *et al.*, 2008; EPE, 2012).

Nas últimas décadas, alguns desses reservatórios têm passando por alterações na qualidade de suas águas, o que compromete diretamente a manutenção dos usos múltiplos dos recursos hídricos, assegurados por força de lei, incluindo a geração de energia. Dentre esses problemas, a eutrofização tem papel preponderante.

Entre os anos de 2006 e 2009, o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, também conhecida como UHE Foz do Areia, de concessão da Companhia Paranaense de Energia (COPEL), passou por problemas de comprometimento da qualidade das suas águas em função de florações de cianobactérias, uma das principais consequências associadas à eutrofização. A concessionária, que já monitorava sistematicamente aquele corpo hídrico desde 2003, ampliou a malha amostral, bem como o número de variáveis de qualidade de água analisadas, em especial nas estações do reservatório.

Programas de monitoramento de qualidade de água como o supracitado, gerenciados pelas concessionárias de geração de energia, produzem grandes matrizes de

dados, uma vez que incluem amostragens em várias estações de coleta, durante longos períodos. O tamanho da matriz de dados e a quantidade de possíveis interferentes na coleta e análise dos dados acabam dificultando o diagnóstico da qualidade da água.

A utilização de ferramentas estatísticas facilita a interpretação de matrizes com grande número de variáveis. Dentre as diversas técnicas que podem ser aplicadas, destaca-se a de análise multivariada, que, além de auxiliar na compreensão da interação dos diversos fatores que afetam o ecossistema aquático, permite avaliar, de forma sistemática, quais variáveis melhor explicam as mudanças na qualidade da água dos reservatórios.

Segundo Hair *et al.* (2005), dentre as técnicas de análise multivariada, a Análise Fatorial (AF) avalia a estrutura das correlações entre um grande número de variáveis, definindo um conjunto de dimensões comuns, os fatores. Dessa forma, a avaliação de bancos de dados de qualidade de água por meio da AF pode ser uma ferramenta de gestão e acompanhamento ambiental, condensando séries históricas de dados, em um número menor de fatores que representam a variância da amostra, com pequena perda de informação. Trabalhos aplicando diferentes técnicas de análise multivariada na avaliação da qualidade da água vêm se tornando cada vez mais frequentes (DE CEBALLOS *et al.*, 1998; NOGUEIRA *et al.*, 1999; RANGEL-PERAZA *et al.*, 2009; GONZALES *et al.*, 2013), assim como a utilização da AF no estudo de ambientes lênticos, como reservatórios (SIECIECHOWICZ *et al.*, 2011; CID *et al.*, 2011; VAROL *et al.*, 2012; CAVALCANTE *et al.*, 2013).

Com o intuito de descrever a qualidade das águas do reservatório de Foz do Areia, bem como evidenciar possíveis diferenças entre as estações de monitoramento do reservatório, a montante e a jusante, variáveis de qualidade foram analisadas por intermédio de AF.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O reservatório de Foz do Areia está situado no Rio Iguaçu, em seu terço médio, no sudoeste do Estado do Paraná, abrangendo áreas limítrofes de cinco municípios do Es-

tado. O reservatório, formado em 1980, está associado à geração de energia da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, também conhecida pelo nome de UHE Foz

do Areia (COPEL, 2008). É o primeiro reservatório de uma série de outros cinco empreendimentos hidrelétricos no Rio Iguaçu, de montante para jusante, Foz do Areia, Segredo, Salto Santiago, Salto Osório e Salto Caxias.

No local do barramento de Foz do Areia, a área de drenagem do Rio Iguaçu é de 29.900 km², sendo que a lâ-

mina de água do reservatório compreende 146,5 km² (LACTEC, 2009).

Desde 2005, quatro estações são monitoradas no reservatório. A partir de 2008, esse número subiu para cinco. Suas localizações são ilustradas na Figura 1 e detalhadas na Tabela 1.

Coleta e tratamento das variáveis de qualidade de água

Variáveis de qualidade de água foram coletadas trimestralmente entre 2005 e 2008, e bimestralmente entre 2008 e 2012 pelo Programa de Automonitoramento da concessionária: temperatura da água (°C), oxigênio dissolvido (mg.L⁻¹), transparência da água (m), pH, condutividade (µS.cm⁻¹), fósforo total (mg.L⁻¹), nitrogênio total (mg.L⁻¹), sólidos totais (mg.L⁻¹), turbidez (NTU), coliformes termotolerantes

(NMP.100mL⁻¹), Demanda bioquímica de oxigênio (DBO, mg.L⁻¹), Demanda química de oxigênio (DQO, mg.L⁻¹). Nas estações de reservatório (FA_2R, FA_3R e FA_4R), também foram avaliadas a densidade do fitoplâncton (cél.mL⁻¹) e a concentração de clorofila-a (µg.L⁻¹). Como variáveis climatológicas foram coletadas a temperatura do ar (°C) e a pluviosidade acumulada em 48 horas anteriores à coleta (mm).

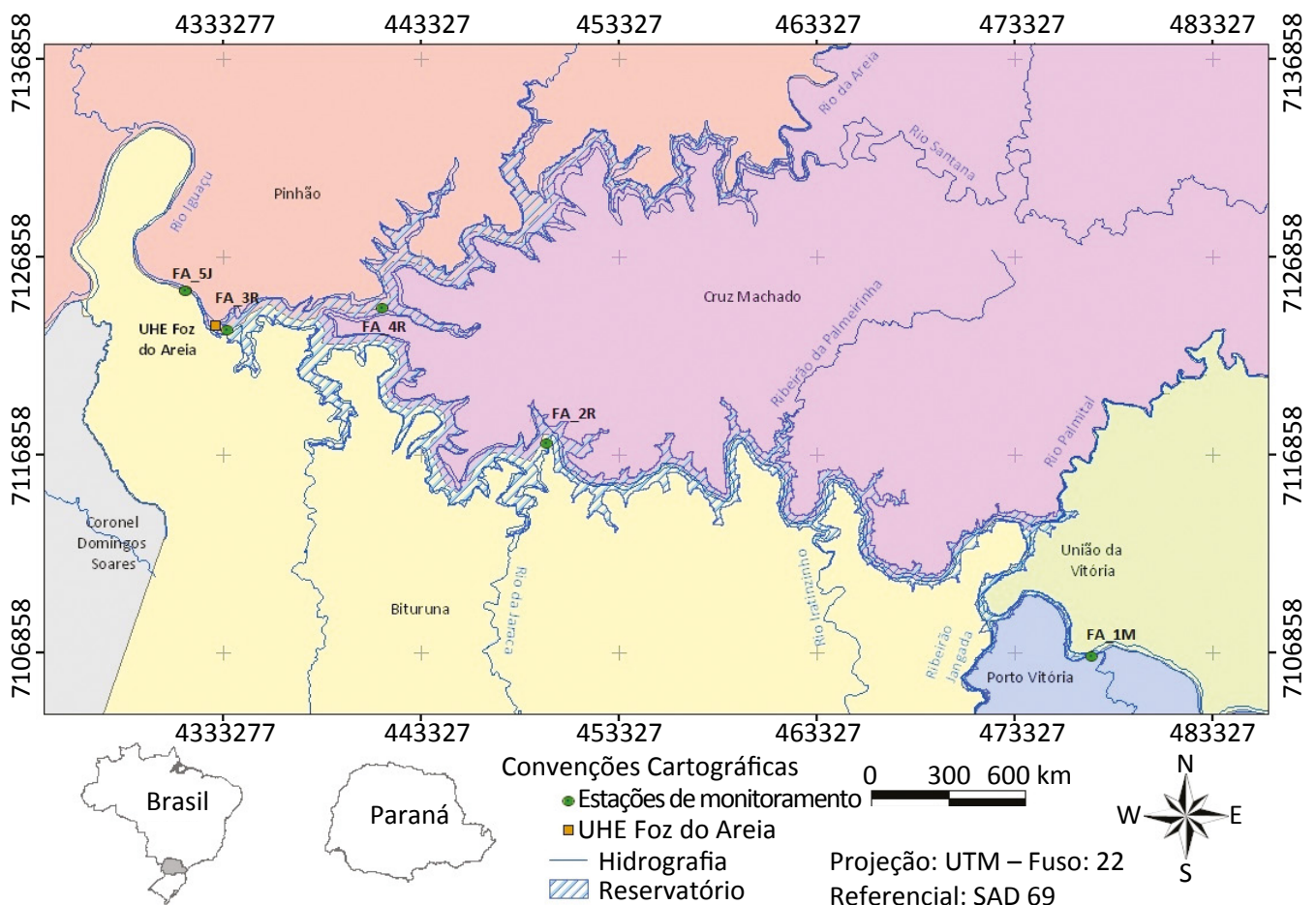


Figura 1 - Localização das estações de amostragem na região do reservatório de Foz do Areia.

A seleção das variáveis em análise considerou que o número de observações (n) fosse maior que o número de variáveis (p) avaliadas, ou seja, “n>p”, contemplando um dos critérios da análise multivariada.

Para a realização da AF, adotou-se o método das componentes principais (ACP). Primeiramente, os dados foram avaliados para a verificação da distribuição normal multivariada, por intermédio de função programada no *software* Matlab 7.0. Para validar a premissa de que os dados apresentam distribuição normal, o gráfico resultante de tal avaliação deve representar uma reta (ou uma reta aproximada) (FRANÇA, 2009).

A adequabilidade dos dados quanto à estrutura da AF foi avaliada por meio do teste de esfericidade de Bartlett e da medida de adequacidade da amostra (MSA) de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (HAIR *et al.*, 2009), pelo programa Matlab.

O teste de esfericidade de Bartlett testa a hipótese de que as correlações de uma dada matriz de correlação sejam iguais a zero, ou seja, a hipótese de que as variáveis não sejam relacionadas. Para ser considerado

adequado para avaliação pela AF, o resultado (valor p) deve ser inferior a 0,05 (FRANÇA, 2009).

A medida de adequacidade de KMO avalia qual variância dos dados pode ser considerada comum a todas as variáveis e, dessa forma, ser atribuída a um fator comum. A estatística desse teste é representada pelo índice MSA (do inglês *Measure of Sampling Adequacy*). O valor de MSA varia entre 0 e 1, sendo que valores entre 0,5 e 1,0 indicam que a AF é uma ferramenta apropriada para a avaliação dos dados, enquanto valores abaixo de 0,5 indicam que a AF pode ser inadequada para o conjunto de dados em questão (FRANÇA, 2009).

A estimação do número de fatores a serem retidos foi determinada pelo critério de Kaiser (KAISER, 1958), no qual os fatores retidos são aqueles com autovalores >1. As variáveis selecionadas para a caracterização dos fatores foram aquelas que apresentaram peso absoluto $\geq 0,7$ (SIECIECHOWICZ *et al.*, 2011).

Como parte da AF, a matriz de correlações foi também calculada e seus dados utilizados para explicar as interações entre certas variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, procedeu-se à análise da normalidade multivariada dos dados das estações de monitoramento de qualidade de água. O resultado é obtido na forma de um gráfico Scatter Plot. Quanto mais a disposição dos pontos estiver próxima a formar uma reta, é confirmada a normalidade multivariada dos dados.

O mesmo é obtido pelo emprego da função NORMULT (FRANÇA, 2009), no *software* Matlab.

A Figura 2 ilustra o gráfico, por estação de amostragem, que relaciona o quadrado da distância generalizada e o teste do χ^2 para cada evento amostral por estação. Nas estações FA_1M, FA_2R, FA_3R e FA_5J, tal gráfico

Tabela 1 - Posição geográfica (em UTM) das estações de monitoramento.

Estação	Localização	Coordenadas UTM	
		E	N
FA_1M	Rio Iguaçu, a montante do reservatório/corredeiras de Porto Vitória	477240	7106693
FA_2R	Rio Iguaçu, reservatório da UHE Foz do Areia, próximo à área de lazer do município de Bituruna	449542	7117359
FA_3R	Rio Iguaçu, reservatório da UHE Foz do Areia, cerca de 500 m da barragem (<i>log boom</i>)	433674	7123256
FA_4R	Rio Iguaçu, reservatório da UHE Foz do Areia, no braço do Rio Areia	441382	7124342
FA_5J	Rio Iguaçu, imediatamente a jusante da casa de força da UHE Foz do Areia	431466	7125220

UHE: USINA HIDRELÉTRICA; UTM: UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR.

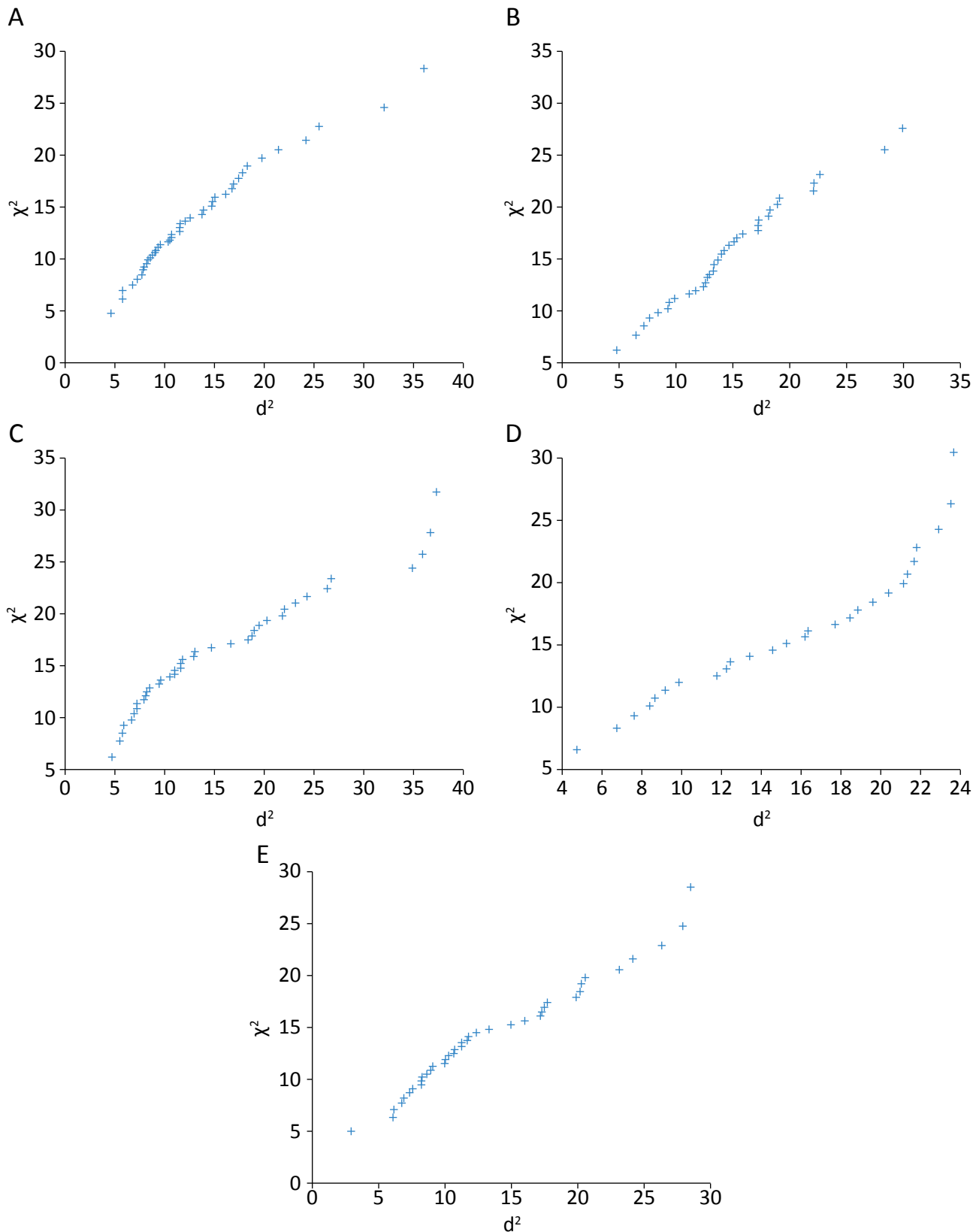


Figura 2 - Avaliação da normalidade multivariada: (A) FA_1M; (B) FA_2R; (C) FA_3R; (D) FA_4R; (E) FA_5J.

representa o resultado referente a 39 campanhas de amostragem, sendo que, para a estação FA_4R, são referenciadas 28 campanhas de amostragem.

Conforme pode ser observado pela Figura 2, a distribuição dos dados de qualidade de água da região da UHE Foz do Areia pode ser considerada normal.

Posteriormente, o teste de esfericidade de Bartlett foi aplicado, bem como a medida de adequacidade da amostra pelos critérios de KMO. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

Segundo França (2009), o teste de esfericidade de Bartlett compara o nível de significância, denominado valor p, resultante da combinação do valor calculado do teste do χ^2 e dos graus de liberdade, com o valor de 0,05. Dessa forma, quando o valor p for $<0,05$, a hipótese de que a matriz de correlação da população é uma matriz identidade que indica que o modelo fatorial é inapropriado será rejeitada e os dados serão adequados para a AF.

Conforme observado na Tabela 2, o valor p obtido para todas as estações de monitoramento foi $<0,05$, indicando que as matrizes são passíveis de avaliação por AF. Já a MSA é validada com valores $\geq 0,5$. Assim, com exceção da estação a jusante FA_5J, todas as estações apresentam dados ajustados ao tratamento de AF. Apesar do não atendimento a esse item, a AF foi procedida também para essa estação, para que seus resultados fossem comparáveis com as demais estações. No entanto, deve-se ressaltar que o conjunto de dados de qualidade de água da estação FA_5J pode não estar ajustado de forma adequada para tratamento por AF.

Os resultados da AF para cada estação de amostragem encontram-se resumidos na Tabela 3. Nesta, são registradas as variáveis que apresentaram pesos iguais ou superiores a $|0,7|$, em cada fator retido. O símbolo junto ao nome da variável indica o sentido (positivo ou

negativo) da variável. Também são apresentadas as variâncias individuais de cada fator e a variância total da amostra, representada pelos fatores retidos.

Na estação FA_1M, localizada a montante do reservatório, foram selecionados 5 fatores que, em conjunto, explicam 71,7% da variância total da amostra. O Fator 1 foi composto pelas variáveis oxigênio dissolvido (OD), temperatura de água e temperatura ambiente, e correspondeu a 19,3% da variância total da amostra. Tal fator representa a influência da temperatura na concentração de oxigênio da água, variáveis que interagem em sentido inverso. O comportamento dos gases, incluindo o oxigênio dissolvido, tem relação com a temperatura, pois a elevação da mesma torna os gases menos solúveis. Como se trata de um sistema aberto, o OD na água desprende-se para o ar (FIO-RUCCI & BENEDETTI-FILHO, 2005). Situações como esta, em que o OD e a temperatura da água mostraram correlação negativa, já foram registradas anteriormente, como em Saffran & Anderson (1997), em estudos no Rio Red Creek, em Alberta, Canadá.

O Fator 2 foi composto pelas variáveis condutividade e turbidez, explicando 14% da variância da amostra. A análise dos variáveis de qualidade de água dessa estação demonstra a ocorrência de situações em que a condutividade esteve elevada, e a turbidez baixa. Situações como essas já foram registradas em outros estudos, como o de Maimuna & Victor (2012), em rios na Nigéria. Tais autores comentam que essa relação inversa ocorreu tanto na estação seca quanto na estação chuvosa. Sendo a condutividade a medida indireta de íons dissolvidos na água, a turbidez pode estar relacionada com a ocorrência de poluentes não iônicos, como matéria orgânica e coliformes.

O Fator 3 foi representado, isoladamente, pela variável sólidos totais, com 13,9% da variância. Estando isolado em um fator, tal variável demonstra sua

Tabela 2 - Avaliação do teste de esfericidade de Bartlett e da medida de adequacidade da amostra.

	FA_1M	FA_2R	FA_3R	FA_4R	FA_5J
χ^2	192,63	351,22	753,70	235,62	173,32
Valor p	0	0	0	0	0
MSA	0,5	0,5	0,7	0,5	0,4

MSA: MEDIDA DE ADEQUACIDADE DA AMOSTRA.

importância na caracterização das águas do reservatório. Segundo Plamondon *et al.* (1991), a remoção de florestas no entorno de corpos de água pode promover elevações na temperatura e reduções na concentração de OD (como o observado no Fator 1), conforme observado no trabalho supracitado, sobre

a conservação do solo e água em bacias do Peru. Plamondon *et al.* (1991) reforçam que, em bacias florestadas, a concentração de sólidos totais na água foi inferior, quando comparada a bacias que passaram por remoção de áreas de floresta para a criação de pastos e áreas agriculturáveis.

Tabela 3 - Resultados da análise fatorial dos dados de qualidade de água das estações de monitoramento do reservatório de Foz do Areia.

	FA_1M	FA_2R	FA_3R	FA_4R	FA_5J
Fator 1	OD (-) T. água (+) T. ar (+)	Clor-a (+) Fito (+) OD (+) pH (+)	Clor-a (+) Fito (+) DBO (+) DQO (+) NT (+)	Clor-a (+) OD (+)	Cond. (+) NT (+) ST (+)
Variância	19,3%	19,4%	36,0%	16,0%	16,9%
Fator 2	Cond. (-) Turbidez (+)	Secchi (-) Turbidez (+)	Secchi (-) OD (+)	T. água (+) T. ar (+)	OD (-) T. água (+) T. ar (+)
Variância	14,0%	17,0%	20,2%	15,7%	15,9%
Fator 3	ST (+)	Cond. (+) ST (+)	T. água (+) T. ar (+)	Cond. (+) DBO (+)	Turbidez (+)
Variância	13,9%	13,5%	13,3%	14,7%	11,7%
Fator 4	DBO (+) DQO (+)	T. água (+)	Pluvio (-)	Secchi (-) Turbidez (+)	Colif. T. (-) Pluvio (-)
Variância	12,3%	12,7%	7,8%	13,9%	10,9%
Fator 5	Colif. T. (-) Secchi (-)	DBO (+) DQO (+)	Colif. T. (+)	NT (+) Pluvio (+)	DBO (+) DQO (+)
Variância	11,6%	11,8%	7,0%	12,1%	10,7%
Fator 6	–	–	–	Colif. T. (-)	PT (+)
Variância	–	–	–	9,7%	8,3%
Variância total explicada	71,1%	74,4%	84,3%	82,1%	74,4%

CLOR-A: CLOROFILA-A; COLIF. T.: COLIFORMES TERMOTOLERANTES; COND.: CONDUTIVIDADE; DBO: DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO; DQO: DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO; FITO: DENSIDADE DO FITOPLÂNCTON; NT: NITROGÊNIO TOTAL; OD: OXIGÊNIO DISSOLVIDO; PLUVIO: PLUVIOSIDADE ACUMULADA EM 48H; PT: FÓSFORO TOTAL; SECCHI: TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA; ST: SÓLIDOS TOTAIS; T. ÁGUA: TEMPERATURA DA ÁGUA; T. AR: TEMPERATURA DO AR.

O Fator 4 compreendeu as variáveis DBO e DQO, com explicação de 12,3% da variância total da amostra. Esse fator representa a matéria orgânica na água, corroborando o diagnóstico dos fatores anteriores de aporte de matéria orgânica e demais poluentes ao corpo hídrico a montante do empreendimento.

O Fator 5 incluiu as variáveis coliformes termotolerantes e transparência da água, variando no mesmo sentido, e representou 11,6% da variância total da amostra. Tais variáveis atuam, de forma geral, em sentidos inversos, uma vez que representam, respectivamente, a transparência da água e a contaminação por material de origem fecal. A composição desse fator pode ter sofrido interferência dos valores elevados de coliformes termotolerantes, cujas concentrações brutas foram altas na maior parte do monitoramento, enquanto os valores de transparência variaram pouco (entre 0,5 e 1,0 m).

A Estação FA_2M localiza-se no terço médio do reservatório, sendo um ambiente lêntico, nas proximidades de uma área de lazer do município de Bituruna. Quatro fatores foram selecionados para descrever a variabilidade da qualidade da água naquela estação. Tais fatores, em conjunto, representam 74,4% da variabilidade total dos dados. O Fator 1 foi representado pelas variáveis clorofila-a, densidade do fitoplâncton, oxigênio dissolvido e pH, que descrevem o fator eutrofização do corpo hídrico (19,4% da variância). A ocorrência de eventos de florações de microalgas na região (corroborado pela densidade do fitoplâncton) apresentou relação direta com a clorofila-a (medida da biomassa algal). Com a elevação da densidade da comunidade de produtores primários, durante o dia, ocorre também a elevação na concentração de OD, advindo do processo de fotossíntese. Também o pH pode ser afetado por eventos de floração, uma vez que ocorre uma demanda maior de CO₂ da água para a fotossíntese e consequente alcalinização da água. Situações de eventos de floração no reservatório de Foz do Areia já foram evidenciadas em trabalhos anteriores (BRASSAC *et al.*, 2009; PEREIRA *et al.*, 2009; SERPE *et al.*, 2013).

O Fator 2 também está relacionado com a eutrofização já caracterizada pelo primeiro fator (17,0% da variância). A medida de transparência (disco de Secchi) e a turbidez foram as variáveis descritivas do fator e ocorreram em sentidos opostos. Tal situação está, possivelmente, relacionada com a turbidez biogênica, dada a ocorrência de eventuais florações, que impedem a

entrada de luz para a subsuperfície da água, aumentando a turbidez e reduzindo a profundidade medida para o disco de Secchi.

Corroborando o diagnóstico de material em suspensão, o Fator 3, responsável por 13,5% da variância da amostra, foi caracterizado pela condutividade e pela variável sólidos totais, sendo o Fator 5 descritivo da ocorrência de matéria orgânica na água pelas variáveis DBO e DQO (11,8% da variância). O Fator 4, representado exclusivamente pela temperatura da água, pode ter ilustrado a influência de tal variável como catalisadora das reações metabólicas do ecossistema, uma vez que a temperatura eleva o metabolismo da comunidade aquática, incluindo o fitoplâncton.

Na Estação FA_3R foram selecionados 5 fatores descritivos da variabilidade dos dados de qualidade de água, representando 84,3% da variabilidade total da amostra. Essa estação de amostragem está localizada no reservatório de Foz do Areia, nas proximidades do barramento, região onde o lago apresenta sua maior profundidade. Assim como na estação FA_2R, também o primeiro fator foi representativo do processo de eutrofização. Descrito pelas variáveis clorofila-a, fitoplâncton, DBO, DQO e nitrogênio total, o Fator 1 foi responsável por 36,0% da variância total da amostra. As variáveis descritivas do fator representam a ocorrência de florações (densidade de fitoplâncton e clorofila-a) e a disponibilidade de matéria orgânica quando da ocorrência desses eventos (DBO, DQO e nitrogênio total). Tal situação é corroborada também pelas variáveis descritivas do Fator 2, OD e transparência da água, em sentidos opostos (20,2% da variância). Quando da ocorrência de florações, picos de OD podem ser registrados, e a turbidez biogênica prejudica a entrada da luz para as camadas inferiores da água, reduzindo a transparência da água. Os Fatores 4 e 5 também comprovam o diagnóstico de aportes de matéria orgânica ao reservatório, uma vez que são compostos por pluviosidade acumulada e coliformes termotolerantes, respectivamente. Já o Fator 3, conforme descrito, pode ter indicado a influência da temperatura no metabolismo do ecossistema aquático.

A Estação FA_4R localiza-se no reservatório de Foz do Areia, em um braço formado pelo Rio Areia, tributário do Rio Iguaçu, na região do barramento. Para a caracterização da qualidade das águas do reservatório nessa região, foram selecionados 6 fatores, que, em conjunto, representaram 82,1% da variância total da amostra.

Assim como nas demais estações de reservatório, na estação FA_4R o Fator 1 foi representado pelas variáveis oxigênio dissolvido e clorofila-a e correspondeu a 16,0% da variância total da amostra. Tal composição relaciona-se à atividade da comunidade de produtores primários no ecossistema, que, em quantidade elevada, também elevam a concentração de OD na água. O Fator 2 foi composto pelas variáveis temperatura da água e temperatura do ar, representando 15,7% da variância da amostra, reforçando a influência da temperatura no metabolismo do ecossistema. Os demais fatores foram caracterizados pelo aporte de poluentes, como o Fator 3 (14,7% da variância), descrito pela condutividade e pela DBO, e o Fator 4 (13,9 % da variância), caracterizado pelas variáveis transparência da água e turbidez, em sentidos opostos. Em conjunto com o Fator 5 (12,1% da variância), caracterizado pelas variáveis nitrogênio total e pluviosidade acumulada, demonstram a influência do uso do solo nas características da qualidade da água, visto que a lavagem do solo pela ação das chuvas pode carrear poluentes para o corpo de água. Segundo Jarvie *et al.* (2006), a correlação em mesmo sentido entre a chuva e os poluentes pode ser indicativa de fontes difusas de poluição, uma vez que a lavagem do solo após/durante a chuva elevaria a concentração do constituinte em estudo na água. O Fator 6 (9,7% da variância) foi representado, isoladamente, pela variável coliformes termotolerantes, indicativa de contaminação das águas por material de origem fecal.

A jusante do barramento (no leito do Rio Iguaçu) e a montante do reservatório de Segredo (o próximo na cadeia de empreendimentos de geração instalada no Rio Iguaçu) localiza-se a estação FA_5J. Descrevendo a qualidade da água local foram verificados seis fatores que, em conjunto, somam 74,4% da variabilidade total dos dados. Nessa estação de característica intermediária entre um ambiente de rio e um ambiente de lago, o Fator 1 foi descrito pelas variáveis condutividade, nitrogênio total e sólidos totais, representando 16,9% da variância da amostra.

O Fator 2 (15,9% da variância total da amostra) foi caracterizado pelas variáveis oxigênio dissolvido, temperatura do ar e temperatura da água. Tal situação também foi observada na estação a montante FA_1M. Conforme descrito, a influência da temperatura na dissolução dos gases explica tal relação em sentido inverso. Já nas estações de reservatório tal característica não foi observada.

É possível que tal relação entre o OD e a temperatura não tenha sido registrada nas estações de reservatório, em função da influência dos processos de estratificação, característica dos locais estudados (MIRANDA *et al.*, 2009). A estratificação térmica forma uma barreira física, com diferenças significativas na densidade da água. Essa barreira impede a mistura de massas de água com temperaturas e concentrações de OD diferentes. Assim, o calor não se distribui de forma homogênea na coluna de água, assim como o OD (PADIAL *et al.*, 2009). Estudos como o de Pratte-Santos & Simões (2010) também registraram correlação fraca (abaixo de 0,5) entre o OD e a temperatura em reservatórios, no caso, o reservatório de Duas Bocas, no Espírito Santo. Outro fator interferente na correlação negativa linear entre o oxigênio dissolvido e temperatura da água, em ecossistemas lênticos, é a atividade fotossintética (MAIER, 1987).

O Fator 3 foi representado pela variável turbidez e reteve 11,7% da variância. O Fator 4 caracterizou-se pelas variáveis coliformes termotolerantes e pluviosidade acumulada, destacadas em sentidos opostos, com 10,9% da variância total da amostra. Com base nos estudos de Jarvie *et al.* (2006), pode-se pressupor que a relação inversa entre tais variáveis pode indicar diluição dos poluentes pela ação das chuvas, correspondendo a aportes por fontes pontuais.

O Fator 5 caracterizou o aporte de matéria orgânica, destacando as variáveis DBO e DQO. Tal fator apresentou 10,7% da variância total da amostra. Também, o último fator (o Fator 6) destacou-se, isoladamente, pela variável fósforo total, com 8,3% da variância total da amostra.

Com relação à aplicação da AF propriamente dita, como uma ferramenta de diagnóstico, observa-se a redução no número de variáveis explicativas por estação de monitoramento. Nas estações de reservatório, cuja matriz inicial apresentava 16 variáveis, ocorreu redução para 11 variáveis, resumidas em 5 ou 6 fatores. Na estação a montante, de 14 variáveis iniciais, houve também uma redução para 10 variáveis, sumarizadas em 5 fatores. Somente na estação a jusante ocorreu menor redução, em que 14 variáveis foram reduzidas para 12, resumidas em 6 fatores; no entanto, ressalva-se que também para essa estação o modelo fatorial mostrou-se menos ajustado, por meio da avaliação do índice MSA.

As variáveis oxigênio dissolvido, temperatura da água e DBO estiveram presentes na caracterização de um fator em cada uma das estações de monitoramento.

CONCLUSÕES

As variáveis que caracterizaram os fatores retidos e que descrevem a qualidade de água da estação FA_1M representaram o aporte de poluentes ao corpo hídrico, cuja bacia de contribuição até o barramento drena uma área de 29.900 km², incluindo vários centros urbanos.

Já nas estações FA_2M, FA_3R e FA_4R a composição dos fatores retidos evidenciou a eutrofização do corpo hídrico, em que ocorrem eventos esporádicos de florações de microalgas e o aporte de poluentes advindos da bacia de contribuição.

Na estação localizada a jusante do reservatório, FA_5J, observa-se a qualidade da água alterada, seja pela característica das águas advindas a montante, bem como pela eventual ocorrência de fontes de poluição na região da estação.

De forma geral, observa-se que a AF demonstrou ser uma boa ferramenta de análise de dados de qualidade de água, em especial no sentido de condensar extensas matrizes de dados, com menor perda de informação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Paranaense de Energia (COPEL), pela permissão para a utilização de dados de qualidade de água do reservatório de Foz do Areia, bem como possibilidade de acesso aos dados brutos referentes ao monitoramento da região, mantido pela concessionária.

Os autores agradecem também ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos LACTEC), pelo apoio na conclusão da presente pesquisa de doutoramento do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA, N.M.B. *Avaliação de variáveis de qualidade de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caxias, como instrumento de gestão de bacias hidrográficas*. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BRASSAC, N.M.B.; PRESTES, E.C.; MIRANDA, T.L.G.; LUDWIG, T.A.V.; TREMARIN, P.I.; MULLER, I.I.; PEREIRA, P.S. Ocorrência de florações em reservatórios hidrelétricos: O caso da UHE Foz do Areia. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 19., 2009, Campo Grande. *Anais...* Campo Grande: ABRH, 2009. p. 1-11.
- CAVALCANTE, Y.L.; HAUSER-DAVIS, R.A.; SARAIVA, A.C.F.; BRANDÃO, I.L.S.; OLIVEIRA, T.F.; SILVEIRA, A.M. Metal and physico-chemical variations at a hydroelectric reservoir analyzed by multivariate analyses and artificial neural networks: environmental management and policy/decision-making tools. *Science of the Total Environment*, v. 442, p. 509-514, 2013.
- CID, F.D.; ANTÓN, R.I.; PARDO, R.; VEGA, M.; CAVIEDES-VIDAL, E. Modelling spatial and temporal variations in the water quality of an artificial water reservoir in the semiarid midwest of Argentina. *Analytica Chimica Acta*, v. 705, n. 1-2, p. 243-252, 2011.
- COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. *Usina Bento Munhoz da Rocha Netto*. Curitiba: COPEL, 2008. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcope12.nsf%2F044b34faa7cc1143032570bd0059aa29%2Fe307f2c9b2edc56303257412004fdb91>>. Acesso em: 10 nov. 2011.
- DE CEBALLOS, B.S.O.; KÖNIG, A.; DE OLIVEIRA, J.F. Dam reservoir eutrophication: A simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation. *Water Research*, v. 32, n. 11, p. 3477-3483, 1998.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco energético nacional 2012 - Ano base 2011: Resultados preliminares*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2012.

FIORUCCI, A.R. & BENEDETTI-FILHO, E. Oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. *Química Nova Interativa*, [S.l.], nov. 2005. Disponível em: <<http://qnint.sbg.org.br/qni/visualizarTema.php?idTema=20>>. Acesso em: 04 abr. 2013.

FRANÇA, M.S. *Análise estatística multivariada dos dados de monitoramento da qualidade de água da Bacia do Alto Iguaçu: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GONZALEZ, N.A.; SWAIN, N.R.; OBREGON, O.; WILLIAMS, G.P.; NELSON, E.J.; EGGETT, D.L. Water quality assessment of small water supply reservoir using statistical and analytical methods. In: HYDROLOGY DAYS 2012, 10., 2013, Colorado. *Proceedings...* Colorado: Colorado State University, 2013. p. 1-12.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAIR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman, 2009.

JARVIE, H.P.; NEAL, C.; WITHERS, P.J. A. Sewage-effluent phosphorus: A greater risk to river eutrophication than agricultural phosphorus? *Science of the Total Environment*, v. 360, p. 246-253, 2006.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, v. 23, p. 187-200, 1958.

KHAN, F.A. & ANSARI, A.A. Eutrophication: An ecological vision. *The Botanical Review*, v. 71, n. 4, p. 449-482, 2005.

LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. *Plano ambiental de conservação e uso do entorno do reservatório da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto – Atualização*. Curitiba: Lactec, 2009. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/EIA_RIMA/UHE_GNB_SEGREDO_PLANO_AMBIENTAL/Plano_Diretor_Foz_do_Areia_Final.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2013.

MAIER, H.M. Ecologia da bacia do rio Jacaré Pepira (47° 55" - 48° 55" W, 22° 30" - 21° 55" S - Brasil): qualidade da água do rio principal. *Ciência e Cultura*, v. 39, n. 2, p. 164-185, 1987.

MAIMUNA, W. & VICTOR, O.O. Prediction of some water quality indices in river Yobe - Nigeria, through annual projections. *Frontiers in Science*, v. 2, n. 4, p. 58-61, 2012.

MIRANDA, T.L.G.; BRASSAC, N.M.; PRESTES, E.C.; MÜLLER, I.I.; PEREIRA, P.S. Estudo dos processos de estratificação em grandes reservatórios da bacia do rio Iguaçu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. *Anais...* Campo Grande: ABRH, 2009. p. 1-12.

NOGUEIRA, M.G.; HENRY, R.; MARICATTO, F.E. Spatial and temporal heterogeneity in the Jurumirim Reservoir, São Paulo, Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 4, n. 3-4, p. 107-120, 1999.

PADIAL, P.R.; POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V. Heterogeneidade espacial e temporal da qualidade da água do reservatório Rio das Pedras (Complexo Billings, São Paulo). *Revista Ambiente & Água*, v. 4, n. 3, p. 35-53, 2009.

PEREIRA, P.S.; VEIGA, B.V.; DZIEDZIC, M.; BRASSAC, N.M. Avaliação da influência da dinâmica de nutrientes no processo de eutrofização do reservatório da UHE Foz do Areia. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 20. 2009, Recife. *Anais...* Recife: CIGRÉ, 2009. p. 1-8.

PLAMONDON, A.P.; RUIZ, R.A.; MORALES, C.F.; GONZALEZ, M.C. Influence of protection forest on soil and water conservation (Oxapampa, Peru). *Forest Ecology and Management*, v. 38, n. 3-4, p. 227-238, 1991.

PRATTE-SANTOS, R. & SIMÕES, L.N. Estudo das variáveis físico-químicas em níveis de estratificação espacial em um ambiente lêntico na Reserva Biológica de Duas Bocas, Cariacica, Espírito Santo. *Natureza on line*, v. 8, n. 2, p. 74-77, 2010.

RANGEL-PERAZA, J.G.; DE ANDA, J.; GONZÁLEZ-FARIAS, F.; ERICKSON, D. Statistical assessment of water quality seasonality in large tropical reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 14, n. 4, p. 315-323, 2009.

SAFFRAN, K.A. & ANDERSON, A.M. *An empirical analysis of water temperature and dissolved oxygen conditions in the Red Deer river*. Alberta: Environmental Monitoring and Evaluation Branch of Alberta Environment, 1997.

SERPE, C.T.A.; SERPE, F.R.; BEM, C.C.; CORDEIRO NETO, A.G.; SANTOS, L.C.; AZEVEDO, J.C.R. Análise da comunidade fitoplanctônica da região fluvial do reservatório de Foz do Areia, Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20. 2013, Bento Gonçalves, *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2013. p. 1-8.

SIECIECHOWICZ, M.S.F.; ARRUDA, N.M.B.; PIRES, G.D.R.M.; SILVEIRA, L.U.D.; MIRANDA, T.L.G.D.; MÜLLER, I.I. Avaliação da qualidade da água do reservatório da UHE Pitangui (PR) através de técnicas estatísticas multivariadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. *Anais...* Maceió: ABRH, 2011. p. 1-14.

SOARES, M.C.S.; MARINHO, M.M.; HUSZAR, V.L.M.; BRANCO, C.W.C.; AZEVEDO, S.M.F.O. The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 13, n. 4, p. 257-269, 2008.

VAROL, M.; GÖKOT, B.; BEKLEYEN, A.; ŞEN, B. Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey. *Catena*, v. 92, p. 11-21, 2012.