

# Avaliação da qualidade da água do Rio Tibagi antes da formação do reservatório da UHE Mauá, por meio de análise fatorial

*Water quality evaluation of Tibagi river before the filling of Mauá HPP reservoir, using factor analysis*

Nicole Machuca Brassac de Arruda<sup>1</sup>, Juliane Knopik<sup>2</sup>, Fabiana Hilgemberg Sottomaior<sup>2</sup>

## RESUMO

Ecossistemas afetados pela formação de reservatórios passam por monitoramentos compulsórios antes, durante e após a construção do empreendimento. Esses programas de monitoramento geram extensas matrizes de dados, que visam atender às condicionantes de licenciamento ambiental bem como à gestão dos recursos hídricos. No intuito de gerar informações que propiciem o gerenciamento de recursos hídricos, o presente trabalho visou avaliar a qualidade de água do Rio Tibagi, localizado no estado do Paraná, antes da construção da usina hidrelétrica de Mauá. Foram utilizados dados de quatro das oito estações do Programa de Monitoramento das Condições Limnológicas do Rio Tibagi, descrito no Plano Básico Ambiental da referida usina. Os dados selecionados compreenderam o período entre dezembro de 2009 e abril de 2012. Após o tratamento dos dados, por meio de análise fatorial, foram avaliados os fatores descritores da qualidade de água, visando à caracterização das águas na região do futuro empreendimento. De forma geral, os fatores retidos demonstraram a influência antrópica no recurso hídrico. Mesmo apresentando pequena variação na composição do fator 1, entre as estações de monitoramento, esse fator foi caracterizado especialmente pelas variáveis fósforo total, sólidos totais e coliformes termotolerantes. A presença da variável coliformes termotolerantes na composição do fator é um indicativo comum de poluição a partir de esgotos domésticos não tratados, sendo o mesmo aplicável ao fósforo, que assim como os sólidos totais, também pode ser advindo do uso inadequado do solo no entorno.

**Palavras-chave:** análise multivariada; ambiente lótico; represamento.

## ABSTRACT

Ecosystems affected by the formation of reservoirs are subjected to compulsory monitoring before, during and after the construction of the power plant. These monitoring programs generate large database that aim to satisfy environmental licensing conditions, as well as the management of water resources. In order to generate information that would facilitate the management of water resources, this study aimed to evaluate the quality of Tibagi river water located in Paraná State, Brazil, before the construction of the Mauá hydroelectric power plant (HPP). Data from four of the eight stations described in the Limnological Conditions Monitoring Program of the Tibagi river described in the HPP's Basic Environmental Plan were analyzed. The selected data comprises the period between December 2009 and April 2012, before the HPP installation. In general, the retained factors demonstrated the anthropogenic influence on the water resources. Even with a small variation in the composition of the factor 1 in the monitored stations, this factor was especially characterized by the variables: total phosphorus, total solids, and fecal coliforms. The presence of fecal coliforms in the factor's composition is a common indicator of pollution from untreated domestic sewage. The same applies to total phosphorus, which, as well as the total solids, can also be related to the inappropriate land use in the vicinity.

**Keywords:** multivariate analysis; lotic environment; damming.

<sup>1</sup>Doutora em Engenharia Florestal - Conservação da Natureza pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professora titular da Universidade Positivo (UP) e pesquisadora do Instituto LACTEC - Curitiba (PR), Brasil.

<sup>2</sup>Bióloga pela UP - Curitiba (PR), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Nicole Machuca Brassac de Arruda - Rodovia BR-116, Km 98, 8.813 - Jardim das Américas - 81531-980 - Curitiba (PR), Brasil -

E-mail: n.brassac@lactec.org.br

**Recebido:** 09/05/16 - **Aceito:** 05/10/16 - **Reg. ABES:** 163661

## INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira está fortemente embasada no uso da hidreletricidade (EPE, 2012). Usinas hidrelétricas (UHE) estão sujeitas ao processo de licenciamento ambiental, sendo que as condicionantes desse processo incluem o monitoramento, em longo prazo, da qualidade das águas afetadas pela formação dos reservatórios (BRASIL, 2004) antes, durante e após a formação do lago.

A aplicação de dados como esses para a gestão do recurso hídrico exige, além de um conhecimento avançado do avaliador, a aplicação de técnicas específicas para o estudo de extensas matrizes. A dificuldade do estudo de conjuntos de dados, como os citados, relaciona-se ao fato de que o procedimento de interpretação deve considerar que esses são coletados em diferentes estações de monitoramento, em temporalidades diferentes e a partir do diagnóstico de variáveis de ordens e grandezas distintas (FRANÇA, 2009).

Entre as ferramentas aplicáveis aos dados desse segmento, destaca-se a análise multivariada. Entre as diversas ferramentas de análise multivariada, a análise fatorial (AF) tem se mostrado relevante na interpretação de dados sobre a qualidade de água (HAASE & POSSOLI, 1993; TOLEDO & NICOLELLA, 2002; ALAM *et al.*, 2010; GUEDES *et al.*, 2012). Segundo Mazlum, Ozer e Mazlum (1999) e Sieciechowicz *et al.* (2011), a AF pode ser aplicada no intuito de simplificar matrizes complexas, cujos dados são agrupados de acordo com suas correlações, considerando que as variáveis dentro de um grupo são bastante correlacionadas entre si, porém, pouco correlacionadas com as variáveis pertencentes a outro grupo. Tal situação faz com que um grande conjunto de dados se torne um número relativamente pequeno de variáveis, sem que haja perda significativa de informações.

No Brasil, estudos como os de Andrade *et al.* (2007) e Guedes *et al.* (2012) utilizaram AF para a análise de dados sobre a qualidade da água em rios. Andrade *et al.* (2007) objetivaram a identificação da origem dos fatores que determinam a qualidade das águas no Rio Acaraú, no estado do Ceará. Já Guedes *et al.* (2012) tiveram como objetivo avaliar a qualidade da água e identificar os grupos de poluição presentes no Rio Pomba, no estado de Minas Gerais. No estado do Paraná, no Rio Tibagi, há também o trabalho de Zimmermann, Guimarães e Peralta-Zamora (2008), em que foi aplicada a análise de componentes principais no intuito de avaliar alterações, causadas por atividades urbanas e industriais, na qualidade da água do Rio Tibagi.

Outros estudos em rios de relevância mundial também utilizaram a AF como ferramenta de interpretação de dados de qualidade de água, como o realizado no Rio Tigre, no Iraque, por Al-Rawi e Shihab (2005); no Rio Sakarya, na Turquia, por Mazlum, Ozer e Mazlum (1999); no Rio Songhua, na China, por Yu *et al.* (2003) e no Rio Gomti, na Índia, por Singh *et al.* (2004).

O objetivo do presente estudo foi avaliar a qualidade da água do Rio Tibagi, observando a aplicabilidade da análise fatorial no tratamento

dos dados advindos do monitoramento sistemático do referido rio, em período anterior ao enchimento do reservatório da UHE Mauá.

## METODOLOGIA

### Área de Estudo

As amostragens foram realizadas no terço médio do Rio Tibagi, região da construção da UHE Mauá, na região centro-leste do estado do Paraná. Para a formação do reservatório, o Rio Tibagi foi barrado em tal trecho, afetando áreas dos municípios paranaenses de Telêmaco Borba e Ortigueira (LACTEC, 2011).

Dados relativos ao período anterior ao da construção das estruturas hidráulicas da UHE (barragem e casa de força) foram advindos do programa de monitoramento do Plano Básico Ambiental (PBA) da referida usina. Foram selecionadas para avaliação, quatro estações de amostragem, instaladas no Rio Tibagi, com coletas realizadas entre dezembro de 2009 e abril de 2012. Essas coletas ocorreram mensalmente nos 13 primeiros meses e trimestralmente entre março de 2011 e abril de 2012, totalizando 18 eventos de amostragem referentes ao período anterior à formação do lago (fase rio).

As quatro estações de monitoramento selecionadas encontram-se descritas no Quadro 1 e ilustradas na Figura 1.

A estação MA\_01 localiza-se no leito do Rio Tibagi, a montante do município de Telêmaco Borba. De acordo com Lactec (2011), o rio apresenta, nesse trecho, fundo rochoso. Também nessa localidade existem bancos de areia, sendo o local alterado pela atividade de extração do referido recurso. Ainda assim, as margens do rio apresentam mata ciliar preservada, com exceção de locais onde foram construídos acessos ao rio.

A estação MA\_02 está localizada a jusante do município de Telêmaco Borba. O fundo do rio é formado também por rochas e lajes, sendo que na margem esquerda há a presença de bancos de areia fina. A região recebe influência da presença de indústria de papel e celulose e de uma estação de tratamento de esgoto (LACTEC, 2011).

**Quadro 1** - Localização das estações de monitoramento de qualidade de água selecionadas.

Estação	Localização	Coordenadas UTM	
		E	N
MA_01	Rio Tibagi, a montante do município de Telêmaco Borba	541077	7305917
MA_02	Rio Tibagi, a jusante do município de Telêmaco Borba	537282	7311818
MA_03	Rio Tibagi, próximo ao local de construção da barragem	530754	7338675
MA_04	Rio Tibagi, a jusante do local de instalação da casa de força	531106	7341380

Fonte: LACTEC (2011).

A estação MA\_03 encontra-se a montante da região de construção da barragem da UHE Mauá, também no Rio Tibagi. Na região, o fundo do rio é lodoso, sendo que as margens apresentam alterações relacionadas à instalação do canteiro de obras para a construção das estruturas hidráulicas da usina (LACTEC, 2011).

A estação MA\_04 encontra-se a jusante do barramento e do local de instalação da casa de força da usina. Nessa área, o leito do rio é inteiramente rochoso. As margens são preservadas, com exceção das regiões de canteiro de obras para a construção da casa de força (LACTEC, 2011).

A partir de dados do programa de monitoramento limnológico da fase rio da UHE Mauá (LACTEC, 2011), 12 variáveis foram selecionadas para avaliação da qualidade da água em cada estação de monitoramento, a saber: transparência da água (m); temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ); oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ); pH; condutividade ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ); fósforo total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ); nitrogênio total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ); sólidos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ); turbidez (NTU); coliformes termotolerantes (NMP.100 mL $^{-1}$ ); demanda bioquímica de oxigênio ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) e clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). A amostragem dessas variáveis de qualidade de água se deu pela coleta de amostras tipo simples, com auxílio de garrafa de Van Dorn. Os ensaios físico-químicos e microbiológicos foram realizados com base na metodologia usual para cada variável (APHA, 2005).

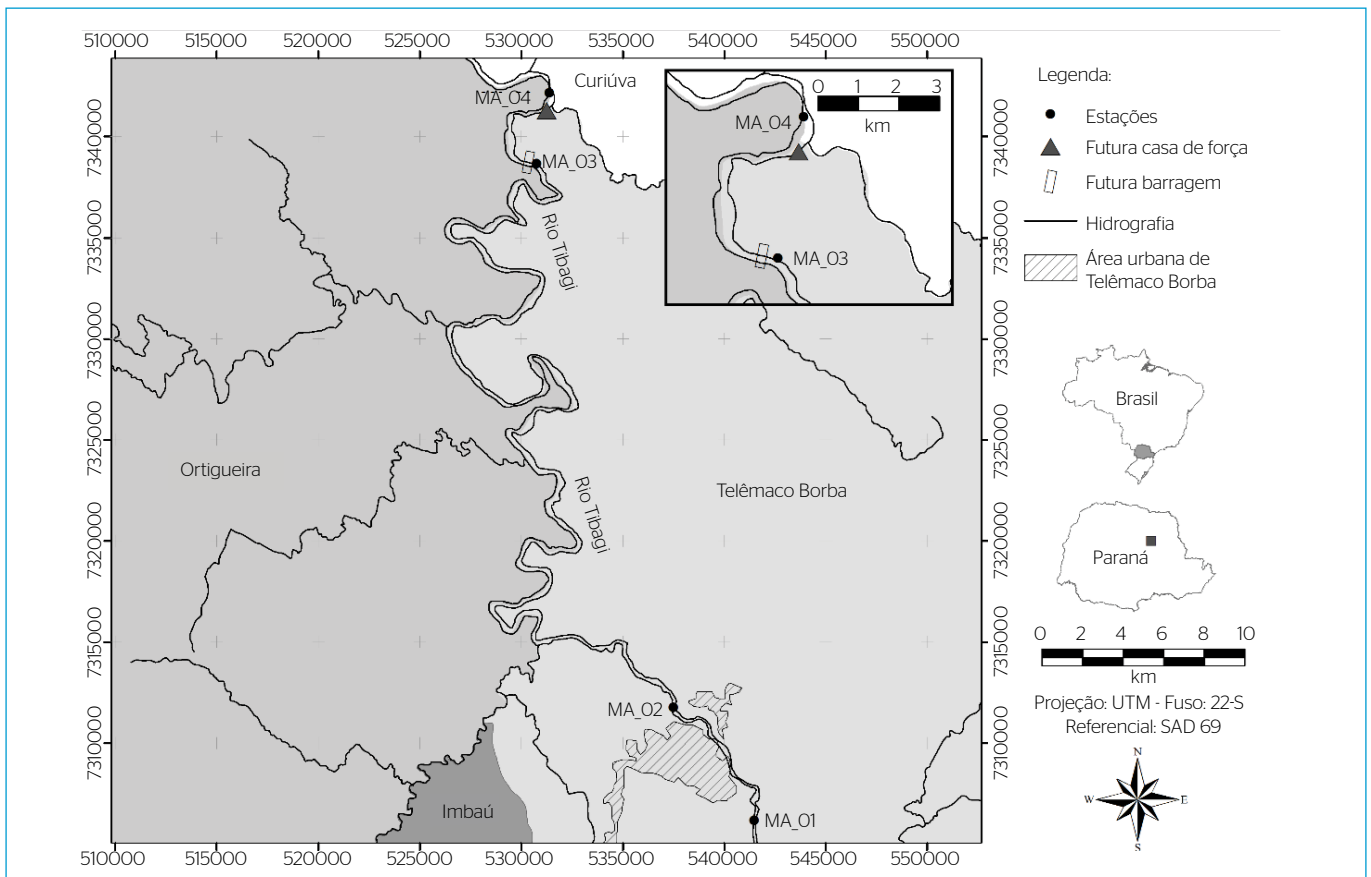
## Análise dos Dados

Os dados sobre a qualidade da água referentes às estações de monitoramento foram avaliados por meio de AF, pelo método de componentes principais, seguindo os procedimentos adotados por França (2009) e Arruda (2014). A fim de ilustrar o comportamento das variáveis, foi realizada estatística descritiva com os cálculos de média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão.

Previamente à realização da AF, foram verificadas as condições para sua aplicação: a distribuição normal multivariada dos dados, a aplicação do teste de Bartlett e o cálculo do índice *measure of sampling adequacy* (MSA) (HAIR *et al.*, 2009). De acordo com França (2009) e Arruda (2014), um pré-requisito importante para AF é que o número de observações seja minimamente maior do que o número de variáveis, para que as soluções geradas a partir dos modelos estatísticos sejam estáveis.

A avaliação da normalidade multivariada dos dados foi verificada por meio de funções programadas no *software* Matlab. A avaliação dessa condição é visual, a partir da análise do gráfico de *scatter plot* gerado, que deve apresentar uma reta ou uma reta aproximada (FRANÇA, 2009).

Após essa etapa, foi avaliada a medida de adequabilidade da amostra (MSA) de Kayser-Meyer-Olkin (KMO), também com o auxílio de função programada no *software* Matlab (FRANÇA, 2009). De acordo



**Figura 1** - Localização geográfica das quatro estações selecionadas de monitoramento da qualidade da água.

com Arruda (2014), por meio da medida de adequacidade de KMO, é possível avaliar a variância considerada comum a todas as variáveis em questão e, assim, atribuir um fator comum a esse grupo. Com base no índice MSA, que pode variar de 0 a 1, considera-se que a AF é adequada para avaliação dos dados quando os valores estão entre 0,5 e 1,0. Assim, valores menores do que 0,5 indicam que a AF pode não ser a melhor ferramenta para avaliação de tal conjunto de dados (FRANÇA, 2009).

Na sequência, o teste de esfericidade de Bartlett foi realizado para avaliar a hipótese de não relação entre as variáveis, ou seja, que a matriz de correlação seja igual a zero. Para ser considerado adequado, o resultado do teste de esfericidade de Bartlett deve apresentar p-valor inferior a 0,05 (ARRUDA, 2014).

Após a verificação das condições para aplicação da AF, essa foi procedida com auxílio do *software* Statistica. As comunalidades resultantes da AF foram avaliadas, e as variáveis que apresentaram comunalidades com valor inferior a 0,7 foram removidas. Após essa etapa, o novo conjunto de dados de cada estação de amostragem foi reavaliado para atendimento das condicionantes da AF, conforme descrito anteriormente (FRANÇA, 2009; ARRUDA, 2014).

Realizada essa checagem, a AF foi novamente executada, pelo método de componentes principais. Para a seleção de fatores foi utilizado o método de Kaiser (fatores com autovalores iguais ou superiores a 1). Para a caracterização dos fatores, as variáveis de qualidade da água foram selecionadas de acordo com seus pesos absolutos. Foram consideradas descritoras dos fatores, as variáveis que apresentaram pesos absolutos superiores a 0,7 (FRANÇA, 2009).

Por fim, os fatores retidos para cada estação foram comparados, a fim de evidenciar possíveis diferenças espaciais na qualidade da água entre as estações de monitoramento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz de dados brutos de cada estação foi composta por 12 colunas (variáveis) e 18 linhas (observações), atendendo à condição de número de observações maior ao número de variáveis.

No intuito de ilustrar o comportamento das variáveis, nas Tabelas 1 a 4, encontra-se a estatística descritiva das variáveis estudadas, por estação de monitoramento.

Com base nos dados brutos iniciais de cada estação, foi realizada a análise da normalidade multivariada dos dados, a partir da avaliação de gráficos de *scatter plot*. Constatou-se que os conjuntos de dados das quatro estações de amostragem apresentaram distribuição normal multivariada.

Os resultados iniciais das medidas de adequacidade e esfericidade para as estações de monitoramento estão descritos na Tabela 5.

Conforme pode ser observado, o p-valor obtido para todas as estações de monitoramento foi inferior a 0,05; o que comprova, de acordo

com o teste de esfericidade de Bartlett, que os dados estão ajustados para o tratamento por AF.

A medida de adequacidade de KMO tem seu resultado representado pelo índice MSA. Para a medida de adequacidade da amostra (MSA), com exceção do MSA da estação MA\_02, todas as demais apresentaram resultados inferiores a 0,5. Quando o MSA apresenta valores inferiores a 0,5, vários autores, como Hair *et al.* (2009) e França (2009), sugerem que se faça o estudo das comunalidades individuais. Após a avaliação das comunalidades das variáveis, por estação de amostragem, foram removidas da análise as variáveis com comunalidades inferiores a 0,7 (KOOTSTRA, 2004; FRANÇA, 2009). No Quadro 2 observam-se as variáveis removidas em cada estação de monitoramento.

Após a remoção das variáveis, o novo conjunto de dados foi definido e novamente avaliado visando ao atendimento das condições iniciais da AF.

Foram gerados novos gráficos de *scatter plot* para verificar a normalidade multivariada do novo conjunto. Os resultados dos gráficos de *scatter plot* demonstraram novamente que as amostras apresentavam distribuição normal multivariada. Como exemplo dos dados obtidos, o resultado gráfico referente à estação MA\_04 está indicado na Figura 2.

O teste de Bartlett e o índice KMO foram novamente calculados, conforme apresentado na Tabela 6.

Como pode ser observado, após a remoção de variáveis com comunalidades consideradas baixas, o valor do índice MSA melhorou para as estações MA\_01 e MA\_03, sendo que não houve alteração em MA\_02, pois não foram removidas variáveis (todas as variáveis originais apresentaram comunalidades superiores a 0,7). No entanto, na estação MA\_04, o valor do índice mostrou-se ainda mais baixo do que na avaliação inicial. Dessa forma, com base nos preceitos necessários para a avaliação fatorial dos dados, o conjunto MA\_04 foi removido da análise, pois a análise fatorial mostrou-se inadequada para sua avaliação.

Após essa análise inicial, a AF propriamente dita foi executada. Na Tabela 7, encontram-se os resultados resumidos da AF das três estações de monitoramento, cujos dados foram tratados por meio dessa metodologia. As variáveis descritoras de cada fator foram selecionadas por apresentarem pesos absolutos iguais ou superiores a 0,7.

A estação de monitoramento MA\_01, localizada a montante da cidade de Telêmaco Borba, foi caracterizada por três fatores. Os fatores retidos foram responsáveis por 78,6% da variância total da amostra.

O fator 1 para a estação de monitoramento MA\_01 foi descrito pelas variáveis transparência, fósforo total, sólidos totais, turbidez e coliformes termotolerantes, e correspondeu a 44,4% da variância total da amostra, sendo considerado um fator relativo ao uso do solo da bacia. O sentido negativo de transparência expõe a relação inversa dessa variável com as que representam o aporte de partículas sólidas ao corpo hídrico e consequente diminuição da entrada de luz na coluna d'água. A presença da variável coliformes termotolerantes na composição do fator

**Tabela 1 - Resultados da estatística descritiva das variáveis estudadas da estação MA\_01.**

Medida	Transparência da água (m)	Temperatura da água (°C)	Oxigênio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	Condutividade elétrica (µS.cm <sup>-1</sup> )	Fósforo total (mg.L <sup>-1</sup> )	Nitrogênio total (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)	Coliformes termotolerantes (NMP.100 mL <sup>-1</sup> )	Demanda bioquímica de oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	Clorofila-a (µg.L <sup>-1</sup> )
Média	0,44	20,18	9,90	7,19	39,94	0,06	1,63	70,11	26,28	555,91	1,63	4,07
Mediana	0,38	20,79	10,23	7,20	38,50	0,05	1,40	64,00	20,00	210,00	1,00	1,57
Mínimo	0,15	13,11	4,63	6,80	33,00	0,02	0,70	38,00	9,00	3,00	1,00	0,65
Máximo	1,00	24,98	13,08	7,60	53,00	0,16	3,00	125,00	73,00	3300,00	5,61	26,42
Desvio padrão	0,21	3,23	2,12	0,20	5,97	0,04	0,64	24,11	18,23	982,40	1,48	7,47

**Tabela 2 - Resultados da estatística descritiva das variáveis estudadas da estação MA\_02.**

Medida	Transparência da água (m)	Temperatura da água (°C)	Oxigênio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	Condutividade elétrica (µS.cm <sup>-1</sup> )	Fósforo total (mg.L <sup>-1</sup> )	Nitrogênio total (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)	Coliformes termotolerantes (NMP.100 mL <sup>-1</sup> )	Demanda bioquímica de oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	Clorofila-a (µg.L <sup>-1</sup> )
Média	0,39	20,51	10,14	7,24	52,61	0,09	1,78	94,78	34,33	8208,89	2,38	4,60
Mediana	0,35	21,27	10,17	7,20	50,50	0,08	1,60	76,50	28,00	3850,00	1,45	1,61
Mínimo	0,10	13,34	6,80	6,80	38,00	0,03	0,80	53,00	7,00	490,00	1,00	0,58
Máximo	0,95	24,61	12,39	7,70	81,00	0,41	3,10	305,00	102,00	63000,00	7,50	32,40
Desvio padrão	0,20	3,25	1,48	0,22	12,69	0,09	0,73	58,49	28,63	14267,92	1,91	8,89

**Tabela 3 - Resultados da estatística descritiva das variáveis estudadas da estação MA\_03.**

Medida	Transparência da água (m)	Temperatura da água (°C)	Oxigênio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	Condutividade elétrica (µS.cm <sup>-1</sup> )	Fósforo total (mg.L <sup>-1</sup> )	Nitrogênio total (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)	Coliformes termotolerantes (NMP.100 mL <sup>-1</sup> )	Demanda bioquímica de oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	Clorofila-a (µg.L <sup>-1</sup> )
Média	0,36	20,79	9,82	7,33	52,00	0,07	1,54	75,89	29,28	401,54	1,77	6,67
Mediana	0,35	21,47	10,29	7,30	50,00	0,06	1,20	75,00	25,00	255,00	1,05	1,72
Mínimo	0,15	14,00	7,12	7,00	38,00	0,03	1,00	29,00	6,00	9,80	1,00	0,67
Máximo	0,80	26,00	11,91	8,00	93,00	0,13	3,90	115,00	73,00	1100,00	5,37	51,80
Desvio padrão	0,16	3,28	3,21	0,29	13,73	0,03	0,74	19,46	18,22	364,70	1,28	14,76

**Tabela 4 - Resultado da análise descritiva das variáveis estudadas da estação MA\_04.**

Medida	Transparência da água (m)	Temperatura da água (°C)	Oxigênio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	Condutividade elétrica (µS.cm <sup>-1</sup> )	Fósforo total (mg.L <sup>-1</sup> )	Nitrogênio total (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)	Coliformes termotolerantes (NMP.100 mL <sup>-1</sup> )	Demanda bioquímica de oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	Clorofila-a (µg.L <sup>-1</sup> )
Média	0,40	20,30	10,51	7,48	55,83	0,07	1,50	88,83	31,61	652,59	1,97	5,67
Mediana	0,40	21,56	10,19	7,60	51,00	0,06	1,20	76,50	23,50	175,00	1,00	1,34
Mínimo	0,15	11,46	5,89	6,90	35,00	0,02	0,60	58,00	6,00	5,10	1,00	0,27
Máximo	0,85	24,90	15,51	8,10	115,00	0,19	3,40	196,00	102,00	4700,00	5,87	57,90
Desvio padrão	0,20	3,56	4,22	0,35	19,51	0,04	0,87	35,47	25,83	1216,88	1,68	13,94

é um indicativo comum de poluição a partir de esgotos domésticos não tratados ou da presença de animais de sangue quente na região. Muito embora a região não apresente aglomerados populacionais ou

**Tabela 5** – Resultados iniciais dos índices de adequacidade e esfericidade para cada estação de monitoramento de qualidade da água.

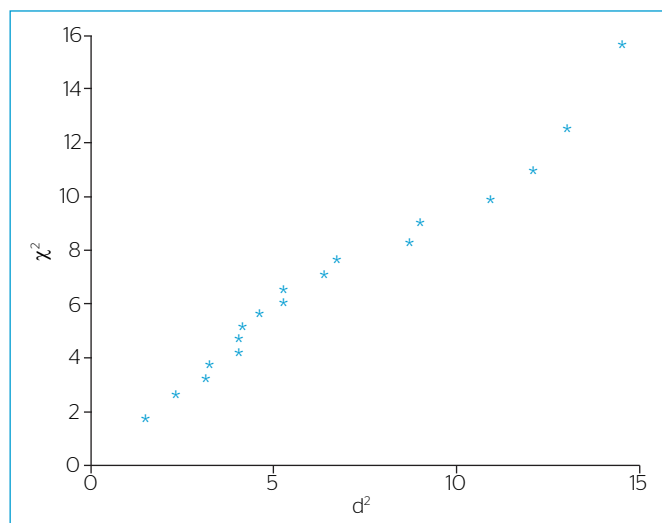
Estação	p-valor	MSA
MA_01	0,000	0,465
MA_02	0,000	0,511
MA_03	0,000	0,405
MA_04	0,000	0,373

MSA: medida de adequacidade da amostra.

**Quadro 2** – Variáveis removidas do conjunto de dados de cada estação de monitoramento, após a avaliação das comunalidades.

Estação	Variável removida
MA_01	NT e temperatura da água
MA_02	Nenhuma variável foi removida
MA_03	NT, OD e temperatura da água
MA_04	NT, coliformes termotolerantes, DBO,pH e temperatura da água.

NT: nitrogênio total ; OD: oxigênio dissolvido; DBO: demanda bioquímica de oxigênio.



**Figura 2** – Gráfico *scatter plot* referente à normalidade multivariada da estação MA\_04.

**Tabela 6** – Novo resultado dos índices de adequacidade e esfericidade para as estações de monitoramento da qualidade da água, após remoção de variáveis.

Estação	p-valor	MSA
MA_01	0,000	0,556
MA_02	0,000	0,511
MA_03	0,009	0,595
MA_04	0,000	0,294

MSA: medida de adequacidade da amostra.

criação de animais nas proximidades, pode-se supor que, de acordo com as variáveis descritoras desse fator, o rio apresenta uma condição caracterizada a aportes advindos de regiões a montante, onde registram-se centros urbanos e um conjunto de usos diversificados do solo, fortemente baseados em agricultura intensiva. Ainda em função do uso do solo, a variável fósforo total na caracterização do fator pode estar relacionada a cargas agrícolas e pecuárias em diversas regiões ao longo da bacia, de acordo com informações dispostas no Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (SEMA, 2009).

O fator 2 foi descrito pelas variáveis condutividade e clorofila-a, e correspondeu a 18,5% da variância total da amostra. A partir da análise dos dados brutos, observou-se que, nos meses nos quais foram registrados valores mais elevados de clorofila-a, também houve o registro de valores mais elevados de condutividade, demonstrando que as duas variáveis agiram no mesmo sentido. Autores como Costa (2003) e Chellappa, Câmara e Rocha (2009) indicam correlação positiva entre as variáveis fitoplâncton (em especial cianobactérias) com a condutividade. A concentração de clorofila-a é medida da biomassa da comunidade fitoplanctônica. Tais autores relacionam as variáveis em função da degradação da biomassa fitoplanctônica, que proporcionaria elevações na condutividade elétrica da água.

O fator 3 foi caracterizado pelas variáveis pH e demanda bioquímica de oxigênio e representou 15,7% da variância total da amostra, sendo que essa associação ainda não está clara.

Com relação à estação de monitoramento MA\_02, localizada a jusante do município de Telêmaco Borba, quatro fatores foram retidos, os quais totalizaram 86,5% da variabilidade da amostra.

Da mesma forma que no fator 1 da estação MA\_01, o fator 1 da estação MA\_02 também foi descrito pelas variáveis fósforo total, sólidos totais e coliformes termotolerantes, somadas às variáveis demanda bioquímica de oxigênio e OD, sendo essa última em sentido oposto às demais. O fator 1 descreveu 32,0% da variabilidade da amostra.

Comparando as variáveis representativas do fator 1 com as características do entorno da estação MA\_02, pode-se supor que o fator descreva justamente a influência antropogênica na qualidade de água pela proximidade da estação de monitoramento, de centro urbano, onde o recurso hídrico é influenciado por aportes de efluentes domésticos e industriais. Com relação à presença de fósforo total e coliformes termotolerantes, França (2009) afirma que o fósforo aparece em elevadas concentrações na água, principalmente em decorrência da descarga de esgotos sanitários, que contém matéria fecal rica em proteínas.

Assim, na estação MA\_02, observa-se que variáveis que indicam degradação da qualidade de água (fósforo total, sólidos totais, demanda bioquímica de oxigênio e coliformes termotolerantes), quando em altas concentrações, apresentaram-se em sentido inverso à variável que em concentração elevada é indicadora de depuração do sistema hídrico e de uma melhor qualidade de água (OD).

O fator 2 foi caracterizado pelas variáveis condutividade, clorofila-a e pH, que representaram 23,5% da variância total da amostra. Segundo Mercante *et al.* (2011), um pH mais alcalino sucede pela remoção de dióxido de carbono da água por processos fotossintéticos, diretamente relacionados à produção primária. Com base nos dados brutos da estação MA\_02, nos meses onde os valores de clorofila-a foram mais elevados, os valores de pH também se mostraram elevados, bem como os valores de condutividade. As variáveis condutividade e pH podem ser representativas do processo de oxidação da matéria orgânica na água, por estarem associadas ao aumento da concentração de íons dissolvidos (SALES, 2009). Ademais, variações nas concentrações dos íons H<sup>+</sup> ou OH<sup>-</sup>, que têm sua concentração influenciada pela demanda de CO<sub>2</sub> para o processo de fotossíntese, podem alterar a condutividade (ARRUDA; NIZZI; MIRANDA, 2015).

No fator 3, representativo de 18,5% da variância da amostra, as variáveis descritoras foram a transparência da água, a turbidez e a temperatura, sendo a primeira em sentido inverso às demais. Em situações de turbidez elevada, há o impedimento ou a redução da entrada de luz na coluna d'água, reduzindo a profundidade média da medida do disco de Secchi (medida de transparência da água). A presença da temperatura da água no mesmo fator pode representar a sazonalidade desses eventos.

O fator 4, descrito isoladamente por NT, representou 12,5% da variabilidade total da amostra. Apesar da presença de nitrogênio total no fator poder se relacionar a formas mais oxidadas desse nutriente, descrevendo assim fontes de poluição localizadas mais a montante, acredita-se que o fator descreve fontes pontuais de poluição, pela proximidade da estação de monitoramento a zonas urbana e industrial. Os esgotos sanitários geralmente contribuem no lançamento do nitrogênio orgânico, devido à presença de proteínas e nitrogênio amoniacal, resultado da hidrólise da ureia (CETESB, 2012).

Na estação MA\_03, localizada na região de construção do eixo da futura barragem, três fatores caracterizaram a qualidade das águas da estação, sendo que, em conjunto, corresponderam a 80,2% da variância total da amostra.

É importante ressaltar que durante as coletas realizadas no Rio Tibagi, esse já estava em processo de modificação para a construção do empreendimento UHE Mauá, em especial na região da estação MA\_03 (proximidades do barramento), bem como MA\_04, proximidades da casa de força (previamente descartada da análise fatorial). Sendo assim, algumas atividades como formação do canteiro de obras, desvio do rio, circulação de maquinários, remoção de vegetação e circulação de pessoas próximas às estações de monitoramento podem ter influenciado na formação de alguns fatores.

**Tabela 7 - Resultados resumidos da análise fatorial de todas as estações de monitoramento.**

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Variância acumulada
MA_01	Transparência da água (-) Fósforo total (+) Sólidos totais (+) Turbidez (+) Coliformes termotolerantes (+)	Condutividade elétrica (+) Clorofila-a (+)	pH (+) Demanda bioquímica de oxigênio (+)	-	78,6%
Variância do fator	44,4%	18,5%	15,7%	-	
MA_02	Oxigênio dissolvido (-) Fósforo total (+) Sólidos totais (+) Demanda bioquímica de oxigênio (+) Coliformes termotolerantes (+)	Condutividade elétrica (+) Clorofila-a (+) pH (+)	Transparência da água (-) Temperatura (+) Turbidez (+)	Nitrogênio total (+)	86,5%
Variância do fator	32,0%	23,5%	18,5%	12,5%	
MA_03	Transparência da água (-) Fósforo total (+) Sólidos totais (+) Turbidez (+) Coliformes termotolerantes (+)	Condutividade elétrica (+) Clorofila-a (+)	pH (+) Demanda bioquímica de oxigênio (+)	-	80,2%
Variância do fator	40,0%	23,2%	17,8%	-	

As variáveis descritoras dos fatores na estação MA\_03 foram idênticas às da estação MA\_01. Dessa forma, o fator 1, conforme o que foi observado em relação aos dados provenientes da estação MA\_01, foi descrito pelas variáveis de transparência, fósforo total, sólidos totais, turbidez e coliformes termotolerantes, e representou 40,0% da variabilidade de amostra. Aqui, deve-se considerar as condições das águas a montante, que sofrem influência de centros urbanos. Nesse caso, porém, é possível que, em especial em períodos de chuva, haja o carreamento ao corpo hídrico de contaminantes provenientes de alterações temporárias no entorno, relacionadas à construção do empreendimento.

Assim como no fator 2 da estação MA\_01, o fator 2 da MA\_03 foi descrito pelas variáveis condutividade e clorofila-a, e representou 23,2% da variância total da amostra. Os maiores níveis de clorofila-a foram encontrados nos mesmos meses que a condutividade esteve com valores elevados, de acordo com os dados brutos.

O fator 3, que representou 17,0% da variabilidade total da amostra, foi caracterizado pelas variáveis pH e demanda bioquímica de oxigênio.

## CONCLUSÕES

Em relação à AF, três das quatro estações de monitoramento foram passíveis de tratamento de seus dados de qualidade de água por meio de AF. A análise dos dados da estação MA\_04 demonstrou que o conjunto não estava adequado ao tratamento fatorial e, dessa forma, seu estudo foi descartado após a avaliação inicial.

As demais estações tiveram seus dados tratados por meio de AF e o número de fatores retidos variou de 3 a 4 por estação de monitoramento, sendo a maior variância acumulada observada na estação MA\_02, com 86,5%; e a menor, na estação MA\_01, com 78,6%.

Em todas as estações, o fator 1 demonstrou a influência das ações antrópicas na qualidade da água, sendo composto em maior parte por fósforo total, sólidos totais e coliformes termotolerantes. Em função desse resultado, supõe-se que, nos trechos analisados, a água encontrava-se impactada, não somente pela presença de centros urbanos, mas também possivelmente em função de aportes de montante.

Com relação ao fator 2, todas as estações apresentaram as variáveis condutividade e clorofila-a como descritoras do fator, muito embora a estação MA\_02 tenha apresentado também a variável pH atuando no mesmo sentido de ambas as variáveis supracitadas. A associação dessas variáveis representa, normalmente, a produtividade primária local, associada à decomposição da matéria orgânica.

Os fatores 3 e 4 mostraram menor relevância na caracterização da qualidade do Rio Tibagi nos trechos estudados.

A aplicação da AF para este estudo mostrou eficácia no intuito de reduzir o número de variáveis analisadas, compreender as relações entre elas e identificar quais variáveis caracterizaram a qualidade das águas do Rio Tibagi.

O presente estudo demonstra que dados advindos de programas de monitoramento compulsório podem contribuir para o entendimento da dinâmica das bacias hidrográficas, visando à gestão de recursos hídricos e contribuindo para estudos sobre as alterações ecossistêmicas que ocorrem a partir desse tipo de empreendimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Consórcio Energético Cruzeiro do Sul (CECS) e à Companhia Paranaense de Energia (COPEL) pela cessão dos dados utilizados no presente estudo.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, M.J.B.; AHMED, A.M.; ALI, E.; AHMED, A.A.M. (2010) Evaluation of surface water quality of Surma river using factor analysis. *In: International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh*, 10., Kitakyushu. *Proceedings...* Kitakyushu: BENJapan. p. 186-188.
- AL-RAWI, S.M. & SHIHAB, A.S. (2005) Application of factor analysis as a tool for water quality management of Tigris river within Mosul city. *Rafidain Journal of Science*, v. 16, n. 1, p. 56-64.
- ANDRADE, E.M.D.; ARAÚJO, L.D.F.P.; ROSA, M.F.; DISNEY, W.; ALVES, A.B. (2007) Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. *Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 3, p. 683-690.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. (2005) *Standard methods for the examination of water and wastewaters*. 21 ed. Washington: American Public Health Association.
- ARRUDA, N.M.B. (2014) *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*. 229f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- ARRUDA, N.M.B.; NIZZI, N.E.; MIRANDA, T.L.G. (2015) Análise multivariada na avaliação da qualidade de água do reservatório de Foz do Areia, Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 37, p. 26-37.



- BRASIL. (2004) Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) n.º 37, de 26 de março de 2004. *Diário Oficial da União*, Brasília.
- CHELLAPPA, N.T.; CÂMARA, F.R.A.; ROCHA, O. (2009) Phytoplankton community: indicator of water quality in the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir and Pataxó Channel, Rio Grande do Norte, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, v. 69, n. 2, p. 241-251.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2012) *Histórico da legislação hídrica no Brasil*. Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/informacoes-basicas/8-2/historico-da-legislacao-hidrica-no-brasil/>>. Acesso em: 13 maio 2014.
- COSTA, I.A.S. (2003) *Dinâmica de populações de cianobactérias em reservatório eutrofizado no semi-árido nordestino brasileiro*. 232f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. (2012) *Balço energético nacional 2012: ano base 2011: Resultados preliminares*. Rio de Janeiro: EPE. 51p.
- FRANÇA, M.S. (2009) *Análise estatística multivariada dos dados de monitoramento de qualidade de água da bacia do Alto Iguçu: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos*. Curitiba-PR. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- GUEDES, H.A.S.; DEMETRIUS, A.; ABRAHÃO, C.; RIBEIRO, A.; MATOS, J.S. (2012) Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 16, n. 5, p. 558-563.
- HAASE, J. & POSSOLI, S. (1993) Estudo da utilização da técnica de análise fatorial na elaboração de um índice de qualidade de água: comparação entre dois regimes hidrológicos diferentes, RS. *Acta Limnologica Brasiliensis*, v. 6, p. 245-255.
- HAIR, J.F.; TATHAM, R.L.; ANDERSON, R.E.; BLACK, W. (2009) *Análise multivariada de dados*. São Paulo: Artmed. 593p.
- KOOTSTRA, G.J. (2004) *Exploratory factor analysis: theory and application*. Disponível em: <<https://www.let.rug.nl/herbonne/teach/rema-stats-meth-seminar/Factor-Analysis-Kootstra-04.PDF>>. Acesso em: 25 set. 2009.
- LACTEC. (2011) Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. *Diagnóstico das condições limnológicas e da qualidade da água superficial e subterrânea na região do empreendimento UHE Mauá - Relatório Fase Rio*. Curitiba: Lactec. 198p. Disponível em: <[http://consorciocruzeirodosul.com.br/upload/tiny\\_mce/arquivos/meio\\_ambiente/Qualidade\\_da\\_agua/Relatorio\\_FINAL\\_Fase\\_rio\\_-\\_UHE\\_Maua.pdf](http://consorciocruzeirodosul.com.br/upload/tiny_mce/arquivos/meio_ambiente/Qualidade_da_agua/Relatorio_FINAL_Fase_rio_-_UHE_Maua.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2012.
- MAZLUM, N.; OZER, A.; MAZLUM, S. (1999) Interpretation of water quality data by principal components analysis. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, v. 23, n. 1, p. 19-26.
- MERCANTE, C.T.J.; CARMO, C.F.; RODRIGUES, C.J.; OSTI, J.A. S.; MAINARDES PINTO, C.S.; VAZ-DOS-SANTOS, A.M.; DI GENARO, A.C. (2011) Limnologia de viveiro de criação de tilápias do Nilo: avaliação diurna visando boas práticas de manejo. *Boletim do Instituto de Pesca*, v. 37, n. 1, p. 73-84.
- SALES, J.W.F. (2009) Indicadores de qualidade de água utilizando técnicas de análise multivariada. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18., São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABRH. p. 37-48.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEMA. (2009) *Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi*. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=119>>. Acesso em: 1.º nov. 2014.
- SIECIECHOWICZ, M.S.; ARRUDA, N.M.B.; PIRES, G.D.R.M.; SILVEIRA, L.U.; MIRANDA, T.L.G.; MULLER, I.I. (2011) Avaliação da qualidade da água do reservatório da UHE Pitangui (PR) através de técnicas estatísticas multivariadas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., Maceió. *Anais...* Maceió: ABRH. p. 1-14.
- SINGH, K.P.; MALIK, A.; MOHAN, D.; SINHA, S. (2004) Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) - a case study. *Water Research*, v. 38, n. 18, p. 3980-3992.
- TOLEDO, L.G. & NICOLELLA, G. (2002) Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agrícola*, v. 59, n. 1, p. 181-186.
- YU, S.; SHANG, J.; ZHAO, J.; GUO, H. (2003) Factor analysis and dynamics of water quality on the Songhua River, Northeast China. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 144, p. 159-169.
- ZIMMERMANN, C.M.; GUIMARÃES, O.M.; PERALTA-ZAMORA, P.G. (2008) Avaliação da qualidade do corpo hídrico do rio Tibagi na região de Ponta Grossa utilizando análise de componentes principais (PCA). *Química Nova*, v. 31, n. 7, p. 1727-1732.