

DUAS DÉCADAS DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO PIRACICABA, ESTADO DE MINAS GERAIS

Thiago Ribeiro da Silva Nascimento¹
Sônia Santos Baumgratz²
Paulo Antônio Moreira Marques³

RESUMO

O monitoramento da qualidade da água em trechos de rios sob influência de usinas hidrelétricas é fundamental para a gestão de recursos hídricos. Apesar da existência de muitos estudos nessa área, os trabalhos publicamente disponíveis geralmente empregam dados coletados em poucas campanhas de monitoramento, enquanto a análise de longas séries históricas ainda é pouco explorada. No médio curso do rio Piracicaba (MG), afluente da margem esquerda do rio Doce, na região Sudeste do país, está instalada a Usina Hidrelétrica Guilman Amorim (140MW). Entre as atividades da gestão ambiental da usina, tem sido realizado o monitoramento da qualidade da água do rio Piracicaba desde 1995, pouco antes de se iniciar as obras de sua construção. Neste estudo, foram selecionados dados de sete parâmetros monitorados ao longo de um período de 20 anos (1995-2015). Os dados foram avaliados por meio de estatísticas descritivas e testes não paramétricos para detecção de tendências temporais. Os resultados mostraram que as principais alterações na qualidade da água ocorrem no trecho de vazão reduzida, que é influenciado pelo reservatório e pelos afluentes que deságuam neste trecho do rio. As tendências temporais revelaram intensificação da poluição por despejos orgânicos e por fontes difusas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba. O estudo reforça a importância da estatística para acompanhamento dos resultados dos programas de monitoramento ambiental de longo prazo.

Palavras-chave: Qualidade de água. Reservatório de hidrelétrica. Monitoramento. Análise de tendências. Rio Piracicaba.

¹ Engenheiro Ambiental e Mestre em Engenharia Ambiental (UFOP). Consultor – Ecodinâmica Consultores Associados Ltda. - tthiagorsn@gmail.com

² Geógrafa (IGC/UFMG). Aperfeiçoamento em Mapeamento Geomorfológico (Instituto Geográfico da Universidade Heidelberg, República Federal da Alemanha). Diretora Técnica – Ecodinâmica Consultores Associados Ltda. - sonia@ecodinamica.com.br

³ Engenheiro Agrônomo (UFV). Especialista em Fertilidade e Manejo de Solos (UFV), Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG), Administração Rural (UFLA) e Defensivos Agrícolas (UFV). Ecodinâmica Consultores Associados Ltda. - paulo@ecodinamica.com.br

ABSTRACT

The monitoring of water quality in stretches of rivers influenced by hydroelectric plants is critical to water resources management. Despite the existence of many studies in this area, the publicly available papers usually employ data collected in few monitoring campaigns, while the analysis of long series is still underexplored. In the medium course of the Piracicaba River, a tributary of the Doce River, in Brazil's Southeast, is installed the Guilman Amorim Hydropower Plant (140MW). Among the hydropower plant's environmental management activities, the monitoring of Piracicaba River water quality has been carried out since 1995, before construction work began. In this study, data were selected from seven parameters monitored over a period of 20 years (1995-2015). Data were evaluated using descriptive statistics and non-parametric tests to detect temporal trends. Results showed that the main changes in water quality occur at the reduced flow stretch, which is influenced by the reservoir and the tributaries that flow into this river's section. Temporal trends revealed intensification of pollution by organic discharges and by diffuse sources in the Piracicaba River basin. The work reinforces the importance of statistics for assessing the results of long-term environmental monitoring programs.

Keywords: *Water quality. Hydroelectric reservoir. Monitoring. Trend analysis. Piracicaba river.*

Data de submissão: 27/05/2020

Data de aprovação: 25/06/2020

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

Um dos objetivos de longo prazo de programas de monitoramento é detectar mudanças ou tendências nos dados registrados ao longo do tempo e identificar, descrever e explicar os principais fatores que causam alterações na qualidade da água (YU; ZOU; WHITTEMORE, 1993). Para isso, dados de monitoramento de qualidade de água são tratados por meio de diversas técnicas estatísticas. Entre estas, destacam-se testes não paramétricos para detecção de tendências temporais, os quais vêm recebendo atenção pelo menos desde a década de 1970 (HIRSCH; SLACK; SMITH, 1982).

Duas das técnicas estatísticas mais extensivamente aplicadas para detecção de tendências são os testes de Mann-Kendall e Sazonal de Mann-Kendall. Estes testes são utilizados para determinar se o valor central (ou a mediana) muda ao longo do tempo e testam a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência nos valores de uma série temporal (HELSEL; HIRSCH, 2002).

A literatura é abundante em estudos que aplicaram testes de tendências temporais para o tratamento de dados de qualidade de água. Os exemplos são bastante variados e abrangem corpos de água situados tanto no Brasil (GROPPO *et al.* 2008; CHRISTOFARO; LEÃO, 2009; TRINDADE *et al.* 2017; COSTA *et al.* 2017; PINTO *et al.* 2017) quanto em outros países (SMITH; ALEXANDER; WOLMAN, 1987; YU; ZOU; WHITTMORE, 1993; WORRALL *et al.* 2004; ODEMIS; SANGUN; EVRENDILEK, 2010; YENILMEZ; KESKIN; AKSOY, 2011; AL-TAANI, 2014).

No entanto, alguns contextos específicos ainda foram pouco explorados. Um deles refere-se a trechos de rios sob influência de usinas hidrelétricas situadas no território brasileiro. O Brasil possui um dos maiores potenciais hidrelétricos do mundo e conta com diversos empreendimentos do setor, que juntos são responsáveis por 65% da energia gerada no país (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017). Existem diversos estudos sobre a qualidade da água em reservatórios brasileiros e seus afluentes e com a aplicação de diversas técnicas estatísticas (ESTEVES; LÔBO; HILSDORF, 2015; WENGRAT; BICUDO, 2011; ANDRADE *et al.* 2012; PIRES *et al.* 2015; PIMENTA *et al.* 2012). Porém, a maior parte dos trabalhos lida com dados coletados em poucas campanhas de monitoramento, gerando resultados que se referem a condições observadas em curtos períodos de tempo. Assim, as expressividades das usinas hidrelétricas no Brasil tornam importantes trabalhos orientados a evidenciar efeitos de longo prazo sobre a qualidade da água.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta a consolidação de resultados de 20 anos de monitoramento de um trecho de rio sob influência da operação de uma usina hidrelétrica situada no sudeste do Brasil, com o objetivo de avaliar alterações na qualidade da água e identificar tendências temporais em parâmetros monitorados pelo empreendimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Usina Hidrelétrica Guilman Amorim e sua inserção geográfica

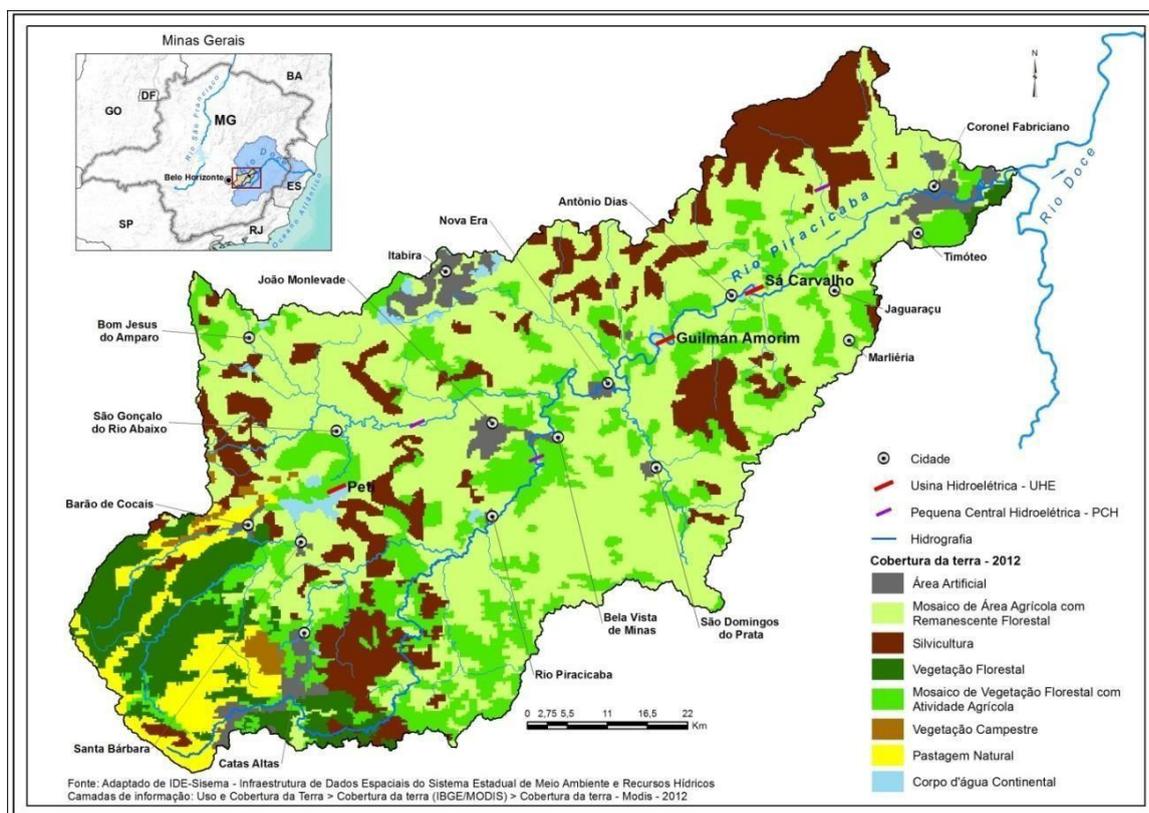
A Usina Hidrelétrica Guilman Amorim (19°42'30"S e 42°57'36"O) opera a fio d'água e está instalada no eixo do rio Piracicaba. Com potência instalada de 140 MW, a usina fornece parte da energia utilizada nas unidades industriais das duas empresas consorciadas que a gerenciam: ArcelorMittal Brasil e Samarco Mineração S.A. O reservatório ocupa uma superfície de 1,0 km². A estrutura da barragem possui 143,0 m de comprimento e 32,0 m de

altura. O tempo de residência da água no reservatório é de 7 dias. Uma tubulação de 0,5 m de diâmetro instalada próxima às comportas garante a vazão residual de 0,76 m³/s em um segmento de 1,5 km compreendido entre a barragem e a foz do primeiro afluente que deságua no trecho de vazão reduzida (TVR). O TVR possui extensão total de 9,5 km e desnível de 70,0 m até a casa de força, onde a água utilizada para a geração é totalmente devolvida ao rio Piracicaba.

A bacia do rio Piracicaba abrange 21 municípios e ocupa uma área total de 5.500 km², correspondendo a cerca de 7% da bacia do rio Doce. A área de drenagem a montante da UHE Guilman Amorim abrange 4.186 km². A vazão média de longo termo do rio é de 84,8 m³/s. Na região do alto e médio curso do rio prevalece o clima tropical de altitude, com verão quente e chuvoso e inverno frio e sem chuvas, enquanto no baixo curso predomina o clima tropical típico, caracterizado por verões mais quentes e invernos mais brandos. Os meses mais chuvosos são dezembro, janeiro e fevereiro, e os mais secos são junho, julho e agosto (FERREIRA; BAUMGRATZ; PORTILHO, 2006).

O Mapa 1 apresenta o uso e ocupação do solo na bacia do rio Piracicaba, indicando a localização da UHE Guilman Amorim. Inserem-se nesse espaço geográfico atividades agropecuárias, zonas urbanas, atividades minerárias e siderúrgicas de grande porte, além de reservas de proteção ambiental e grandes extensões de reflorestamento comercial (ECOPLAN-LUME, 2010).

Mapa 1 – Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Piracicaba



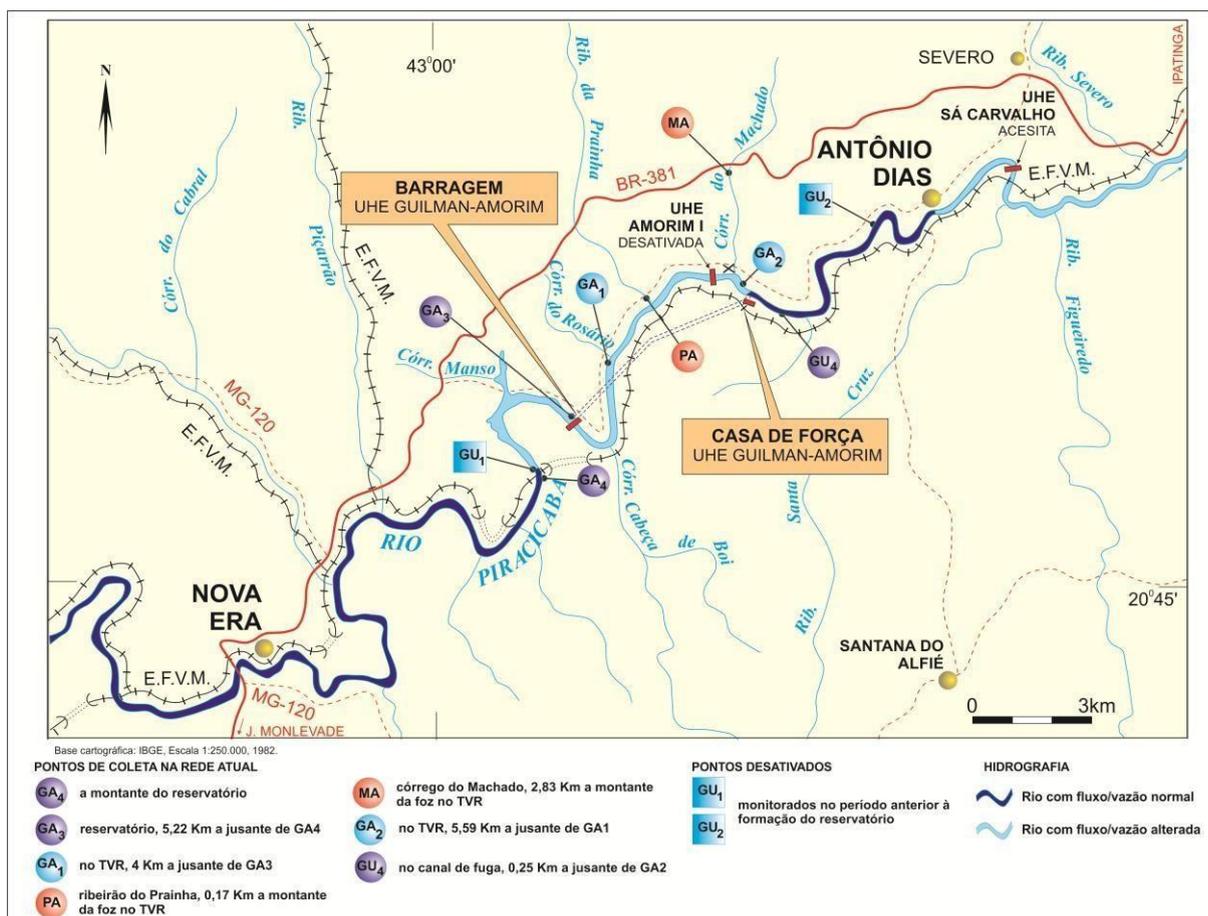
Fonte: Adaptado de SISEMA (2020)

O monitoramento da qualidade da água na UHE Guilman Amorim

A Usina Hidrelétrica Guilman Amorim iniciou a implantação do sistema de gestão ambiental em 1995, seguindo a norma British Standard 7750, tendo sido ajustado em 1999 para atender a ISO 14001, tornando-se a primeira hidrelétrica da América Latina certificada de acordo com tal norma. Diversos programas estão contemplados no sistema de gestão ambiental da usina, dentre os quais está o programa de monitoramento da qualidade da água do rio Piracicaba, que se iniciou e se mantém também como uma condicionante da licença ambiental do empreendimento.

A Figura 1 apresenta a rede de monitoramento da qualidade da água do rio Piracicaba da UHE Guilman Amorim. No período anterior ao enchimento do reservatório (e durante seu enchimento), o programa contemplava quatro estações de monitoramento: i) a montante de onde seria formado o reservatório (ponto GU1), no município de Nova Era; ii) a jusante de todas as frentes de obra (ponto GU2), no município de Antônio Dias; e iii) dois pontos intermediários no trecho que viria a constituir o TVR (pontos GA1 e GA2).

Figura 1 – Rede de monitoramento da UHE Guilman Amorim no rio Piracicaba



Fonte: Acervo do Consórcio UHE Guilman Amorim (2020)

Após o enchimento do reservatório, o ponto de montante foi ligeiramente deslocado e passou a ser denominado GA4, enquanto o ponto representativo das condições de jusante foi realocado para o local onde a vazão do rio é restituída (ponto GU4), ou seja, logo após o canal de fuga da casa de força. Um novo ponto foi incluído para monitorar as águas do reservatório (GA3) e os pontos do TVR foram mantidos. Mais tarde, em fevereiro de 2000, os dois principais afluentes que deságuam no TVR passaram a ser monitorados: ribeirão do Prainha (ponto PA) e córrego do Machado (ponto MA).

Análise dos dados

O presente estudo empreendeu uma avaliação estatística da série histórica de 20 anos de monitoramento da UHE Guilman Amorim, no período de 1995 a 2015, contemplando os seguintes parâmetros: turbidez, pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio,

nitrito, fósforo total e ferro solúvel. Embora diversos outros parâmetros sejam monitorados pelo empreendimento, este estudo selecionou os que pudessem retratar possíveis interferências da usina hidrelétrica sobre o rio, além de refletir as principais características de uso e ocupação do solo na bacia. As análises laboratoriais sempre seguiram os procedimentos definidos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 2005).

A primeira etapa das análises consistiu na organização do banco de dados. Os dados foram separados por parâmetro e por ponto de monitoramento, distinguindo dois períodos: i) abril de 1995 (quando o monitoramento teve início) a agosto de 1997 (quando do enchimento do reservatório); e ii) setembro de 1997 a dezembro de 2015. Para cada um destes períodos foi calculado o número de observações, a mediana, o primeiro e o terceiro quartis e os valores mínimos e máximos. A mediana foi escolhida por ser uma medida de tendência central mais resistente a valores discrepantes, que são comuns em dados ambientais (HELSEL; HIRSCH, 2002). Valores *outliers* foram identificados pelo método da amplitude interquartis (BLANCHE, 2004). Os casos foram avaliados individualmente para verificar a necessidade ou não de sua exclusão. Os valores excluídos foram substituídos pela mediana do conjunto. Dados censurados, isto é, valores fora do limite de detecção dos métodos laboratoriais de medição, foram substituídos pelo próprio limite de detecção.

Os resultados foram também comparados aos valores de referência definidos em duas normas do Estado de Minas Gerais: a Deliberação Normativa nº 10, de 16 de dezembro de 1986 (DN 10/86), do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM); e a Deliberação Normativa nº 01, de 05 de maio de 2008 (DN 01/08) (COPAM; CERH, 2008), que foi editada pelo COPAM e pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) e revogou a DN 10/86.

A análise de tendências temporais foi realizada somente para o período posterior ao enchimento do reservatório, em função de mudanças na localização dos pontos ocorridas com o início da operação da usina hidrelétrica. Os procedimentos basearam-se em Gauthier (2001), Hirsch, Slack e Smith (1982) e McLeod, Hiper e Bodo (1991), os quais já foram aplicados em diversos estudos, relatados anteriormente.

Inicialmente, foi verificada a correlação dos parâmetros de qualidade de água com o tempo (série temporal) por meio do teste de correlação de Spearman (GAUTHIER, 2001).

Resultados estatisticamente significativos no teste de Spearman ($p < 0,05$) indicaram correlação positiva ou negativa, conforme o sinal do valor de ρ (rho).

Em seguida, foram aplicados os testes de Mann-Kendall e Sazonal de Mann-Kendall para confirmar a análise exploratória feita com a correlação de Spearman. O teste de Mann-Kendall é computado a partir de dados pareados Y e T, onde Y é a concentração do parâmetro e T é o tempo, ordenados cronologicamente. O teste verifica se os valores tendem a aumentar ou diminuir com o tempo identificando relações monotônicas, isto é, associações, lineares ou não, de Y com T. O teste Sazonal de Mann-Kendall, por sua vez, leva em conta o efeito da sazonalidade sobre os dados. Ao contrário do primeiro teste, que utiliza todos os registros sem distinção, o teste Sazonal de Mann-Kendall é computado para cada estação, de modo que os dados devem ser inseridos separadamente (somente registros de verão, somente registros de inverno, etc.). Posteriormente, o teste gera um resultado combinado que permite melhor discernimento da relação do parâmetro com o tempo (HELSEL; HIRSCH, 2002). Em ambos os testes, o valor da estatística τ (tau), positivo ou negativo, indica se houve tendência de aumento ou redução dos valores no período analisado (McLEOD; HIPEL; BODO, 1991).

A verificação da existência de sazonalidade foi feita comparando-se os dados dos quatro trimestres do ano por meio do teste de Kruskal-Wallis. Diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) indicaram a influência da sazonalidade. Nestes casos, aplicou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall utilizando somente os dados trimestrais. Já nos casos em que não foi detectada influência da sazonalidade, foi aplicado o teste de Mann-Kendall utilizando todos os dados disponíveis.

Quando ambos os resultados da correlação de Spearman e dos testes foram estatisticamente significativos ($p < 0,05$) e ambos indicaram o mesmo sentido (rho e tau positivos ou rho e tau negativos), concluiu-se pela tendência de elevação ou redução das concentrações do parâmetro ao longo do período analisado. Quando apenas um dos resultados foi significativo, a tendência foi considerada inconclusiva. Por fim, quando nenhum dos testes apresentou resultado significativo, concluiu-se pela ausência de tendência.

A organização do banco de dados e o cálculo das estatísticas descritivas foram feitos em planilhas Microsoft Excel, enquanto os testes estatísticos foram executados no *software* R (versão 3.4.3) (R CORE TEAM, 2017), com suporte dos pacotes *Openxlsx* e *Kendall*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Síntese das estatísticas descritivas

A Tabela 1 apresenta os resultados para o período anterior à formação do reservatório. A mediana de todos os parâmetros respeitou os valores de referência estabelecidos pela legislação estadual. Valores máximos observados para a turbidez coincidiram com a estação chuvosa (dezembro de 1996), embora sem exceder o limite máximo permitido pela DN 10/86. Para o parâmetro pH, os valores mínimos registrados em todos os pontos ocorreram também na campanha de dezembro de 1996, dos quais apenas o segundo ponto do trecho que viria a constituir o TVR (ponto GA2) não excedeu o limite inferior estabelecido pela DN 10/86. Já o parâmetro DBO teve valores máximos registrados na estação seca, na campanha de junho de 1995, excedendo o limite permitido de 5,00 mg/L. A maior mediana para o nitrato foi observada no ponto GA2 (1,30 mg/L), ainda que bastante inferior ao limite normativo (10,0 mg/L).

Tabela 1 – Estatísticas descritivas para o período anterior à formação do reservatório

Parâmetro (Limite Classe 2)	Ponto	Período analisado	Número de observações	Mediana	Q1	Q3	Mín.	Máx.
Turbidez (UNT) (<100,00)	GU1	Abr95-Ago97	15	16,0	6,60	30,0	3,2	68,0
	GU2	Abr95-Ago97	15	19,0	5,50	26,0	2,2	74,0
pH (6,00 – 9,00)	GU1	Abr95-Ago97	15	7,11	6,57	7,22	5,80	8,00
	GA1	Abr95-Ago97	15	7,20	6,80	7,50	5,92	8,95
	GA2	Abr95-Ago97	15	7,20	6,89	7,42	6,12	7,87
	GU2	Abr95-Ago97	15	7,20	6,80	7,43	5,77	8,55
	GU1	Abr95-Ago97	15	6,50	3,90	8,05	3,10	8,70
Oxigênio Dissolvido (mg/L) (>5,00)	GA1	Abr95-Ago97	15	8,25	4,65	9,10	3,45	9,90
	GA2	Abr95-Ago97	15	8,25	4,44	8,99	3,65	9,50
	GU2	Abr95-Ago97	15	7,20	3,98	8,85	3,05	9,80
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L) (<5,00)	GU1	Abr95-Ago97	15	1,60	0,75	3,82	0,30	9,84
	GU2	Abr95-Ago97	15	1,60	0,59	2,48	0,05	9,95
Nitrato (mg/L) (<10,00)	GU1	Abr95-Ago97	15	0,92	0,29	1,48	0,02	2,20
	GA1	Abr95-Ago97	15	0,80	0,47	1,45	0,05	3,50
	GA2	Abr95-Ago97	15	1,30	0,54	1,65	0,14	3,00
	GU2	Abr95-Ago97	15	1,00	0,59	1,80	0,20	2,60
Fósforo Total (mg/L) (<0,10)	GU1	Abr95-Ago97	15	0,010	0,010	0,035	0,010	0,760
	GU2	Abr95-Ago97	15	0,010	0,010	0,020	0,010	0,130

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Q1: primeiro quartil; Q3: terceiro quartil; Mín.: mínimo; Máx.: máximo.

Turbidez, pH, oxigênio dissolvido e nitrato apresentaram medianas mais elevadas a jusante do local de instalação da casa de força (ponto GU2) do que a montante de onde viria a ser formado o reservatório (ponto GU1), enquanto a DBO apresentou um padrão contrário, com mediana maior em GU1 do que em GU2. Essas diferenças ocorreram devido aos afluentes que deságuam no trecho compreendido entre os dois pontos extremos da rede de amostragem. De um lado, os afluentes aumentam a capacidade de diluição das águas pelo aumento da vazão e, de outro, ocasionam, através do escoamento natural, o aporte de sedimentos no rio. Os níveis de oxigênio dissolvido corroboram esse resultado, apresentando valores mais elevados nos pontos intermediários (GA1 e GA2) do que nos pontos de montante e de jusante.

Estes resultados encontram correspondência nos primeiros estudos realizados na UHE Guilman Amorim. Ferrari Júnior e Renault (1999) analisaram os dados dos primeiros três anos de monitoramento da usina e constataram que o parâmetro turbidez manteve-se, em média, muito abaixo do limite máximo permitido para rios classe 2. Verificou-se que a concentração de sólidos em suspensão apresentou aumento no período monitorado, mas que isso se deu tanto a montante (ponto GU1) quanto a jusante (ponto GU2), não configurando, portanto, uma alteração decorrente do empreendimento. Este resultado já havia sido encontrado por Casseb, Baumgratz e Baumgratz (1997), que também mostraram que as oscilações do parâmetro se deram em ambos os pontos.

A Tabela 2 mostra os resultados para o período posterior à formação do reservatório. A mediana dos dados coletados, para todos os parâmetros e em todos os pontos, manteve-se dentro dos limites estabelecidos pela DN 10/86 e, posteriormente, pela DN 01/08, com exceção do ferro solúvel em GA4 (a montante do reservatório) e GA3 (reservatório).

Tabela 2 – Estatísticas descritivas para o período posterior à formação do reservatório

Parâmetro (Limite Classe 1) (Limite Classe 2)	Ponto	Período analisado	Número de observações	Mediana	Q1	Q3	Mín.	Máx.
Turbidez (UNT) (<40,0) (<100,0)	GA4	Set97-Dez15	79	12,0	5,2	38,8	0,1	133,0
	GA3	Set97-Dez15	78	11,5	4,5	30,8	1,5	182,0
	GA1	Fev00-Dez15	66	6,8	3,4	32,8	0,9	318,0
	PA	Fev00-Dez15	65	9,2	5,9	26,0	0,1	409,0
	MA	Fev00-Dez15	66	18,0	8,4	43,5	2,6	409,0
	GA2	Fev00-Dez15	65	9,8	4,1	35,5	0,1	371,0
pH (6,00 – 9,00) (6,00 – 9,00)	GU4	Set97-Dez15	79	13,0	4,5	33,9	1,0	186,0
	GA4	Set97-Dez15	79	7,38	7,11	7,60	6,27	9,35
	GA3	Set97-Dez15	79	7,36	7,11	7,75	6,04	9,62
	GA1	Set97-Dez15	78	7,49	7,14	7,75	6,38	8,85
	PA	Fev00-Dez15	64	7,36	6,89	7,67	4,14	8,80
	MA	Fev00-Dez15	65	7,20	7,01	7,60	3,73	8,79
Oxigênio Dissolvido (mg/L) (>6,00)	GA2	Set97-Dez15	79	7,46	7,20	7,73	6,18	8,92
	GU4	Set97-Dez15	79	7,32	7,13	7,64	6,03	8,37
	GA4	Set97-Dez15	79	7,36	6,84	7,90	4,32	9,25
	GA3	Set97-Dez15	79	7,24	6,70	7,79	4,21	9,85
	GA1	Set97-Dez15	79	7,45	6,98	8,13	4,87	9,30
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L) (<3,00) (<5,00)	GA2	Set97-Dez15	79	7,77	7,07	8,38	5,50	9,45
	GU4	Set97-Dez15	79	7,40	6,70	7,91	4,51	8,92
	GA4	Set97-Dez15	79	1,58	0,76	2,00	0,10	7,94
	GA3	Set97-Dez15	78	1,72	1,09	2,00	0,10	7,55
	GA1	Fev00-Dez15	66	1,98	0,74	2,00	0,08	6,90
	PA	Fev01-Dez15	61	2,00	0,95	2,00	0,10	6,00
Nitrato (mg/L) (<10,0) (<10,0)	MA	Fev01-Dez15	62	2,00	0,78	2,00	0,10	8,17
	GA2	Fev00-Dez15	66	1,50	0,71	2,00	0,10	6,40
	GU4	Set97-Dez15	78	1,50	0,63	2,00	0,10	8,10
	GA4	Set97-Dez15	79	0,60	0,34	2,20	0,10	7,50
	GA3	Set97-Dez15	79	0,62	0,33	1,80	0,10	7,90
	GA1	Set97-Dez15	79	0,50	0,16	1,30	0,10	8,80
	PA	Mar05-Dez15	44	0,23	0,10	0,41	0,10	0,79
Fósforo Total (mg/L) (<0,10) (<0,10)	MA	Mar05-Dez15	46	0,22	0,10	0,41	0,10	0,72
	GA2	Set97-Dez15	46	0,50	0,13	1,30	0,10	9,70
	GU4	Set97-Dez15	79	0,60	0,36	1,81	0,10	8,40
	GA4	Set97-Dez15	79	0,035	0,020	0,060	0,010	0,790
	GA3*	Set97-Dez15	79	0,027	0,012	0,052	0,010	0,400
	GA1	Set97-Dez15	75	0,020	0,010	0,042	0,010	0,440
	PA	Mar05-Dez15	44	0,012	0,010	0,026	0,010	0,372
Ferro Solúvel (mg/L) (<0,30)	MA	Mar05-Dez15	45	0,030	0,012	0,054	0,010	0,751
	GA2	Set97-Dez15	75	0,017	0,010	0,031	0,010	0,600
	GU4	Set97-Dez15	78	0,031	0,010	0,060	0,010	1,990
	GA4	Mar09-Dez15	30	0,325	0,148	0,458	0,020	1,640
	GA3	Fev02-Dez15	58	0,300	0,125	0,488	0,010	1,890
Ferro Solúvel (mg/L) (<0,30)	GA1	Mar09-Dez15	30	0,265	0,110	0,563	0,020	0,980
	GA2	Mar09-Dez15	30	0,290	0,085	0,533	0,020	1,130
	GU4	Mar09-Dez15	30	0,280	0,143	0,473	0,020	1,000

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

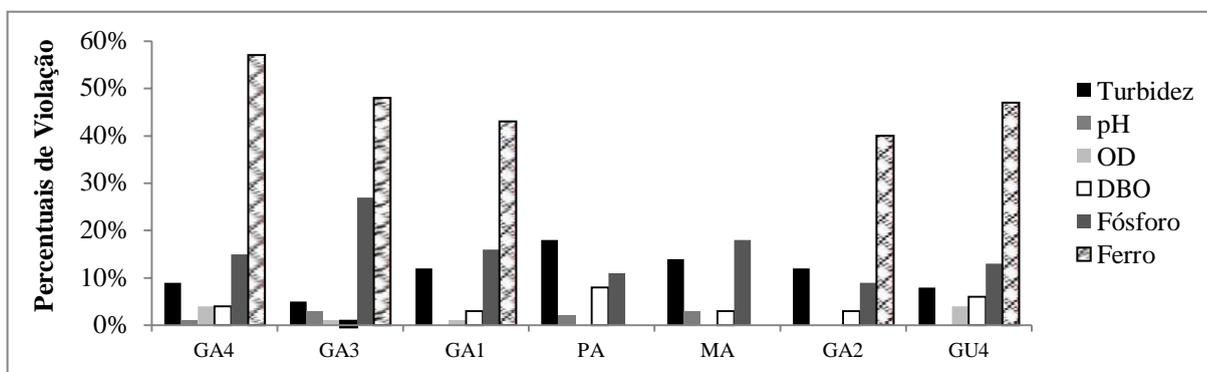
*O limite máximo permitido para Fósforo Total no ponto GA3 é de 0,050 mg/L, por se tratar de ambiente intermediário, com tempo de residência entre 2 e 40 dias; Q1: primeiro quartil; Q3: terceiro quartil; Mín.: mínimo; Máx.: máximo.

No primeiro ponto do trecho de vazão reduzida (ponto GA1), situado 4,0 km a jusante da barragem, as variáveis turbidez, nitrato, fósforo total e ferro solúvel apresentaram medianas menores do que as registradas em GA3 (reservatório). Embora exista contribuição da vazão do córrego Cabeça de Boi no ponto GA1, a redução das concentrações está mais relacionada à presença da barragem, uma vez que a estrutura promove retenção dos constituintes responsáveis pelos parâmetros. Resultados semelhantes foram encontrados por estudos realizados em outras hidrelétricas situadas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba, como o trabalho de Silva *et al.* (2009) na Usina Hidrelétrica de Peti, construída no rio Santa Bárbara, afluente do rio Piracicaba, e de Queiroz (2017) na Usina Hidrelétrica de Sá Carvalho, instalada no próprio curso do rio Piracicaba.

No ponto GA2, situado 5,6 km a jusante de GA1, é possível observar aumento dos níveis de oxigênio dissolvido e redução da DBO. Essa alteração decorre, assim como observado no período anterior à formação do reservatório, da contribuição dos afluentes que deságuam no TVR. Adicionalmente, as características geomorfológicas do trecho compreendido entre os dois pontos favorecem a oxigenação, pois o leito rochoso irregular e o desnível de 70 metros aumentam a turbulência da água e provocam uma reaeração natural. Esses resultados corroboram outro estudo já realizado na UHE Guilman Amorim. Baumgratz e Fonseca (2004), dispondo de dados de pontos dos afluentes PA e MA (que foram incluídos no programa de monitoramento em 2000), observaram que esses vinham contribuindo positivamente para a qualidade da água do trecho de vazão reduzida.

Embora tenha se mostrado que as medianas respeitaram os valores de referência estabelecidos pela legislação estadual, é importante conhecer não somente o valor central que representa cada conjunto de dados, mas também caracterizar sua variação. Assim, quando comparados todos os registros com os limites normativos, nota-se grande predominância de valores em conformidade legal (GRÁFICO 1). Corroborando os resultados anteriores, o parâmetro ferro solúvel apresentou a maior frequência de violação em todos os pontos, embora com uma redução progressiva dos percentuais no sentido montante-jusante (com exceção do ponto GU4). Outro parâmetro que se destaca é o fósforo total, sobretudo no reservatório, ambiente que apresenta características intermediárias entre sistemas lóticos e lênticos e possui limite normativo mais rigoroso. O parâmetro nitrato não apresentou nenhuma violação e, portanto, não aparece no gráfico.

Gráfico 1 – Percentuais de violação aos limites normativos no período posterior à formação do reservatório



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

GA4: a montante do reservatório; GA3: reservatório; GA1: primeiro ponto do TVR; PA e MA: afluentes; GA2: segundo ponto do TVR; GU4: a jusante da casa de força (canal de fuga).

Testes de tendências temporais

Os resultados dos testes de tendências para todos os parâmetros e pontos monitorados são mostrados na Tabela 3. O ponto MA, situado no córrego do Machado, apresentou tendência de elevação nos parâmetros turbidez, pH e fósforo total, isto é, os valores registrados para essas variáveis elevaram-se ao longo do período analisado. As tendências de elevação observadas nesse ponto indicam uma deterioração na qualidade da água do córrego, possivelmente em função de poluição causada por fontes difusas. A sub-bacia do córrego do Machado possui extensas áreas rurais, onde práticas agrícolas podem causar alterações nos parâmetros, o que é captado na análise de tendências.

Tabela 3 – Resultados dos testes de tendências temporais para os parâmetros analisados

Pontos	Turbidez	pH	OD	DBO	Nitrato	Fósforo Total	Ferro Solúvel
GA4	–	–	–	–	↓	↑	–
GA3	–	–	–	–	↓	↑	–
GA1	?↑	–	–	–	↓	?↑	–
PA	–	–	NM	–	–	↑	–
MA	↑	↑	NM	–	–	↑	–
GA2	–	–	–	–	↓	–	–
GU4	–	–	–	–	↓	–	–

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

–: ausência de tendência; ↓: redução; ↑: elevação; ?↑: inconclusivo, com possibilidade de elevação; NM: não monitorado.

O parâmetro fósforo total apresentou tendência de elevação em quase todos os pontos analisados. Dois fatores podem explicar esse resultado: as características dos solos e o lançamento de esgotos domésticos. Os solos da área de estudo, especificamente na bacia do rio Piracicaba, são compostos, em grande parte, por latossolos distróficos e solos litólicos distróficos, caracterizados por pobreza de nutrientes (BRASIL, 1970). Por outro lado, podem ser ricos em fósforo total, uma vez que o elemento fica retido através de reações de precipitação com Al^{3+} e Fe^{3+} e de adsorção com óxidos de ferro e alumínio, aluminossilicatos e matéria orgânica, sendo, em seguida, removido juntamente com partículas de solo por meio de processos erosivos (POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE, 1998). Deste modo, considerando a predominância de solos com forte suscetibilidade à erosão e as características de uso e ocupação do solo que intensificam essa condição (ECOPLAN-LUME, 2010), configura-se um cenário de aporte de fósforo nas águas do rio através do transporte de sedimentos.

Adicionalmente, as tendências de elevação do fósforo também estão associadas ao lançamento de efluentes domésticos nos corpos hídricos, reforçando o efeito já causado pelo aporte natural de sedimentos. Um exemplo que ilustra tal situação é o município de Nova Era, que é cortado pelo rio Piracicaba cerca de 20 km a montante da UHE Guilman Amorim e que não conta com tratamento de esgoto sanitário, de acordo com dados levantados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e compilados no estudo Atlas Esgotos (ANA, 2017). Este mesmo estudo também apontou que Nova Era é uma das cidades brasileiras que demandam atenção especial quanto à remoção de fósforo, visando o controle da eutrofização em lagos e reservatórios (ANA, 2017). Além disso, em Nova Era está situada a foz do rio do Peixe, considerado o curso d'água mais impactado da bacia do rio Piracicaba (SOARES, 2017).

O parâmetro nitrato, por sua vez, apresentou tendência à redução no período analisado (com exceção dos pontos dos afluentes). Embora o lançamento de efluentes domésticos sem tratamento também contribua para a presença de nitrato na água através do processo de nitrificação, infere-se que este fenômeno não tem produzido quantidades significativas de nitrato, pois os registros históricos mostram baixos valores desse parâmetro e boas condições de oxigenação no rio. Assim, a tendência de redução do nitrato está mais associada ao efeito produzido pela barragem. Agostinho *et al.* (1999) demonstraram que, embora durante o período de enchimento de reservatórios a concentração de nutrientes seja

alta, as características lânticas que se estabelecem no novo ambiente favorecem a sedimentação, causando deposição de nutrientes das águas para os sedimentos.

Oxigênio dissolvido e DBO não apresentaram tendências em nenhum dos pontos monitorados. Esses resultados chamaram a atenção, pois era esperado encontrar tendências que refletissem um aumento dos níveis de poluição por despejos orgânicos, assim como encontrado para o fósforo total. A ausência de tendência nesses parâmetros sugere que o trecho do rio Piracicaba monitorado pela UHE Guilman Amorim tem mantido condições estáveis nos níveis de oxigênio na água, apesar das interferências na bacia.

Outro resultado peculiar foi a ausência de tendência para o parâmetro ferro solúvel. Devido à intensificação das atividades de extração e beneficiamento de minério de ferro nas áreas a montante do reservatório nas últimas décadas, esperava-se que os testes estatísticos detectassem tendência de elevação para o parâmetro ferro solúvel, mas nenhuma tendência significativa foi identificada. Em contrapartida, Nascimento *et al.* (2018), ao analisarem a presença de metais nos sedimentos de fundo do rio do Peixe, afluente do rio Piracicaba, reportaram enriquecimento de ferro nos pontos de amostragem mais próximos a áreas de mineração situadas no município de Itabira. Logo, tendências de elevação podem ter ocorrido em frações do metal com maior granulometria, que se acumulam nos sedimentos do rio.

4 CONCLUSÃO

A análise dos resultados de 20 anos do monitoramento do rio Piracicaba desenvolvido pela UHE Guilman Amorim demonstrou que as principais alterações nos dados de qualidade de água são observadas no trecho de vazão reduzida. A qualidade da água nesse compartimento do rio é favorecida pelo efeito de retenção de sólidos e nutrientes provocado pela barragem, bem como pela reaeração natural do rio causada pelas características geomorfológicas do TVR e dos afluentes que nele deságuam.

Os resultados da análise de conformidade legal e dos testes de tendências temporais indicaram que os parâmetros estudados mantiveram-se em condições estáveis no período analisado e majoritariamente em conformidade com a legislação. Contudo, evidências de intensificação da poluição hídrica na bacia do rio Piracicaba foram encontradas por meio de alguns parâmetros, notadamente ferro solúvel, com as maiores frequências de violação, e fósforo total, que ainda apresentou tendência de elevação em quase todos os pontos. Tais

parâmetros, porém, não guardam relação com as atividades do empreendimento, de modo que as violações observadas estão mais associadas a características de uso e ocupação do solo na bacia que se refletem na qualidade da água no trecho monitorado pela usina.

Ao dispor de uma longa série histórica de dados, o estudo permitiu o uso de técnicas estatísticas que possibilitaram uma síntese robusta sobre a qualidade da água do rio Piracicaba no trecho monitorado pela usina, reforçando a importância de programas de monitoramento de longo prazo para o aprimoramento da gestão de recursos hídricos. Futuros estudos podem estender o tratamento estatístico aqui aplicado a outras variáveis e a outros trechos do rio Piracicaba, fornecendo um entendimento científico ainda mais abrangente sobre as condições desse corpo hídrico.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas esgotos**: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 28 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Renováveis e não renováveis**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Renov%C3%A1veis+e+N%C3%A3o+Renov%C3%A1veis/aba3cfc6-a27f-a7af-6cac-1d859a2f0d1d?version=1.1>. Acesso em: 16 out. 2018.

AGOSTINHO, A. A. *et al.* Patterns of colonization in neotropical reservoirs, and prognoses on aging. *In*: TUNDISI, J. G.; STRAŠKRABA, M. (Org.). **Theoretical reservoir ecology and its applications**. Leiden: Brazilian Academy of Sciences, International Institute of Ecology and Backhuys Publishers, 1999. p. 227-265.

AL-TAANI, A. A. Trend analysis in water quality of Al-Wehda Dam, north of Jordan. **Environmental Monitoring and Assessment**, Berlin, v. 186, n. 10, p. 6223-6239, 2014.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2005.

ANDRADE, D. P.; PASCHOAL, L. R. P.; SÁ, O. R.; FRANÇA, N. Water quality assessment of fifth-order tributaries of the reservoir at the Marechal Mascarenhas de Morais Hydroelectric Power Station in the Rio Grande watershed (State of Minas Gerais, Brazil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 24, n. 3, p. 326-337, 2012.

BAUMGRATZ, S. S.; FONSECA, A. Water quality management of altered discharge rivers: a Brazilian hydroelectric power plant experience. *In: SYMPOSIUM ON ECOHYDRAULICS*, 5., 2004, Madri. **Anais [...]**. Madrid, 2004.

BLANCHE, M. T. Variability. *In: TREDoux, C; DURRHEIM, K. (Org.). Numbers, hypotheses & conclusions: a course in statistics for the social sciences*. Cape Town: University of Cape Town Press, 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **Levantamento exploratório dos solos da região sob influência da Companhia Vale do Rio Doce**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1970. 154 p. (Boletim técnico, 13).

CASSEB, M. M. S.; BAUMGRATZ, SÉRGIO, S.; BAUMGRATZ, SÔNIA, S. Gerenciamento ambiental da UHE Guilman Amorim e o monitoramento das águas do rio Piracicaba. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. p 2547-2553.

ECOPLAN-LUME. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba - PARH Piracicaba**. Belo Horizonte: Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010.

CHRISTOFARO, C; LEÃO, M. M. D. Caracterização temporal do arsênio nos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG, Brasil, ao longo de uma década (1998-2007). **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 54-66, 2009.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais); CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Minas Gerais). **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=12913>. Acesso em: 27 mai. 2020.

COSTA, E. P. *et al.* Evaluation of violations in water quality standards in the monitoring network of São Francisco River basin, the third largest in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Berlin, v. 189, n. 11, p. 590, 2017.

ESTEVES, K. E.; LÔBO, A. V. P.; HILSDORF, A. W. S. Abiotic features of a river from the Upper Tietê River Basin (SP, Brazil) along an environmental gradient. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 27, n. 2, p. 228-237, 2015.

FERRARI JÚNIOR, M.J.; RENAULT, C.P. Monitoramento da qualidade das águas do rio Piracicaba: fases de implantação e de operação da Usina Hidrelétrica Guilman-Amorim S.A. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 23., Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 1999.

FERREIRA, V. O.; BAUMGRATZ, S. S.; PORTILHO, G. S. **O tempo e o clima**. Belo Horizonte: Usina Hidrelétrica Guilman Amorim, 2006. 37 p.

GAUTHIER, T. D. Detecting trends using Spearman's rank correlation coefficient. **Environmental Forensics**, United Kingdom, v. 2, n. 4, p. 359-362, 2001.

GROPPO, J. D. *et al.* Trend analysis of water quality in some rivers with different degrees of development within the São Paulo State, Brazil. **River Research and Applications**, United Kingdom, v. 24, p. 1056–1067, 2008.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. **Statistical methods in water resources**. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 2002. 524 p.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water-quality data. **Water Resources Research**, New Jersey, v. 18, n. 1, p. 107-121, 1982.

McLEOD, A. I.; HIPER, K. W.; BODO, B. A. Trend analysis methodology for water quality time series. **Environmetrics**, New Jersey, v. 2, n. 2, p. 169-200, 1991.

NASCIMENTO, L. P. *et al.* Avaliação geoquímica de metais em sistemas fluviais afetados por atividades antrópicas no Quadrilátero Ferrífero. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 767-778, 2018.

ODEMIS, B.; SANGUN, M. K.; EVRENDILEK, F. Quantifying long-term changes in water quality and quantity of Euphrates and Tigris rivers, Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, Berlin, v. 170, p. 475-490, 2010.

PIMENTA, A. M. *et al.* Water quality in the lotic area of the Antas River before and after the construction of the Monte Claro hydroelectric plant, south Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 24, n.3, p. 314–325, 2012.

PINTO, C. C. *et al.* Trend analysis of the load and concentration of physical, chemical and biological parameters in the Verde River Basin. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n.40, 2017.

POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177 p. Original inglês.

PIRES, D. A. *et al.* Water quality in four reservoirs of the metropolitan region of São Paulo, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 27, n. 4, p. 370–380, 2015.

QUEIROZ, M. T. A. **Avaliação da qualidade da água da sub-bacia do rio Piracicaba e da sua área de influência no reservatório da Usina Hidrelétrica de Sá Carvalho, Antônio Dias, MG, Brasil**. 2017. 123 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, 2017. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 30 dez. 2017.

SILVA, A. P. D. S. *et al.* Qualidade da água do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Peti, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1063-1069, 2009.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (Minas Gerais) - SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 23 jun. 2020.

SMITH, R. A.; ALEXANDER, R. B.; WOLMAN, M. G. Water quality trends in the nation's rivers. **Science**, Washington, v. 235, n. 4796, p. 1607-1615, 1987.

TRINDADE, A. L. C. *et al.* Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n.1, p. 13-24, 2017.

WENGRAT, S.; BICUDO, D. D. C. Spatial evaluation of water quality in an urban reservoir (Billings Complex, southeastern Brazil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 23, n. 2, p. 200-216, 2011.

WORRALL, F. *et al.* Trends in dissolved organic carbon in UK rivers and lakes. **Biogeochemistry**, Berlin, v. 70, n. 3, p. 369-402, 2004.

YENILMEZ, F.; KESKIN, F.; AKSOY, A. Water quality trend analysis in Eymir Lake, Ankara. **Physics and Chemistry of the Earth**, Amsterdam, v. 36, n. 5-6, p. 135-140, 2011.

YU, Y. S.; ZOU, S.; WHITTEMORE, D. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 150, n. 1, p. 61-80, 1993.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Diretoria do Consórcio UHE Guilman-Amorim, Engenheiros José Arimathéa Silveira Nunes e Roberto Carlos Oliveira de Aragão, pelo acesso ao banco de dados do monitoramento da qualidade das águas do rio Piracicaba realizado pela empresa. Também agradecem ao Geógrafo Rafael Cunha, pela elaboração dos mapas, e à equipe da Ecodinâmica, pelas sugestões para o aprimoramento do trabalho.