

Estabelecimento de um Índice Local de Qualidade das Águas utilizando Estatística Multivariada Robusta: uma abordagem aplicada aos Reservatórios em Cascata Jaguará, Igarapava e Volta Grande (MG - Br).

Claudia de Vilhena Schayer SABINO
PUC Minas - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais 30535-901, Brasil

e

Ludmila Vieira LAGE
PUC Minas - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais 30535-901, Brasil

e

Marcela David de CARVALHO
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais 30.190-131, Brasil

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar os dados de monitoramento das águas dos reservatórios em cascata: Jaguará, Igarapava e Volta Grande, coletados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e Consórcio da Usina Hidrelétrica de Igarapava, no período de 1997 a 2013. O banco de dados em estudo apresentou diversas não conformidades que impossibilitaram o cálculo de índices de qualidade convencionais. Foi estabelecido um índice local de qualidade das águas (ILQA) utilizando estatística multivariada robusta e os limites vigentes na Resolução DN COPAM-CERH 01/08 para corpos d'água de classe 2. Os resultados demonstraram que o ILQA classificou a qualidade das águas como boa na maioria das coletas, exceto nas dos pontos BG057, VG161 e IG140. As principais fontes de contaminações na região são devidas a esgotos domésticos, efluentes industriais e preparo primário do solo para plantação da cana de açúcar. Os estudos de séries temporais mostrou que não há tendência de melhoria da qualidade das águas, sendo necessário aperfeiçoar o tratamento de efluentes industriais e domésticos na área de estudo. A metodologia pode ser utilizada em outros reservatórios por se adequar a diferentes bancos de dados.

Palavras-chave: Índice de qualidade das águas, Estatística multivariada robusta, Séries temporais, Reservatórios de hidrelétrica, Contaminadores de água.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos permite a avaliação da oferta hídrica, base para decisões do aproveitamento múltiplo e integrado da água [1]. De acordo com organizações internacionais, os principais objetivos de um Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) são: compreender e prever mudanças ambientais; proteger os recursos naturais; a saúde humana e ambiental; preservar a biodiversidade e os habitats naturais [2].

Numa rede de monitoramento, com coletas e análises de amostras sistemáticas, estará sendo formada uma série histórica, objetivando o acompanhamento e evolução de determinadas características da qualidade da água de corpos hídricos [3].

O monitoramento, ao longo do tempo, é necessário para avaliar e estabelecer tendências e políticas ambientais para a gestão de recursos hídricos [4]. A partir das séries históricas é

possível determinar se a qualidade da água e a relação entre variáveis sofreu alguma mudança temporal e espacial [5, 6, 7].

Além disso, as séries históricas contribuem para a gestão sustentável dos recursos hídricos [8] permitindo: determinar o estado real do ambiente e identificar os fatores dominantes de mudança; estabelecer um limite específico acima do qual ocorrerão danos ecológicos; prever a probabilidade espacial e temporal de ocorrência do problema usando o limite específico; desenvolver a gestão adequada planejada em uma avaliação multi cenário.

Esta pesquisa teve como objetivo analisar os dados de monitoramento das águas de reservatórios, coletados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) [9], Consórcio da Usina Hidrelétrica de Igarapava [10] e Instituto Mineiro das Águas (IGAM) [11], no período de 1997 a 2013. Os dados são referentes aos reservatórios em cascata Jaguará, Igarapava e Volta Grande, localizados na mesorregião do Triângulo Mineiro no Estado Minas Gerais.

Sérios problemas ambientais ocorreram na região a partir de 2005, tornando inadiável a análise dos dados da CEMIG e fez-se necessário determinar os principais contaminadores, os locais mais afetados e as tendências. Entre os problemas destacam-se as presenças de mexilhão dourado, macrófitas e cianobactérias.

Os bancos de dados ambientais geralmente apresentam não conformidades, o que dificultam as análises estatísticas [12]. As principais não conformidades encontradas em resultados ambientais são: valores iguais à zero; ausência de dados para variáveis (vazios); presença de pontos de coleta sem coordenadas espaciais; imprecisões; dados discrepantes em relação à série histórica; valores abaixo do Limite de Quantificação (LQ); diversidade nos LQs ao longo do período monitorado [13]. No período de análise, 17 anos, é até esperada esta diversidade no LQ, porque os laboratórios não reportaram os LQs da época.

Na presente pesquisa foi elaborado um índice local (ILQA) para avaliação da qualidade das águas nos reservatórios, incluindo variáveis físicas, químicas e climatológicas. Isto foi necessário porque algumas das variáveis exigidas no cálculo destes índices convencionais como o Índice de Qualidade de Água de Reservatórios (IQAR) não possuíam variabilidade suficiente para serem utilizadas em cálculos estatísticos.

O ILQA também se fez necessário por não ser adequado desconsiderar dados de 17 anos de um PMA, principalmente da qualidade da água, pois estes programas são extremamente úteis, mas caros e demorados [3].

2. METODOLOGIA

O banco de dados foi composto por coletas entre setembro de 1997 a abril de 2013 em estações de amostragens localizadas no entorno das usinas hidroelétricas de Jaguará, Igarapava e Volta Grande. Algumas características dos reservatórios estudados estão apresentadas na Tabela 1 e Figura 1.

Para os estudos estatísticos foi utilizado o *software* R [14], gratuito, o qual possui técnicas robustas para análise de dados. Os pacotes utilizados foram: StatDA [15]; ggplot2 [16]; GGally [17]; rrcov [18]; tseries [19]; forecast [20]; aTSA [21]; TTR [22]. Para os cálculos inexistentes em pacotes disponíveis, foram elaborados programas na linguagem R.

Foi utilizado o teste de Shapiro-Wilks [23] para averiguar se os dados eram provenientes de uma população com distribuição normal e um nível de 5% de significância para cada variável.

De acordo com o sugerido por Reimann *et al.* [11], as variáveis e coletas que apresentaram 20% ou mais de dados censurados (abaixo do LQ) e/ou vazios (não analisadas) foram

excluídas. Variáveis com valor de desvio absoluto mediano (MAD) igual à zero também foram descartadas porque apresentam baixa variabilidade e interferem nas análises estatísticas multivariadas.

Considerando que a existência de *outliers* pode afetar gravemente os resultados finais da análise estatística, foi feita uma comparação multivariada entre a distância de Mahalanobis e a distância Robusta [24].

Nesta pesquisa foram estudadas técnicas robustas. A utilização dos métodos robustos se justifica por serem estes menos sensíveis à dados discrepantes, facilitando a interpretação das cargas das componentes por considerarem o *bulk* dos dados [25], o que evita colinearidade e reduz a influência de pontos que não são *outliers*, mas que afastam multivariadamente da maioria dos dados [24]. As técnicas robustas consistiram em utilização da matriz de covariância na análise de componentes principais e na transformação dos dados.

Tabela 1– Algumas características das UHE's estudadas

	JAGUAR A	VOLTA GRANDE	IGARAP AVA
Início da operação	1971	1974	1999
Geração (MW)	424	380	210
Área (km ²)	33	198	36,5
Cota (m)	580	494,6	512
Volume útil (m ³)	1,10 x 10 ⁺⁰⁸	2,30 x 10 ⁺¹⁰	2,34 x 10 ⁺⁰⁸
Vazão turbinada (m ³ /s)	802,41	1000	900

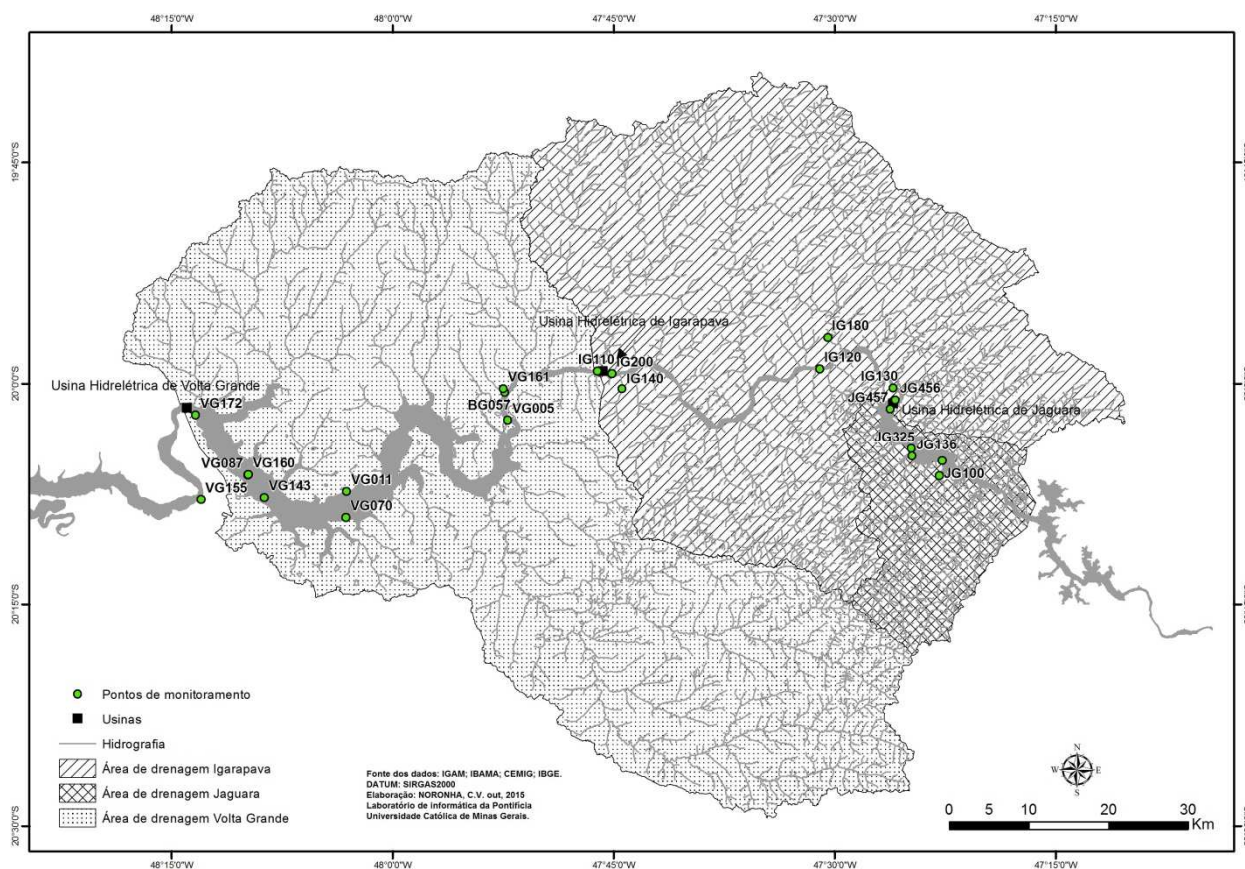


Figura 1- Mapa da Bacia do rio Grande mostrando os pontos monitorados.

Dados ambientais devem ser transformados antes dos cálculos estatísticos para evitar imprecisões características de dados composicionais [13]. Assim, foi feita a transformação *centered log-ratio* (clr). Para isto, inicialmente cada valor do banco de dados foi dividido pela mediana da respectiva variável. Isto teve como objetivo igualar as unidades, tendo em vista que a transformação “clr” utiliza a média geométrica. A transformação [24] é definida pela Eq.(1) :

$$y=(y_1, \dots, y_n) = \left(\log \frac{x_1}{g(x)}, \dots, \log \frac{x_n}{g(x)} \right) \quad (1)$$

onde a média geométrica é $g(x) = \sqrt[D]{x_1 \dots x_D}$, y são os valores transformados, x_i o valor da variável “x” na coleta “i” e D é o número de coletas consideradas para os cálculos.

Os dados transformados “clr” foram usados na análise de agrupamentos [13].

Para a análise das componentes principais robustas (ACPr) foi feita a transformação *isometric log-ration* (ilr), apresentada na Eq.(2).

$$z_i = \sqrt{\frac{i}{i+1}} \log \frac{\sqrt{\prod_{j=1}^i x_j}}{x_{i+1}} \quad (2)$$

onde z_i é o valor transformado, $i= 1, \dots, D-1$ e as demais letras com o mesmo significado definido anteriormente.

A Análise de Agrupamento, utilizada para selecionar as variáveis que comporiam o IQLA, é uma técnica multivariada cuja finalidade é agregar objetos com base nas características que eles possuem [27].

A análise de Componentes Principais é a técnica multivariada mais utilizada para explorar, interpretar e reduzir os dados, sem que haja perda de informação [5,13]. O objetivo do cálculo da ACPr foi encontrar uma componente que tivesse uma direção bem definida, ou seja, todos os contaminadores apresentassem carga com o mesmo sinal. A carga expressa a correlação da componente principal (CP) com a variável [12].

Foi efetuada uma categorização das variáveis originais com o intuito de estabelecer limites inferior e superior do ILQA bem definidos, ou seja, valores menores do índice correspondente com as águas de pior qualidade e os maiores com as de melhor qualidade. [26,27,28,29,30]. As cargas da CP escolhida foram empregadas como peso no estabelecimento do ILQA.

A metodologia para a categorização foi baseada na legislação DN COPAM-CERH 01/08 [31] para corpos d’água de classe 2. Para as variáveis que não constam da legislação, a categorização foi feita a partir dos quartis da distribuição de cada variável [31]. O cálculo do índice é definido na Eq.(3):

$$ILQA = \frac{\sum_{i=1}^j x_i P_i}{\sum_{i=1}^j P_i} \quad (3)$$

onde x_i é categoria obtida pela coleta na variável i e P_i são os coeficientes (cargas) para as variáveis e n o número de variáveis.

O ILQA varia de 1 a 5 e a classificação é: Inaceitável <3; Regular, entre 3 e 4; Aceitável entre 4 e 4,5; Bom entre 4,5 e 4,8; Excelente >4,8.

O índice ILQA foi desenvolvido baseando-se na metodologia sugerida por Mingoti *et al.* (1998) [32]. A técnica foi modernizada e adaptada.

O teste Kruskal-Wallis [33] foi utilizado para verificar se há diferença entre as UHEs, as estações de coleta e os diferentes

anos e meses de monitoramento. Este teste, não paramétrico, compara tendências centrais de amostras independentes [34]. O nível de significância adotado para o teste foi de 5%.

O desenvolvimento de estratégias de avaliação da qualidade da água, que envolve alterações espaciais e temporais causados por fenômenos naturais e antropogênicos, é ferramenta importante nas práticas de gestão das águas [35]. Para verificar tendências e prever o comportamento futuro da qualidade das águas na região em estudo foi utilizada modelagem por séries temporais.

Uma série temporal é a sequência de medições sucessivas feitas ao longo de um intervalo de tempo [36]. A análise visa extrair informações estatísticas significativas do conjunto de observações. A técnica ainda permite fazer previsão por meio de um modelo baseado nos valores observados anteriormente.

Neste trabalho foi usado o modelo Sazonal Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel (SARIMA) [37], que é conhecido também por Modelo de Box-Jenkins. Para identificação e estimação dos parâmetros do modelo foi feita a avaliação do correlograma, que descreve graficamente a função de autocorrelação total (FAC) e a função de autocorrelação parcial (FACP) [38, 39]. A verificação da adequabilidade do modelo [40] constituiu na análise dos resíduos (correlograma, teste Ljung-Box e teste de Normalidade). O modelo escolhido foi o que atendeu aos requisitos dos testes e que apresentou os menores critérios de decisão [38,41].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação dos critérios estatísticos descritos, o banco de dados ficou composto por 15 variáveis relacionadas à qualidade das águas: condutividade, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo (P), nitrato, nitrogênio amoniacal total (NAT), oxigênio dissolvido (OD), pH, sólidos dissolvidos totais, (SDiT), temperatura da água (Tempagua), temperatura do ar (TempAr), precipitação acumulada em cinco dias (PrecipitacaoAc), temperatura máxima do ar (TempMaxima), temperatura mínima do ar (TempMinima), velocidade do vento (VelVento) e Vazão .

Após o tratamento dos dados restaram 581 (46%) coletas, distribuídas em 24 estações de amostragem, sendo 6 em Jaguará, 8 em Igarapava e 12 em Volta Grande.

O teste de Shapiro-Wilks mostrou que nenhuma das variáveis apresentou distribuição normal. O estudo de *outliers* detectou valores anômalos no início do monitoramento (1997 a 2000). Tendo em vista não ser possível a rastreabilidade de tais resultados, as coletas foram descartadas.

A Análise de Agrupamento foi feita utilizando a transformação “clr”. O resultado está apresentado na Figura 2. O dendograma apresenta dois grupos principais: o primeiro (esquerda) pode ser relacionado prioritariamente às variáveis químicas e à variável física condutividade. Já o segundo grupo (direita) está associado às variáveis climáticas e à vazão, além de OD, pH e nitrato.

A proximidade entre condutividade e fósforo pode ser explicada considerando que na região o fósforo tem três principais origens: esgotos domésticos, agropecuária e efluentes industriais, com ênfase em indústrias de fertilizantes. Estas fontes de contaminação implicam também em aumento da condutividade. A associação entre as variáveis precipitação acumulada e vazão se deve ao fato da vazão na região, controlada pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), aumentar durante o período chuvoso. A proximidade entre temperatura da água e a temperatura local e máxima do ar é naturalmente esperada.

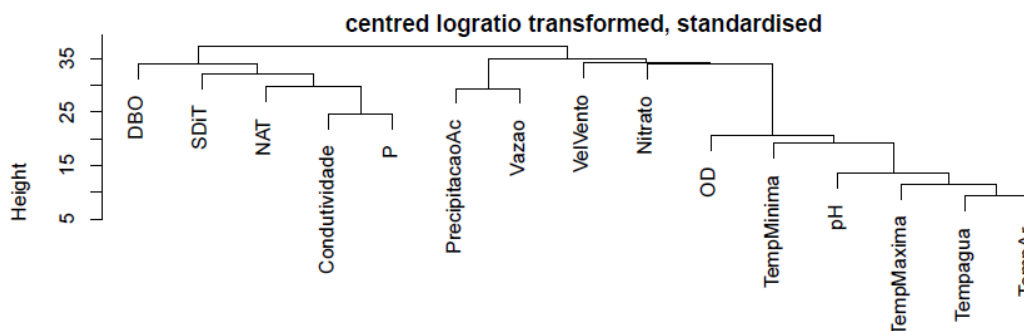


Figura 2- Dendrograma - Agrupamento hierárquico das variáveis.

A partir do estudo de agrupamento hierárquico a ACPr foi feita utilizando as variáveis: DBO, fósforo, NAT, nitrato, OD, pH, SDiT, temperatura da água, temperatura mínima do ar, vazão e velocidade do vento.

A ACPr mostrou que a décima primeira CP apresentou todas as suas cargas negativas e foi decidido considerá-la como peso para representar o ILQA [32]. Além disso, nessa componente, as variáveis estatisticamente mais significativas estão entre as que mais comprometem a qualidade da água em relação aos limites da lei para corpos d'água de classe 2 [31].

É importante salientar que para o cálculo do ILQA foram utilizados, por convenção, os valores positivos das cargas (valor original da carga multiplicado por -1). As cargas das variáveis estão apresentadas na Figura 3. As maiores cargas foram correspondentes à velocidade do vento, fósforo, nitrato, DBO e NAT. Todas as variáveis utilizadas na ACPr foram consideradas no cálculo do ILQA.

A velocidade do vento foi a variável estatisticamente mais correlacionada com a 11ª CP. O vento causa ondas e correntes, provocando misturas e alterando a qualidade das águas [42,43,44]. Além disso, o vento causa a re-suspensão de sedimentos alterando a carga de nutrientes nos reservatórios e consequentemente influenciando a entrada de luz e a espessura da zona eufótica, que é a parte de um corpo de água (oceano ou lago) que recebe luz solar suficiente para que ocorra a fotossíntese [42,45].

No período estudado, os valores máximos da vazão ocorreram geralmente no período chuvoso (entre novembro e fevereiro) e os da velocidade do vento no período de seca (entre março e outubro). Alguns valores mais elevados da vazão em períodos de seca podem ser explicados por necessidade de aumento da produção de energia elétrica devido a aumento da demanda em períodos específicos. Na seca normalmente a qualidade das águas é pior devido à diminuição do volume de água e consequente concentração dos contaminadores [46].

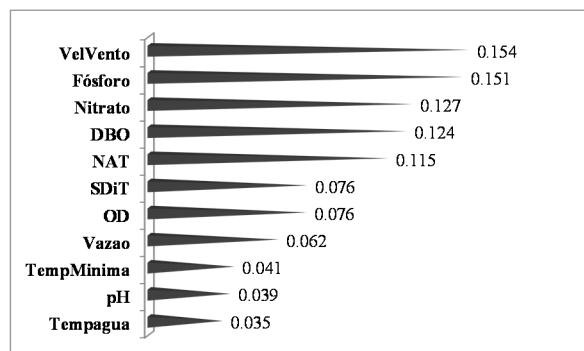


Figura 3 - Representação das cargas por variável na 11ª componente principal.

O valor do ILQA para cada coleta foi calculado utilizando a pontuação obtida pela variável ao invés da medida numérica original e os critérios adotados estão apresentados na Tabela 2.

Os resultados do Índice Local de Qualidade das Águas mostraram que 1,9% das coletas foram classificadas como “Excelente”, 72,9% apresentaram valor “Bom”, 15,6% “Aceitável”, 9,1% “Regular” e 0,3% “Inaceitável”.

O teste não paramétrico Kruskal-Wallis H indicou que o índice depende do reservatório ($p=0,001$), do ponto de coleta ($p=0,004$), ano ($p=0,001$) e mês ($p=0,000$). Os diferentes box-plot estão apresentados nas Figuras 4 a 7.

O reservatório de Jaguara apresenta melhor qualidade de águas (valores maiores do ILQA) por receber menos esgotos domésticos e efluentes industriais (Figura 4).

Entre os pontos de amostragem, os que apresentaram pior qualidade das águas foram BG057 e VG161, inseridos na área do Distrito Industrial III de Uberaba e recebendo efluentes industriais, e a estação IG140, que sofre o impacto do esgoto do município de Igarapava. Em 2008 foi construída a ETE do município, o que causou melhoria na qualidade da água, mas não o suficiente, devido aos esgotos clandestinos (Figura 5).

No início do monitoramento (1997-2000) ocorreram baixos valores do índice devido ao enchimento do reservatório de Igarapava, o que implica em matéria orgânica em decomposição. Baixos valores ocorreram também entre 2006 e 2008 quando houve mudança no uso e ocupação do solo na região e a montante (Figura 6). Nessa região, houve expansão na área de plantação de cana-de-açúcar sobre as pastagens e lavouras temporárias. No início (1997) existia na região a mais tradicional atividade do Cerrado, a bovinocultura, com relativa estabilidade de rebanho entre 1974 e 2003, que sofreu significativa redução entre 2004 e 2006, se mantendo no patamar de redução até o final de 2012 [47]. Conforme discutido por Politano e Pissarra (2005) [48], a própria cultura de cana de açúcar, por suas características fisionômicas e sistemas de plantio, contribui para a conservação do solo, dificultando a ação erosiva da água das chuvas [49,50]. Mas, na fase inicial de desenvolvimento da cultura, durante o preparo do solo, este permanece exposto por um período prolongado, facilitando a incidência de processos erosivos intensos e/ou muito intensos, na forma de ravinas ou sulcos, o que pode comprometer a qualidade das águas na região em que ocorre o preparo [47]. Valores baixos do índice em 1997 e 1998 são devidos às obras finais de Igarapava.

Podem ser observados que valores mais baixos de ILQA (piores condições) ocorrem no período de seca (entre abril e setembro). O menor volume de água causa o aumento da concentração dos contaminadores (Figura 7).

Tabela 2– Critérios adotados para categorizar as variáveis no estabelecimento do ILQA

CLASSIFICAÇÃO	EXCELENTE	BOM	ACEITÁVEL	REGULAR	INACEITÁVEL
Pontuação	5	4	3	2	1
DBO ^a	<5,0	5,0 - 5,5	5,5 - 6,0	6,0 - 6,5	>6,5
P ^a	<0,1	0,10 - 0,15	0,15 - 0,2	0,20 - 0,30	>0,3
Nitrato ^a	<10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	>25
NAT ^a	<3,7 para pH ≤ 7,5	3,7 - 4 para pH ≤ 7,5	4,0 - 5,0 para pH ≤ 7,5	5,0 - 6,0 para pH ≤ 7,5	>6 para pH ≤ 7,5
	<2,0 para 7,5 < pH ≤ 8,0	2,0 - 3,0 para 7,5 < pH ≤ 8,0	3,0 - 4,0 para 7,5 < pH ≤ 8,0	4,0 - 4,5 para 7,5 < pH ≤ 8,0	>4,5 para 7,5 < pH ≤ 8,0
	<1,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5	1,0 - 2,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5	2,0 - 2,5 para 8,0 < pH ≤ 8,5	2,5 - 3,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5	<3,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5
	<0,5 para pH > 8,5	0,5 - 1,0 para pH > 8,5	1,0 - 1,5 para pH > 8,5	1,5 - 2,0 para pH > 8,5	>2,0 para pH > 8,5
OD ^a	>5,0	5,0 - 4,0	4,0 - 3,0	3,0 - 2,0	<2,0
pH ^a	6,0 - 9,0	5,5 - 6,0	5,0 - 5,5	4,5 - 5,0	<4,5
		9,0 - 9,5	9,5 - 10,0	10,0 - 10,5	>10,5
SDT ^a	<500	500 - 700	600 - 700	700 - 800	>800
Temperatura água ^b	>27,6	26,1 - 27,6	22,7 - 26,1	20,5 - 22,7	<20,5
Temperatura Mínima ^b	>21	20 - 21	13,4 - 20	10 - 13,4	<10
Velocidade Vento ^b	> 20	10 - 20	1,2 - 10	0,1 - 1,2	<0,1
Vazão ^b	>1922	1174 - 1922	443 - 1174	319 - 443	<319

a – Baseado na Resolução DN COPAM-CERH 01/08 para corpos d'água de classe 2 b - Valores relacionados aos quartis Q0,05, Q1, Q3 e Q0.95

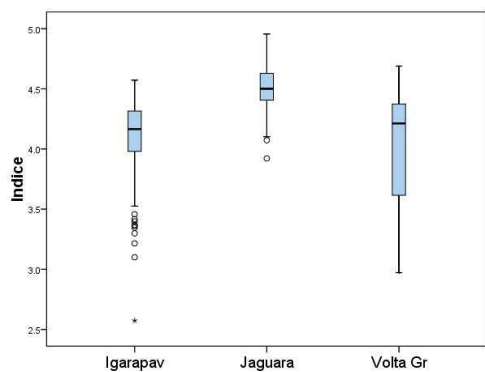


Figura 4 - Relação entre Reservatório hidrelétrico e o Índice ILQA

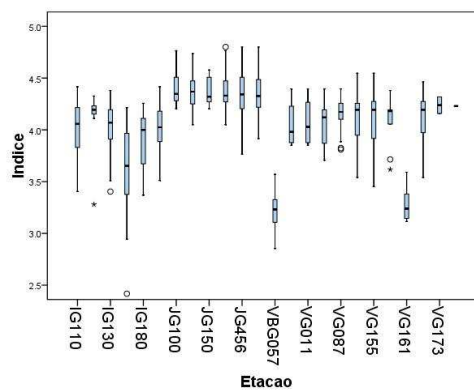


Figura 5 - Relação entre ponto de coleta e o Índice ILQA

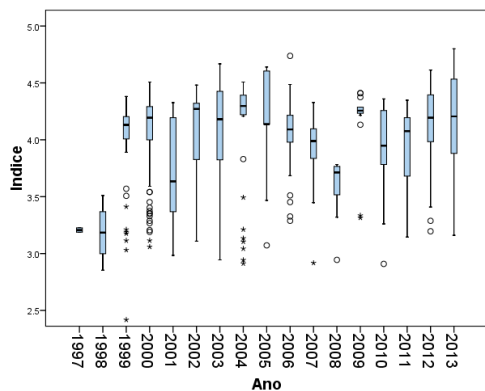


Figura 6 Relação entre o ano de coleta e o Índice ILQA

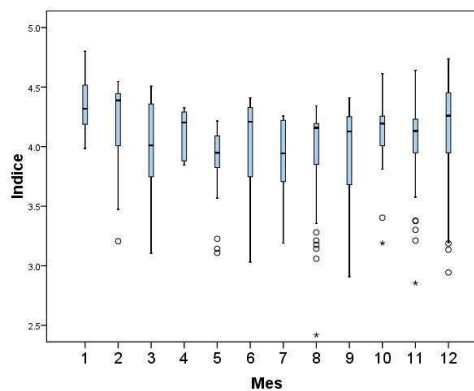


Figura7 Relação entre o mês de coleta e o Índice ILQA

O estudo de séries temporais foi executado para os locais mais contaminados e para os contaminadores mais críticos em cada local. O ponto de coleta BG057 fica situado próximo à indústria de fertilizante, na qual está localizada a pilha de fosfógeno (Figura 8)[51].

O fosfógeno, subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, é produzido em grande escala no Brasil. Embora a composição do fosfógeno seja basicamente de cálcio dihidratado, o material pode conter níveis elevados de impurezas que provêm da rocha fosfática que é usada como matéria prima na produção de fertilizantes. Entre as impurezas, têm-se, por exemplo: Cd, As, Pb, Cr e Zi, os fluoretos e os radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório [52,53]. A forma mais comum de descarte deste resíduo é a sua disposição em pilhas em áreas próximas às fábricas. Entretanto, esta prática pode representar um risco potencial de contaminação ambiental [54,55]. Por este motivo o contaminador mais crítico no local é o fósforo e o estudo de serie temporal foi feito para este elemento, utilizando a transformação “clr”. O modelo que apresentou melhores resultados foi o SARIMA (1,0,2)(2,0,2)₄. A Figura 9 indica que não há tendência de melhoria da qualidade das águas, ou seja, diminuição da concentração do contaminador.



Figura 8 - Pilha de fosfógeno em indústria de fertilizantes nas proximidades do ponto BG057

Fonte: autor

“... segundo dados da própria Vale Fertilizantes, para cada tonelada de ácido fosfórico produzido pela empresa, resultam cerca de 4,8 toneladas de fosfógeno, um rejeito com traços de radioatividade. Das mais de três milhões de toneladas de fosfógeno produzidas por ano, apenas 0,8 milhão tem comercialização para uso agrícola. O restante é acumulado numa pilha, com 120 hectares de área e 57 metros de altura, o equivalente a um edifício de 19 andares. Essa pilha gigantesca de rejeitos químicos está depositada em área de preservação permanente, às margens do rio Grande, integrante de uma das mais importantes bacias hidrográficas da região central do país”[56].

No ponto de coleta IG140 os principais contaminadores são os coliformes termotolerantes, devido a presença de esgotos. O estudo de série temporal foi realizado para variável, utilizando a transformação “clr”. O modelo que apresentou melhores resultados foi o SARIMA (0,0,2)(1,0,2)₄. A Figura 10 indica que não há tendência a melhoria da qualidade das águas, ou seja, diminuição da concentração do contaminador.

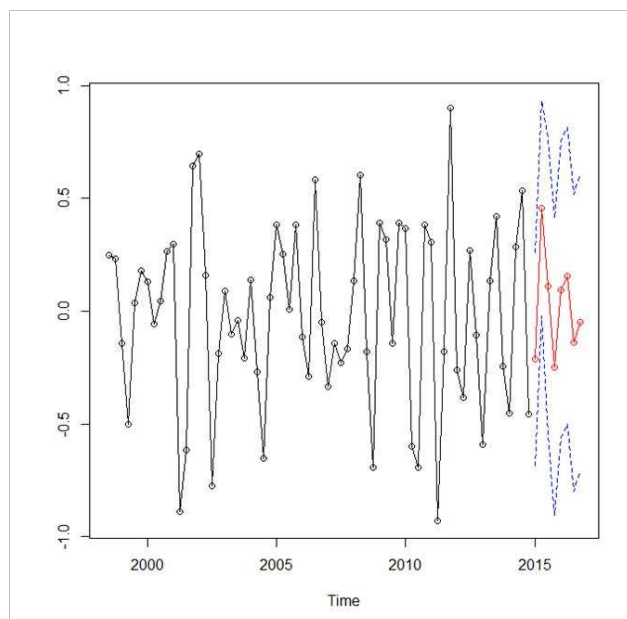


Figura 9 – Serie temporal e previsão da distribuição do fósforo no ponto de coleta BG057 utilizando modelo SARIMA (1,0,2)(2,0,2)₄

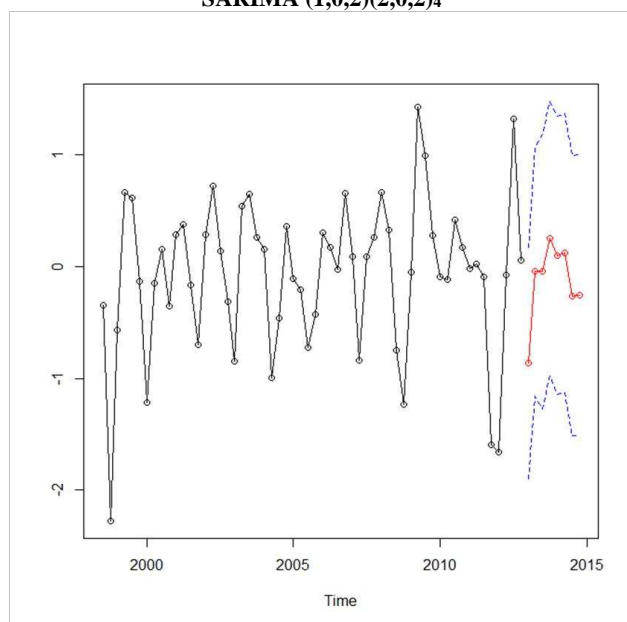


Figura 10 – Serie temporal e previsão da distribuição de coliformes termotolerantes no ponto de coleta IG140 utilizando modelo SARIMA (0,0,2)(1,0,2)₄

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como finalidade propor índices de qualidade da água para os reservatórios de Jaguará, Igarapava e Volta Grande.

Os resultados mostraram que o ILQA tem se mantido entre “Bom” e “Aceitável” exceto nos pontos BG057 e VG161, no Córrego Gameleira, localizado no Setor Industrial de Uberaba e IG140, localizado no Córrego Santa Rita que recebe esgoto do Município Igarapava. Estes pontos, assim como os demais devem continuar sendo monitorados e devem ser tomadas providências para melhoria da qualidade da água.

O trabalho visou também mostrar como as técnicas de Análise de Componentes Principais Robustas, Análise de Agrupamento e Séries Temporais podem auxiliar na construção de índices e na avaliação da qualidade das águas. A metodologia sugerida pode ser utilizada em outros reservatórios por ser adequada a diferentes bancos de dados.

Sugerimos que além dos ILQA, também na região sejam utilizados o IQAR e para isso deverão ser analisadas as variáveis necessárias para o cálculo do mesmo.

A frequência de monitoramento deve ser seguida criteriosamente, pois falhas podem impedir as análises das séries históricas, verificação de tendências impedindo tomada de decisões importantes na gestão dos reservatórios.

Para a melhoria da qualidade das águas é indispensável, pelo menos, a instalação de estação de tratamento de efluentes nas indústrias que lançam rejeitos no Córrego Gameleira e construção de rede de esgotos no município Igarapava.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG); ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e PUC Minas o financiamento e apoio a esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] M. R. R. N. Bessa, I. d. S. Nogueira, A. d. O. Araújo, "Avaliação da qualidade da água bruta em alguns mananciais do Estado de Goiás, no período de 1998-99", Em: **Américas y la acción por el medio ambiente en el milenio**, 2000, pp. 1-10.
- [02] M. Keene, A. S. Pullin, "Realizing an effectiveness revolution in environmental management", **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2130-2135, 2011.
- [03] M. J. Clark, D. D. MacDonald, P. H. Whitfield, M. P. Wong, "Designing monitoring programs for water quality based on experience in Canada II. Characterization of problems and data-quality objectives", **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, vol. 29, pp. 385-398, 2010.
- [04] C. R. Levine, R. D. Yanai, G. G. Lampman, D. A. Burns, C. T. Driscoll, G. B. Lawrence, *et al.*, "Evaluating the efficiency of environmental monitoring programs," **Ecological Indicators**, vol. 39, pp. 94-101, 2014.
- [05] A. Mostafaei, "Application of multivariate statistical methods and water-quality index to evaluation of water quality in the Kashkan River", **Environmental management**, vol. 53, pp. 865-881, 2014.
- [06] D. B. Lindenmayer and G. E. Likens, "The science and application of ecological monitoring", **Biological Conservation**, vol. 143, pp. 1317-1328, 2010.
- [07] A. Lehmann and M. Rode, "Long-term behaviour and cross-correlation water quality analysis of the river Elbe, Germany", **Water Research**, vol. 35, pp. 2153-2160, 2001.
- [08] A. Malm, O. Ljunggren, O. Bergstedt, T. J. Pettersson, G. M. Morrison, "Replacement predictions for drinking water networks through historical data", **Water research**, vol. 46, pp. 2149-2158, 2012.
- [09] CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. [Online]. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/>.
- [10] Consórcio da Usina Hidrelétrica de Igarapava. [Online]. Disponível em: <http://www.uhe-igarapava.com.br/>.
- [11] IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. [Online]. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/>.
- [12] M. Reid and K. Spencer, "Use of principal components analysis (PCA) on estuarine sediment datasets: The effect of data pre-treatment", **Environmental Pollution**, vol. 157, pp. 2275-2281, 2009.
- [13] C. Reimann, P. Filzmoser, R. Garrett, R. Dutter, **Statistical data analysis explained. Applied environmental statistics with R**, 1a ed., Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [14] R Core Team. (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Online]. Disponível em: <http://www.R-project.org/>.
- [15] P. Filzmoser. (2015). **StatDA: Statistical Analysis for Environmental Data**: R package version 1.6.9. [Online]. Disponível em: <http://cran.r-project.org/web/packages/StatDA/StatDA.pdf>.
- [16] H. Wickham, **ggplot2: elegant graphics for data analysis**, New York: Springer Science & Business Media., 2009.
- [17] B. Schloerke, J. Crowley, D. Cook, H. Hofmann, H. Wickham, F. Briatte, M. Marbach, E. Thoen. (2014). **GGally: Extension to ggplot2**. R package version 0.5.0. [Online]. Disponível em: <http://cran.r-project.org/web/packages/GGally/GGally.pdf>.
- [18] V. Todorov and P. Filzmoser, "An object oriented framework for robust multivariate analysis", **Journal of Statistical Software**, vol.32, pp.1-47, 2009.
- [19] A. Trapletti. (2015). **tseries: Time Series Analysis and Computational Finance**. R package version 0.10-34. [Online]. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/tseries/>.
- [20] R.J. Hyndman. (2015). **forecast: Forecasting functions for time series and linear models**. R package version 6.1. [Online]. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/forecast/>.
- [21] D. Qiu. (2015). **aTSA: Alternative Time Series Analysis**. R package version 3.1.2. [Online]. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/aTSA/>.
- [22] J. Ulrich. (2015). **TTR: Technical Trading Rules**. R package version 0.23-0. [Online]. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/TTR/>.
- [23] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)", **Biometrika**, pp. 591-611, 1965.
- [24] V. Todorov and P. Filzmoser, "An object oriented framework for robust multivariate analysis", **Journal of Statistical Software**, vol.32, pp.1-47, 2009.
- [25] F. R. Hampel, E. M., Ronchetti, P. J. Rousseeuw, W. A. Stahel, **Robust statistics: the approach based on influence functions**, New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [26] S. A. Mingoti, **Análise de dados através de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**, 1a ed., Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005.
- [27] Y. Rong, **Practical environmental statistics and data analysis**, ILM Publications, 2011.
- [28] A. Akkoyunlu and M. E. Akiner, "Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey's Sapanca Lake Basin", **Ecological Indicators**, vol. 18, pp. 501-511, 2012.
- [29] A. Munné and N. Prat, "Effects of Mediterranean climate annual variability on stream biological quality assessment using macroinvertebrate communities", **Ecological Indicators**, vol. 11, pp. 651-662, 2011.
- [30] J. C. Flores, "Comments to the use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia river", **Water research**, vol. 36, pp. 4664-4666, 2002.
- [31] COPAM. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008**. [Online]. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>.
- [32] S. A. Mingoti, V. de Aquino, F. A. Barbosa, P. M. Barbosa, M. B. dos Santos, "Índices físico-químico e biológico de

- qualidade de água do rio Piracicaba e parte do médio rio Doce: uma primeira aproximação”, **Revista de matemática e estatística**, vol.16, pp. 9-30, 1998.
- [33] P. Sprent and N. C. Smeeton, **Applied nonparametric statistical methods**, 4a ed., Boca Raton-FL: Taylor & Francis Group- LLC, 2007.
- [34] **DJ. Sheskin**, Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures, **5a ed. Boca Raton -FL: Chapman & Hall, 2011.**
- [35] J. Alferes, J. Copp, and P. A. Vanrolleghem, "Forecasting Techniques Applied To Water Quality Time Series In View Of Data Quality Assessment", Em: **International Conference on Hydroinformatics**, 2014, pp.427. [Online]. Disponível em: http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/427.
- [36] P. J. Brockwell and R. A. Davis, **Time series: theory and methods**. Springer Science & Business Media, 2013.
- [37] D. Puthran, H. Shivaprasad, K. K. Kumar, M. Manjunath, "Comparing SARIMA and Holt-Winters' forecasting accuracy with respect to Indian motorcycle industry", **Transactions on Engineering and Sciences**, vol. 2, pp. 25-28, 2014.
- [38] A. Coghlan. **A Little Book of R For Time Series**, Cambridg: Trust Sanger Institute, 2014. [Online]. Disponível em: <https://media.readthedocs.org/pdf/a-little-book-of-r-for-time-series/latest/a-little-book-of-r-for-time-series.pdf> .
- [39] S. G. Gocheva-Ilieva, A. V. Ivanov, D. S. Voynikova, D. T. Boyadzhiev, "Time series analysis and forecasting for air pollution in small urban area: an SARIMA and factor analysis approach", **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, vol. 28, pp. 1045-1060, 2014.
- [40] P. A. Morettin, C. M. C. Tolo, **Análise de Séries Temporais**, 2a ed., São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006.
- [41] B. Shirmohammadi, M. Vafakhah, V. Moosavi, and A. Moghaddamnia, "Application of several data-driven techniques for predicting groundwater level", **Water Resources Management**, vol. 27, pp. 419-432, 2013.
- [42] C.E.M. BICUDO, D.C. BICUDO, **Amostragem em Limnologia**, 1a ed, São Carlos-SP : RiMa, 2004.
- [43] USEPA - U.S. Environmental Protection Agency, **Proposed Rules**, Federal Register o. 244,1979.
- [44] J. Bartram and R. Ballance, **Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes**. London : E & FN Spon for UNEP and WHO, 1996.
- [45] R. T. James and V. J. Bierman, "A preliminary modeling analysis of water quality in Lake Okeechobee, Florida: calibration results”, **Water Research**, vol. 29, pp. 2755-2766, 1995.
- [46] IGAM, **Monitoramento das águas superficiais na Bacia Grande: Relatório anual 2009**, Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão Das Águas, 2010. [Online] . Disponível em: http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=113&Itemid=173.
- [47] E. N. Guimarães, **Série Relatórios Metodológicos: PIB dos Municípios**, Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- [48] T. Pissarra, W. Politano, and A. Ferraudo, "Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP)”, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.25, pp. 297-305, 2004.
- [49] W. Barros, **Plantas na conservação dos solos brasileiros**, Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Informações Agrícolas do Ministério da Agricultura, 1961.
- [50] R.D. Forbes, **Aerial photography (uses of aerial photographs in forestry**, New York: Society American Foresters, 1961.
- [51] C. V. Noronha, C. V. S. Sabino, L. V. Lage, "Qualidade das águas em um ponto do córrego gameleiras no município de Uberaba/MG (1997 a 2012)", Em: **VI Congresso Iberoamericano de Estudios Territoriales y Ambientales**, 2014.
- [52] S. D. S. Cota, V. M. F. Jacomino, M. H. T. Taddei, M. R. Nascimento, "Modelagem numérica do impacto ambiental associado à aplicação de fosfogesso como cobertura de aterros sanitários”, **Águas Subterrâneas**, vol. 26, pp. 27-42, 2012.
- [53] M. Villa, F. Mosqueda, S. Hurtado, J. Mantero, G. Manjón, R. Periañez, *et al.*, "Contamination and restoration of an estuary affected by phosphogypsum releases”, **Science of the total environment**, vol. 408, pp. 69-77, 2009.
- [54] L. Al Attar, M. Al-Oudat, S. Kanakri, Y. Budeir, H. Khalily, A. Al Hamwi, "Radiological impacts of phosphogypsum”, **Journal of environmental management**, vol. 92, pp. 2151-2158, 2011.
- [55] H. El-Didamony, H. Gado, N. Awwad, M. Fawzy, M. Attallah, "Treatment of phosphogypsum waste produced from phosphate ore processing”, **Journal of hazardous materials**, vol. 244, pp. 596-602, 2013.
- [56] J M on line. **Vale Fertilizantes tem de cumprir medidas ambientais**. [Online]. Disponível em: <http://www.jmonline.com.br/novo/?noticias,1,GERAL,41806>