



I-022 - ANÁLISE DAS VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA NO ESTADO DE SÃO PAULO (BRASIL)

Aline Alves Sanchez⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Urbana pela Universidade Federal do ABC (UFABC). Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela UFABC.

Roseli Frederigi Benassi⁽²⁾

Professora Dra., CECS, Universidade Federal do ABC - email: roseli.benassi@ufabc.edu.br

Andréa de Oliveira Cardoso⁽³⁾

Professora Dra., CECS, Universidade Federal do ABC - email: andrea.cardoso@ufabc.edu.br

Endereço⁽¹⁾: Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC (CECS - UFABC), Av. dos Estados, 5001, Bloco A, 6º andar - Bairro Bangu - Santo André - SP - CEP: 09210-580 - Brasil - e-mail: alineasanchez@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo analisar as principais variáveis limnológicas e o Índice de Qualidade de Água (IQA) utilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em toda a rede de monitoramento básica do Estado de São Paulo, bem como avaliar quais são as variáveis de maior relevância para o IQA, propondo um índice simplificado que utilize menos variáveis sem perder sua significância. Para tanto, foram utilizados os dados disponibilizados no relatório do ano de 2014 da CETESB. Analisou-se sete variáveis limnológicas, são elas: condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido (OD), nitrato, nitrogênio amoniacal, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e fósforo. Utilizou-se um conjunto de dados composto por 408 pontos de amostragem da rede básica de monitoramento da CETESB distribuídos ao longo das 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos que compõem o Estado de São Paulo. Foram realizadas análises estatísticas descritivas a partir do cálculo da média, desvio padrão, coeficiente de variação e limiares quantílicos de extremos, visando compreender o padrão das variáveis. Posteriormente, realizou-se as análises de correlação e de regressão linear múltipla. O panorama geral das variáveis limnológicas indica que os corpos hídricos estão sofrendo um progressivo processo de redução da qualidade da água, uma vez que a maioria dos parâmetros apresentam valores acima dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05. Os elevados valores de DBO e fósforo indicam que há, provavelmente, a ocorrência do processo de eutrofização na maioria dos corpos hídrico monitorados pela CETESB. Com relação ao índice, as variáveis turbidez e nitrato não apresentaram correlação com o IQA. Ademais, através da análise de regressão linear múltipla, o presente estudo desenvolveu um novo modelo para a equação do IQA, com bom coeficiente de explicação (83%), incluindo um número reduzido de variáveis, apenas turbidez, nitrogênio amoniacal, OD, DBO e fósforo.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade de água, variáveis limnológicas, IQA, regressão linear múltipla.

INTRODUÇÃO

A água é o elemento natural que nos mantém vivos, controla o clima, esculpe os relevos, forma os rios, mares e lagos, remove e dilui resíduos. Ainda, é responsável por manter o equilíbrio dos ecossistemas e é também fundamental à manutenção dos ciclos biogeoquímicos da Terra (CAPOBIANCO, 2007).

Essencial à manutenção da vida em nosso planeta, a água cobre cerca de 70% da superfície terrestre. Desse total apenas 2,6% é água doce, ou seja, apresenta teor de sólidos totais dissolvidos inferior a 1 g/L (TUNDISI, 2006). Ainda assim, não temos acesso a toda essa água doce, pois a maior parte encontra-se em calotas polares, geleiras e reservatórios subterrâneos. Sendo assim, das 265.400 trilhões de toneladas de água distribuídas pelo mundo, apenas 0,014% encontra-se disponível para consumo humano (BRAGA et al., 2005). Nesse contexto, pode-se inferir que a água doce é um recurso muito escasso. No entanto, no cenário mundial, o Brasil possui uma posição privilegiada em relação à disponibilidade hídrica. Apesar de sua distribuição irregular, aproximadamente 16% da água doce de todo o planeta está concentrada em território brasileiro (MILLER, 2007).



Sabe-se que a água é um dos recursos naturais mais utilizados. Sendo assim, pode-se dizer que a água possui usos múltiplos, ou seja, é empregada de diversas formas. Dentre esses usos destacam-se o abastecimento humano, o abastecimento industrial, a geração de energia elétrica, a irrigação, a navegação e o lazer (BRAGA et al., 2005; TUNDISI, 2006). Assim sendo, pode-se afirmar que os recursos hídricos possuem grande significado ecológico, social e econômico.

A crescente demanda por água nos diversos setores da sociedade, o uso irracional e desperdício desse recurso, bem como a constante interferência antrópica no meio ambiente, têm causado impactos diretos e indiretos para a qualidade da água, a biota e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos.

Assim, para um uso seguro, ou seja, sem riscos para a saúde humana ou comprometimento da atividade realizada, a água deve estar em condições adequadas. Para isso, faz-se necessário um monitoramento da qualidade da água não só a curto, mas também a longo prazo. Garantindo assim que a qualidade da água seja mantida no nível exigido para que seu uso não seja comprometido.

Para controlar a poluição e a qualidade da água de rios e reservatórios foram criadas normas, procedimentos e padrões de qualidade para cada tipo de manancial e para cada uso. A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005) estabelece normas, padrões e parâmetros para preservação da vida aquática, enquanto que os padrões de potabilidade são estabelecidos pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

Sabe-se que as águas apresentam qualidades variadas, que dependem diretamente do ambiente de origem, da onde circulam, percolam e até mesmo onde são armazenadas (TUNDISI et al., 2006). Nesse contexto, existem os indicadores físicos, químicos e biológicos que auxiliam na caracterização a qualidade da água. As variáveis químicas são geralmente expressas em concentração, as biológicas, pela indicação da densidade da população do organismo que se interessa analisar, e por fim, as variáveis físicas são medidas em escala próprias.

Os indicadores mais utilizados são (BRAGA et al., 2005):

- Químicos: salinidade, dureza, alcalinidade, corrosividade, Ferro, manganês, impurezas orgânicas, Nitrogênio, Cloretos, pH, Fósforos, Oxigênio Dissolvido, matéria orgânica;
- Físicos: cor, turbidez, odor, temperatura, sólidos em suspensão ou dissolvidos, condutividade elétrica;
- Biológicos: algas e microrganismos patogênicos.

Vale lembrar que dependendo da área que se quer analisar, um indicador pode ser mais relevante que o outro, ou até mesmo insignificante para expressar a qualidade de água naquele local.

No entanto, alguns processos de análises podem se tornar cada vez mais complexos devido ao número de variáveis a considerar e suas diferentes características, assim os órgãos gestores dos recursos hídricos passaram a utilizar índices. Esse método é muito utilizado por resumir em um único resultado o estado em que se encontra o ambiente e por facilitar a avaliação da qualidade da água no tempo e no espaço.

Segundo a CETESB (2014), no contexto da crescente preocupação social com os aspectos ambientais do desenvolvimento e da difícil tarefa de trabalhar com volumes muito grandes de dados e variáveis, surgiram os índices. Os índices são o resultado da combinação de um conjunto de parâmetros ou indicadores associados uns aos outros por meio de uma relação pré-estabelecida que dá origem a um novo e único valor.

Além de representar diversas variáveis em um único número, a utilização dos índices também possui mais vantagens, dentre elas destacam-se: a facilidade de comunicação com o público leigo, o status maior do que as variáveis isoladas e o fato de representar uma média. Entretanto, há perdas de informações das variáveis individuais e de suas alterações, ou seja, para um determinado estudo de qualidade de água possuir maior confiabilidade é necessária uma avaliação mais detalhada, não apenas restrita aos índices.

Tendo em vista todo o contexto apresentado, o presente trabalho teve por objetivo analisar o panorama geral das principais variáveis limnológicas e do Índice de Qualidade de Água (IQA) em toda a rede de monitoramento básica do Estado de São Paulo, bem como avaliar quais são as variáveis de maior relevância para o IQA.



O presente estudo tem como principal justificativa integrar os conhecimentos científicos com os dados gerados, de forma a oferecer informações que possam servir como subsídios para avaliação do IQA e sugerir possíveis modificações que facilitem a operação de monitoramento minimizando o número de parâmetros analisados, mantendo um mesmo grau de confiabilidade para o índice. Outro aspecto a ser levado em conta com relação a este trabalho é que não há registros na literatura de estudos com tal objetivo e propósito. Assim, pretende-se introduzir essa linha de pesquisa e servir como subsídio para estudos subsequentes mais aprofundados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados no presente trabalho foram obtidos na série de relatórios de qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo do ano de 2014 elaborado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Tais documentos estão disponibilizados no próprio site da companhia. Foram analisadas sete variáveis limnológicas: condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido (OD), nitrato, nitrogênio amoniacal (N amoniacal), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e fósforo (P).

Já o índice analisado foi o IQA, desenvolvido pela CETESB em 1975, com vistas a fornecer informação básica de qualidade de água para o público em geral, bem como para o gerenciamento ambiental das 22 Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. O índice utiliza nove variáveis: condutividade elétrica, turbidez, OD, nitrato, nitrogênio amoniacal, DBO, fósforo, coliformes fecais e clorofila a. Os valores do IQA variam de 0 a 100 e é calculado com base no produtório ponderado entre as variáveis que compõem o índice, segundo a equação (1) (CETESB, 2014).

$$IQA = \prod_{i=1}^p q_i^{w_i} \quad \text{equação (1)}$$

em que,

q_i : qualidade do i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida;

w_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade.

As curvas médias de variação de qualidade para todas as nove variáveis, bem como seus respectivos pesos podem ser encontrados na série de relatórios publicados anualmente pela CETESB.

Uma vez realizados os cálculos, o corpo hídrico pode ser enquadrado em uma das cinco categorias do IQA segundo a tabela 1.

Tabela 1: Classificação do IQA.

Categoria	Faixa de IQA
Ótima	$79 < IQA \leq 100$
Boa	$51 < IQA \leq 79$
Regular	$36 < IQA \leq 51$
Ruim	$19 < IQA \leq 36$
Péssima	$IQA \leq 19$

Fonte: Modificado de CETESB, 2014.

No estudo foi utilizado um conjunto de dados composto por 408 pontos de amostragem da rede básica de monitoramento da CETESB distribuídos ao longo das 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos que compõem o Estado de São Paulo. Para cada ponto utilizou-se a média anual das variáveis condutividade elétrica, turbidez, concentrações de nitrato, nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido, DBO, fósforo e IQA.

Primeiramente, foram realizadas análises estatísticas descritivas a partir do cálculo da média, desvio padrão, coeficiente de variação e limiares quantílicos de extremos, visando compreender o padrão das variáveis. As análises estatísticas mencionadas foram realizadas considerando as 408 estações de monitoramento da

CETESB, ou seja, obteve-se uma média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada uma das variáveis com base nos 408 valores. A série de dados utilizada estava organizada por estação de monitoramento e por variável, ou seja, uma matriz de 408 linhas (estações) e 8 colunas (variáveis). Posteriormente, foram realizadas as análises de correlação e de regressão linear múltipla. Para avaliar a significância da correlação foi aplicado o teste t de Student ao nível de significância de 0,05 (ou seja, ao nível de confiança de 95%). Para a condução das análises dos dados utilizou-se o software Matlab.

Vale destacar que embora o IQA utilize as variáveis coliformes fecais e clorofila a, tais parâmetros não foram considerados no estudo, pois não havia dados dessas variáveis para todos os pontos amostrados considerados para a análise, e o software Matlab não trabalha com série com dados faltantes.

RESULTADOS

A figura 1 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. A condutividade média encontrada está próxima dos 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Já o desvio padrão foi de aproximadamente 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando uma elevada magnitude do espalhamento ou da dispersão dos dados em relação à média. O coeficiente de variação, embora não muito aparente no gráfico devido à escala, apresentou um valor igual a 4,4, evidenciando um baixíssimo grau de concentração dos dados ao redor da média, ou seja, a série de dados possui uma alta dispersão.

Sabe-se que a condutividade representa a capacidade da água em conduzir corrente elétrica, sendo função da concentração dos íons presentes e da temperatura da coluna d'água. A condutividade aumenta à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados, ou seja, mais íons estarão disponíveis no corpo d'água. Assim, a medição da condutividade pode ser um indicativo indireto da concentração de poluentes. Vale ressaltar que níveis superiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indicam ambientes impactados, e ainda, altos valores podem indicar características corrosivas da água (CETESB, 2009). Portanto, pode-se afirmar que em média os pontos amostrados pela CETESB apresentam níveis superiores aos indicados para corpos de boa qualidade, ou seja boa parte dos dados apresentam valores bem acima do nível de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando que tais ambientes estão impactados e podem ter seus usos comprometidos.

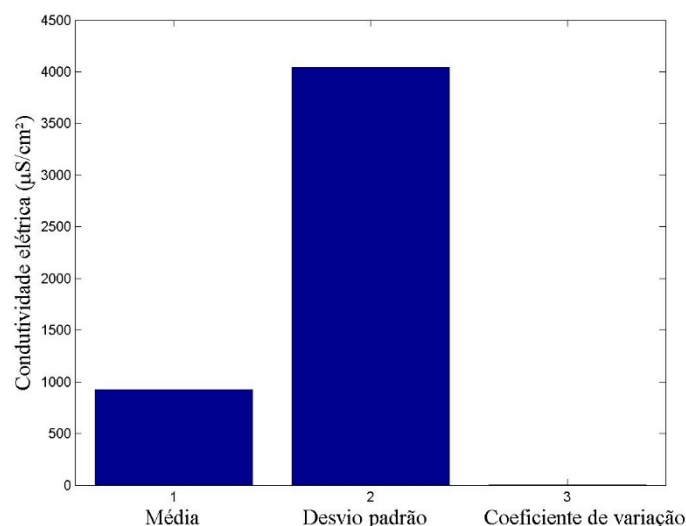


Figura 1: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 2 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da turbidez (UNT) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. A média da turbidez dos pontos amostrados é aproximadamente 30 UNT e o desvio padrão está próximo das 32 UNT. Com base nos limites estipulados pela Resolução CONAMA 357/2005, em média, as estações de amostragem estão dentro do limite de 100 UNT (Classe 3). O coeficiente de variação para esse parâmetro é igual a 1,1, indicando

uma alta dispersão dos dados ao redor da média, ou seja, há uma ocorrência considerável de valores extremos superiores. Tais pontos, provavelmente, apresentam níveis de turbidez acima do permitido na legislação.

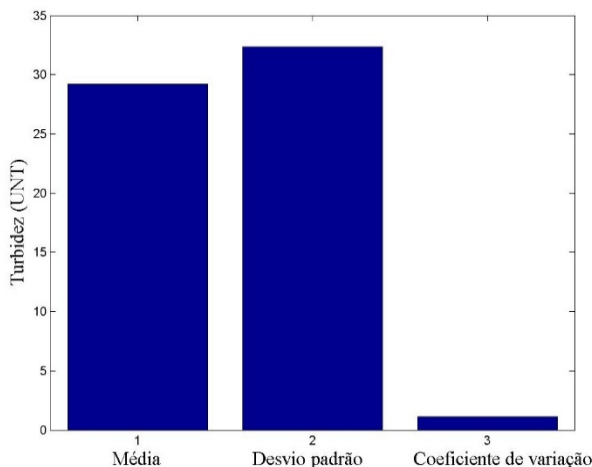


Figura 2: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da turbidez (UNT) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 3 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da concentração de nitrato (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. A partir do gráfico, observa-se que a concentração média de nitrato é aproximadamente 0,8 mg/L. Já o desvio padrão da variável está entorno de 1 mg/L. O coeficiente de variação é superior a 100% indicando uma alta dispersão dos dados, ou seja, a série de dados está bem dispersa com relação à média. Uma vez que a resolução CONAMA 357/2005 estipula um valor máximo de 10 mg/L de nitrato, pode-se inferir que a média de nitrato nos 408 pontos está dentro dos limites estabelecido pelo CONAMA.

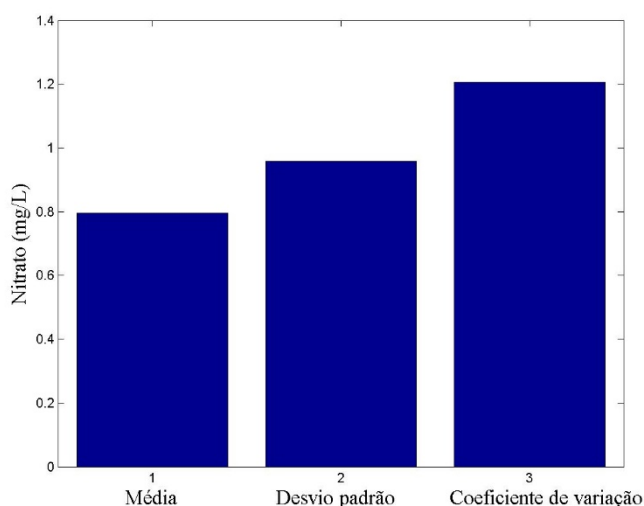


Figura 3: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da concentração de nitrato (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 4 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da concentração do nitrogênio amoniacal nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. De acordo com o gráfico, a concentração média de nitrogênio amoniacal é aproximadamente 3,8 mg/L, enquanto o desvio padrão possui um valor próximo dos 6 mg/L, indicando uma grande variabilidade entre os dados. O coeficiente de variação superior a 1 indica uma alta dispersão dos dados, ou seja, há uma baixíssima concentração dos dados ao redor da média. Ademais, o valor máximo estipulado pela legislação para esse parâmetro é 13,3 mg/L. Portanto, a partir do gráfico pode-se observar que a média da concentração de

nitrogênio amoniacal nos pontos de monitoramento no Estado de São Paulo está abaixo do valor máximo disposto pela Resolução CONAMA 357/2005.

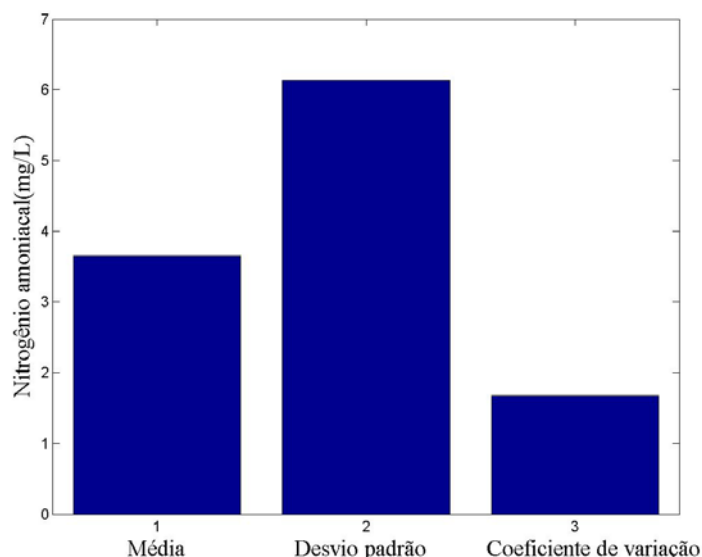


Figura 4: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da concentração de nitrogênio amoniacal (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 5 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da concentração de oxigênio dissolvido (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. A partir do gráfico é possível observar que a concentração média de OD encontrada através das análises foi de aproximadamente 5,5 mg/L. Já o desvio padrão está próximo de 2,5 mg/L. Das variáveis analisadas, o OD foi o único parâmetro que apresentou desvio padrão menor que a média, e, portanto, coeficiente de variação abaixo de 100%. O coeficiente de variação para o OD é 44%, indicando uma alta dispersão dos dados, porém esta dispersão é bem mais reduzida se comparada com a dispersão dos dados para as demais variáveis. Segundo os limites legais estabelecidos para esse parâmetro, os corpos hídricos devem apresentar concentração mínima de 4 mg/L de OD. Assim, a concentração média de OD encontrada está acima do valor mínimo estipulado na legislação.

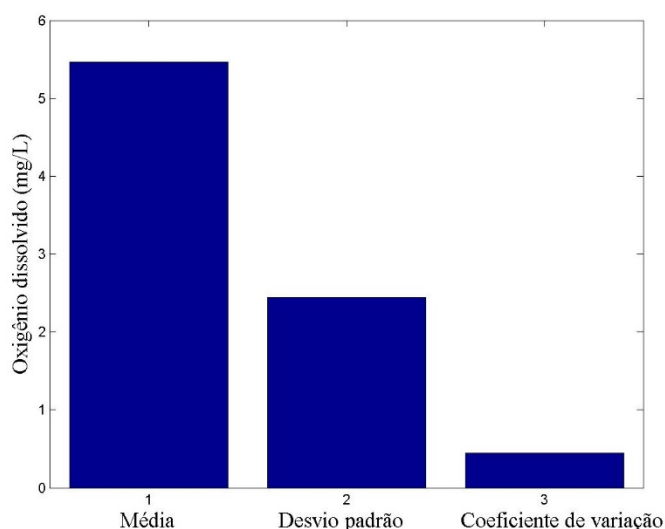


Figura 5: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da concentração de oxigênio dissolvido (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 6 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. A partir do gráfico, é possível observar que a concentração média de DBO é aproximadamente 12 mg/L. Já o desvio padrão encontrado está próximo dos 22 mg/L. O coeficiente de variação, mais uma vez, apresenta valores acima de 100% indicando uma alta dispersão dos dados. Vale destacar que a média de DBO encontrada está acima do valor máximo permitido, 10 mg/L, segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica degradada pela ação de bactérias, sob condições aeróbias controladas. Esse parâmetro fornece informações sobre a fração dos compostos biodegradáveis presentes no efluente. Logo, a DBO é muito utilizada para avaliar o potencial poluidor de efluentes domésticos e industriais e pode ser considerada um ensaio, via oxidação úmida, em que organismos vivos oxidam a matéria orgânica até CO₂ e H₂O. O valor final obtido indica a quantidade de oxigênio que um determinado efluente líquido consumiria de um corpo d'água receptor após seu lançamento, se fosse possível mineralizar toda a matéria orgânica presente. Tendo em vista o embasamento teórico apresentado sobre DBO, é possível inferir que há na amostra corpos de água bem poluídos, e, que, provavelmente, recebem aporte de esgoto não tratado.

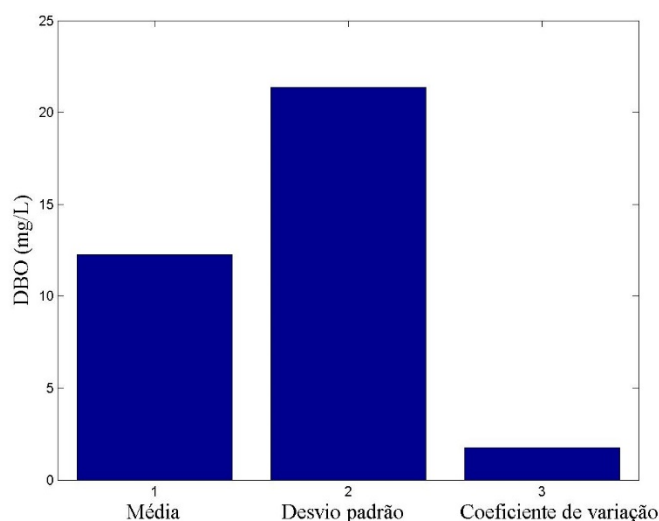


Figura 6: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da concentração da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 7 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da concentração da concentração de fósforo total (mg/L) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. De acordo com o gráfico, a concentração média de fósforo encontrado nos corpos hídricos amostrados é igual a 0,5 mg/L. Já o desvio padrão é, aproximadamente, 1,2 mg/L. Uma vez que o desvio padrão está em níveis bem mais elevados que a média, o coeficiente de variação é maior que 100%, indicando uma elevada dispersão dos dados. Vale destacar que o limite máximo de fósforo admitido pelo CONAMA é 0,15 mg/L. Assim, a média de concentração de fósforo nos pontos de amostragem está bem acima do limite estabelecido pela legislação.

Sabe-se que o fósforo é um dos sais dissolvidos na água fundamentais para a constituição das cadeias alimentares no meio aquático, pois serve como nutriente para os organismos autótrofos (JANSSON et al, 2001). Em geral, é considerado um fator limitante para o crescimento desses organismos, de modo que um aumento excessivo desse sal pode gerar uma proliferação exagerada de algas, fenômeno conhecido por eutrofização (ESTEVES, 2011).

Segundo a CETESB (2009), o fósforo aparece em águas naturais devido, principalmente, às descargas de efluentes sanitários, tanto domésticos (matéria orgânica fecal e os detergentes em pó), quanto industriais.

Destacam-se os efluentes das indústrias de fertilizantes, pesticidas, químicas em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios que eliminam fósforo em excesso. Assim, levando em consideração os elevados níveis de fósforo apresentados pela média e pelo desvio padrão da amostra, pode-se inferir que a grande maioria dos corpos hídricos analisados apresentam grandes alterações em sua composição natural devido a atividades antrópicas.

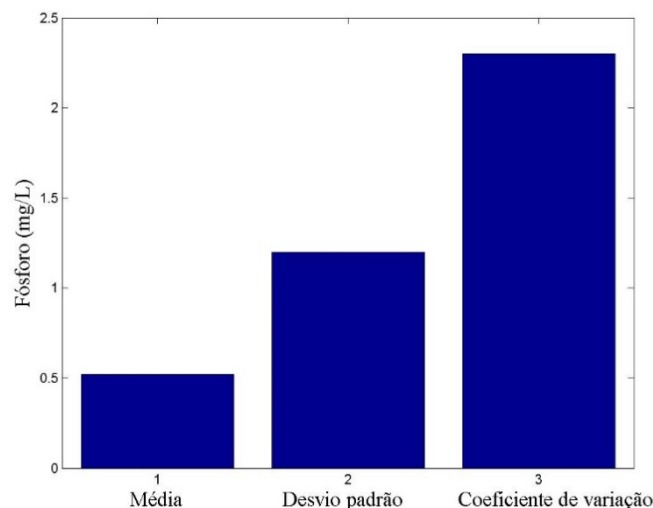


Figura 7: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da concentração de fósforo total nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A figura 7 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação do IQA nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014. A partir do gráfico, observa-se que o IQA médio é aproximadamente 55, sendo enquadrado na categoria de qualidade de água boa. O desvio padrão é aproximadamente 20. Logo, o coeficiente de variação é aproximadamente 37%. Embora indique uma alta dispersão, para o IQA, a dispersão dos dados é inferior à dispersão das variáveis limnológicas.

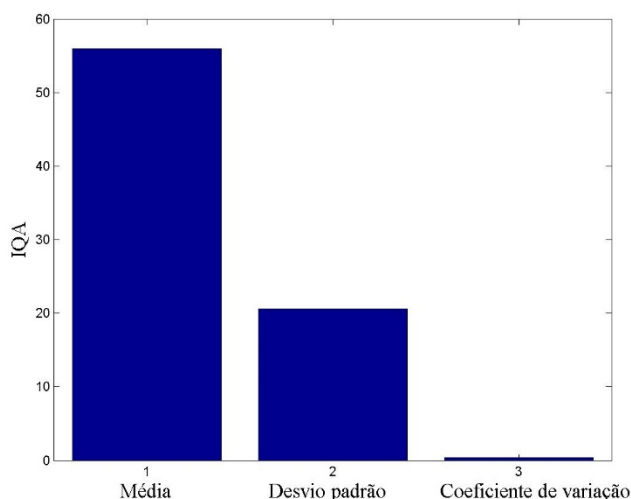


Figura 8: Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Índice de Qualidade de Água (IQA) nos 408 pontos da rede de monitoramento básico da CETESB no Estado de São Paulo no ano de 2014.

A tabela 2 apresenta os limiares quantílicos de extremos (15 e 85%) para as variáveis condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$), turbidez (UNT), nitrato (mg/L), nitrogênio amoniacal (mg/L), OD (mg/L), DBO (mg/L), fósforo (mg/L) e IQA (mg/L). A partir da tabela é possível observar que 15 % das amostras apresentam condutividade elétrica acima de $584,9 \mu\text{S}/\text{cm}$, valor elevado com indicativo de poluição no corpo hídrico. Com relação à turbidez, ao nitrato e ao nitrogênio amoniacal, até mesmo o limiar quantílico superior está dentro do limite

estabelecido pelo CONAMA de (100 UNT, 10 mg/L e 13,3 mg/L, respectivamente), indicando boas condições do corpo d'água com relação a esses parâmetros. Quanto ao oxigênio dissolvido, 15 % das amostras possuem nível de oxigênio menor ou igual a 2,17 mg/L, condições abaixo do limite mínimo de 4 mg/L disposto na Resolução CONAMA 357/2005. Com relação à DBO, 15% dos pontos amostrados possuem valores iguais ou superiores a 17 mg/L, sendo que o valor limite máximo segundo a legislação é 10 mg/L. Quanto ao fósforo, 15 % das amostras possuem valor igual ou acima de 1,1 mg/L, valor superior ao máximo estipulado pelo CONAMA (0,15 mg/L). Já para o IQA, 15% das amostras são enquadradas como boas ou ótimas, IQA igual ou inferior a 29,7, e 15% das amostras são enquadradas como ruins ou péssimas quanto a qualidade de água, IQA igual ou superior a 75. Os demais pontos encontram-se nas categorias intermediárias de qualidade de água.

Tabela 2: Limiares quantílicos de extremos (15 e 85%) para as variáveis condutividade ($\mu\text{S/cm}$), turbidez (UNT), nitrato (mg/L), nitrogênio amoniacal (mg/L), OD (mg/L), DBO (mg/L), fósforo (mg/L) e IQA (mg/L).

	Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	Turbidez (UNT)	Nitrato (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	Fósforo (mg/L)	IQA
Quantil de 15%	53	5,8	0,2	0,14	2,17	2	0,03	29,7
Quantil de 85%	584,9	50,3	1,1	9,49	7,8	17	1,1	75

A tabela 3 apresenta as correlações entre todas as variáveis que a seguir será avaliada quanta a suas respectivas significâncias segundo o teste de hipótese t para correlações.

Tabela 3: Correlações entre as variáveis condutividade, turbidez, nitrato, nitrogênio amoniacal, OD, DBO, fósforo e IQA.

Condutividade elétrica	Turbidez	Nitrato	Nitrogênio Amoniacal	OD	DBO	Fósforo	IQA
1,00	-0,07	-0,05	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01
-0,07	1,00	-0,01	0,46	-0,32	0,52	0,29	-0,50
-0,05	-0,01	1,00	-0,01	0,06	-0,10	0,17	-0,06
-0,03	0,46	-0,01	1,00	-0,65	0,83	0,59	-0,81
-0,03	-0,32	0,06	-0,65	1,00	-0,62	-0,39	0,82
-0,02	0,52	-0,10	0,83	-0,62	1,00	0,55	-0,72
-0,01	0,29	0,17	0,59	-0,39	0,55	1,00	-0,54
-0,01	-0,50	-0,06	-0,81	0,82	-0,72	-0,54	1,00

A um nível de significância de 5% ($n: 407, p < 0,05$), a variável condutividade não apresentou correlação significativa com nenhuma outra variável. De maneira geral, a correlação mais significativa foi entre o nitrogênio amoniacal e a DBO. Já a turbidez apresentou correlação significativa com as variáveis nitrogênio amoniacal, OD, DBO, Fósforo e IQA. A variável nitrato apresentou correlação significativa com as variáveis DBO e fósforo. O nitrogênio amoniacal apresentou correlação significativa com as variáveis OD, DBO, fósforo e IQA. O OD apresentou correlação significativa com as variáveis DBO, fósforo e IQA. A DBO possui correlação significativa com o fósforo e IQA. Finalmente o fósforo apresenta correlação significativa com o IQA, além das já mencionadas.

Tendo em vista que o foco do presente estudo é analisar quais são as variáveis que mais influenciam a variação do IQA, os parâmetros que apresentaram correlação significativa com o IQA foram, em ordem decrescente de correlação: OD, nitrogênio amoniacal, DBO, fósforo e turbidez. Portanto, a variável que mais se correlaciona com o IQA é o oxigênio dissolvido.

Com relação à regressão linear múltipla, adotou-se a variável de interesse IQA como Y e as demais variáveis que apresentaram correlações significativas como X. Assim, obteve-se a seguinte equação (2):

$$IQA = 40,60 - 0,10.turbidez - 1,37.[N amoniacal] + 4,27.[OD] + 0,060.[DBO] - 1,59.[P] \quad \text{equação (2)}$$

O aumento das variáveis turbidez, nitrogênio amoniacal e fósforo tendem a diminuir o IQA, devido ao valor negativo na equação, enquanto o aumento da variável oxigênio tende a aumentar o valor do IQA (sinal positivo). Assim, pode-se afirmar que a equação está de acordo com o esperado, uma vez que o aumento das variáveis turbidez, nitrogênio amoniacal e fósforo reduzem a qualidade da água (IQA mais baixo), e o aumento do oxigênio dissolvido aumenta a qualidade da água (IQA mais elevado)

O coeficiente de determinação ou R^2 encontrado para o modelo de ajustamento acima foi 0,83, ou seja, o modelo consegue explicar 83 % da variância do IQA obtido por todas as variáveis observadas, ou ainda, 83 % da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes no modelo.

CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados apresentados, a maioria dos parâmetros indicam que os corpos hídricos estão sofrendo um progressivo processo de redução da qualidade da água. Os elevados valores de DBO e fósforo indicam que há, provavelmente, a ocorrência do processo de eutrofização na maioria dos corpos hídrico.

Uma limitação do estudo foi a análise estatística descritiva das variáveis limnológicas para 408 pontos com localizações e condições bem distintas e com despejos de características diferentes. Tal fato pode levar a conclusões não tão representativas do todo, uma vez que ocorrências extremas tendem a distorcer o comportamento médio das variáveis.

Com relação ao índice, as variáveis turbidez e nitrato não apresentaram correlação com o IQA, ou seja, a variação dessas variáveis não correspondia às variações no IQA. Assim, uma recomendação do presente estudos seria uma revisão para verificar se de fato tais parâmetros são relevantes para serem incorporadas ao índice. Caso seja verificado que a utilização de tais variáveis não é de fato significativa para o cálculo do IQA, recomenda-se a remoção desses parâmetros do índice, para redução do volume de dados e redução nos gastos com análises laboratoriais, mão de obra etc.

Finalmente, o presente estudo sugere um novo modelo empírico para a equação do IQA, com bom coeficiente de explicação (83%), incluindo um número reduzido de variáveis. No entanto, para uma validação que viabilize a implementação deste tipo de modelo, é necessário conduzir análises mais aprofundadas, testando cenários sob mais condições, a fim de verificar sua confiabilidade e possível aplicabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAGA, B et al. Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável. 2aed. São Paulo: Pearson, 2005.
2. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N. 357 de 17 de Março de 2005, 2005.
3. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Relatório de qualidade de águas interiores no Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2006-2014 (Série relatórios). Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>
4. CAPOBIANCO, J. P. R. Importância da água: Ética no uso da água. 2007.
5. ESTEVES, F.A. Fundamentos de Limnologia. 3aed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
6. JANSSON, M.; BERGSTRÖM, A. K.; DRAKARE, S.; BLOMQUIST, P. Nutrient limitation of bacterioplankton and phytoplankton in humic lakes in northern Sweden. *Freshwater Biology*, v. 46, p. 653-666, 2001.
7. MILLER, G. T. Ciência Ambiental. 11ªed. São Paulo: Cengage Learning, 2007.
8. TUNDISI, J.G. et al. Águas Doces no Brasil. 3.ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.