

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

DIAGRAMA DE PARETO E RISCO FUZZY NA AVALIAÇÃO DE EFLUENTE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

*João Igor da Rocha Leitão¹
Fernando José Araújo da Silva¹
Valquíria Melo Souza Correia¹
João Roberto Façanha de Almeida²
André Luís Calado Araújo³

PARETO DIAGRAM AND FUZZY RISK IN THE EVALUATION OF EFFLUENT OF STABILIZATION PONDS

Recibido el 9 de octubre de 2017; Aceptado el 21 de marzo de 2018

Abstract

The evaluation of the performance of sewage treatment plants and the quality of effluent discharged is fundamental to the management of environmental quality. Limitations of means such as financial, technical, intellectual and even logistics restrict the monitoring programs. This study proposes the application of the Pareto diagram and the fuzzy risk concept for evaluating the performance of sewage treatment systems and the compliance to environmental standards for effluent disposal. This approach was applied to monitoring data from full-scale stabilization pond series, which is one of the most widespread treatment technologies in Brazil. The results show that the effluent from pond systems require post-treatment and both Pareto diagram and the fuzzy risk approach are effective for the evaluation and management control of effluent disposal.

Keywords: environmental quality, performance of treatment plants, effluent monitoring.

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

² Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Fortaleza, Brasil.

³ Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Mossoró, Brasil

Autor correspondente: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, DEHA. Av. Mister Hull, s/n, Pici, Fortaleza, Ceará, CEP 60455-760. Brasil. Email: i_leitao@hotmail.com

Resumo

A avaliação do desempenho de estações de tratamento de esgotos e da qualidade do efluente despejado é fundamental à gestão da qualidade ambiental. Limitações de ordem financeira, técnica, intelectual e mesmo de logística restringem os programas de monitoramento. O presente estudo propõe a aplicação do diagrama de Pareto e do risco *fuzzy* para avaliar o desempenho esperado dos sistemas tratamento de esgotos e o atendimento de normas ambientais para despejo. Estes métodos foram aplicados aos dados de monitoramento em séries de lagoa de estabilização, que é uma das tecnologias de tratamento mais difundidas no Brasil. Os resultados apontam que os efluentes dos sistemas de lagoas devem receber pós-tratamento. Tanto o diagrama de Pareto quanto o risco *fuzzy* são recursos eficazes para avaliação e controle do despejo de efluentes.

Palavras chave: qualidade ambiental, desempenho de ETE, monitoramento de despejos.

Introdução

O monitoramento de estações de tratamento de esgotos (ETE) é ferramenta fundamental na gestão da água e no combate à poluição. A análise do desempenho destes equipamentos proporciona uma ampliação do conceito de sustentabilidade. Permite, também, interpretar graus de risco impostos ao meio ambiente e à saúde humana. Os sistemas de tratamento funcionam como filtros em que o sinal de saída, o efluente tratado, apresenta grande variabilidade (Skeffington, 2006; Cotman e Pintar, 2013). Assim, o controle permite avaliar o desempenho dos sistemas de tratamento com o estabelecimento de níveis de garantia desejados ou de falha tolerados. A partir disto é possível empreender ações modificadoras da operação ou mesmo estruturais, com o fim de obter melhores resultados.

O grau de confiabilidade de um sistema de tratamento de esgotos, descrito como garantia, aponta o quanto este atende aos limites definidos na legislação ambiental e às preconizações técnicas de projeto. Estes são referentes aos limites máximos de cada parâmetro constituinte do efluente, expresso como matéria orgânica, nutrientes, indicadores de patógenos, e quanto à remoção mínima da carga poluidora (Oliveira e Von Sperling, 2008; Sin et al., 2011; WHO, 2016). As normas estabelecem padrões e condições para o lançamento de efluentes em corpos hídricos. Assim, de acordo com o uso previsto para a água do corpo receptor, um conjunto de valores de referência deve ser cumprido. Entretanto, o planejamento e a execução de programas eficientes para controle de efluentes frequentemente apresentam limitações. Estas resultam da escassez de recursos financeiros, técnicos, capital intelectual e mesmo de logística. No Brasil, isto é agravado em regiões mais pobres.

De-La-Ossa-Carretero et al., (2016) destacam a importância de se estabelecer um enfoque factível para avaliação de performance de estações de tratamento de esgotos, através de critérios simples e eficientes. Em tal contexto, devem ser consideradas não apenas as limitações dos agentes responsáveis pelo controle da qualidade ambiental, mas também as características e capacidades intrínsecas de cada tecnologia de tratamento de esgotos. Quanto a isto, destaca-se que cada

tecnologia tem perfil de desempenho e complexidade própria, com distinções nos graus de remoção dos diferentes poluentes. Cabe ressaltar ainda, que há incertezas relativas às informações obtidas no monitoramento e estas estão incorporadas ao processo de controle.

Um recurso atraente para a avaliação do desempenho de uma ETE, quanto à qualidade do grau de atendimento a premissas legais ou de projeto é o diagrama de Pareto. Isto se explica pelo fato do controle da qualidade de efluentes pode contemplar essencialmente a não conformidade de um parâmetro ou um conjunto de parâmetros e a periodicidade no qual estas não conformidades são observadas. O diagrama é assim denominado em homenagem ao economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923) que propôs em estudo seminal, que 20% dos fatores de trabalho resultariam em 80% do desempenho total de sistema de produção. O princípio de Pareto tem aplicação em diversos campos do conhecimento (Clauset et al., 2009; Bertsimas et al., 2011; Pandey et al., 2013). Em sua forma mais empregada apresenta-se como solução gráfica destinada à identificação e priorização de causas de falhas ou de baixo desempenho (Ayyub, 2014).

O diagrama de Pareto é apresentado como um gráfico de colunas ordenando as frequências acumuladas, em ordem decrescente, permitindo a fácil visualização dos eventos em não conformidade, onde o eixo secundário mostra a distribuição acumulada dos parâmetros irregulares. Concernente ao estudo de tratamento de efluentes, o diagrama de Pareto é uma eficaz ferramenta, já que permite identificar facilmente os parâmetros que trazem maior prejuízo à avaliação do desempenho da ETE. Logo, com estes valores em mãos, torna-se fácil a priorização de medidas que venham a mitigar problemas ambientais decorrentes de tais inconformidades normativas.

Outra possibilidade relevante para o controle da qualidade de efluentes e desempenho de ETE está no uso da matemática intervalar, expressa pela lógica *fuzzy*. A teoria dos números *fuzzy* foi proposta por Loft Zadeh em 1965, e compreende incertezas inerentes dos processos descritores dos fenômenos (Pedrycz et al., 2011; Trillas e Eciolaza, 2015). Tal caráter é realçado quando o universo amostral é pequeno e em sistemas naturais, onde estejam admitidas suas incertezas epistêmicas (Icaga, 2007). A aritmética *fuzzy* pode ser incorporada ao conceito de função marginal e subsidiar os sistemas de controle com fim de avaliar o grau de violação de limites normativos ou operacional em despejos de efluentes, como referido por Ganoulis (2009), Cabanillas et al., (2012) e Santín et al., (2016).

Conforme exposto, tanto os diagramas de Pareto quanto a aritmética *fuzzy* apresentam grande potencial para o monitoramento de efluentes. Este é o enfoque do presente estudo, voltado para a tecnologia de lagoas de estabilização, que é uma das mais empregadas no Brasil, conforme destacam da Silva et al., (2011) e Dias et al., (2014). Os autores destacam as vantagens desta tecnologia de tratamento, como remoção de matéria orgânica, de patógenos, baixo custo de operação e manutenção, e grande robustez. O estudo ora apresentado tem escopo extensivo a

outras tecnologias e está centrado no efluente disposto no ambiente e seu respeito às determinações normativas.

Através da utilização da metodologia mostrada neste trabalho é possível levantar um panorama geral do grau de adequabilidade do efluente tratado, desta forma aferir o quão satisfatório é o processo de tratamento de efluentes. O diagrama de Pareto é uma ferramenta gráfica que permite identificar os parâmetros que com maior frequência trazem prejuízo a adequabilidade à legislação pertinente de lançamento de efluentes. Entretanto, para uma análise mais abrangente é necessário introduzir o conceito de risco de não conformidade. Para isto optou-se pela metodologia *fuzzy* que traduz o grau de falha relacionado a cada parâmetro em um processo de tratamento de esgoto.

Para a confecção deste trabalho foram utilizados o diagrama de Pareto e o número *fuzzy* triangular em dados de esgoto tratado por lagoas de estabilização para analisar a frequência de parâmetros em não conformidade e o risco associado a cada um. Vale ressaltar que dados provenientes de qualquer outra tecnologia de tratamento de efluentes podem ser analisadas pela metodologia proposta, já que apenas os dados de entrada e saída as estações são utilizadas para o desenvolvimento da rotina de cálculo. Logo, este trabalho fornece ferramentas de gestão para a priorização de tomada de decisão que busquem sanar problemas recorrentes do tratamento de efluentes para toda e qualquer tecnologia de tratamento empregada.

Materiais e métodos

Os sistemas de lagoas e os critérios de avaliação

O estudo foi baseado no monitoramento regular de 10 sistemas de lagoas de estabilização em escala real. Cada sistema era constituído de 3 lagoas em série, iniciado com uma lagoa facultativa primária, seguida de duas de maturação, uma primária e outra secundária, respectivamente. Todos os sistemas tratavam esgoto doméstico e estavam localizados no Estado do Rio Grande do Norte. A Tabela 1 mostra a localização, a vazão operacional, a área e o volume total útil de cada série de lagoas.

Em escopo geral as lagoas foram dimensionadas de acordo com os procedimentos descritos em von Sperling (1996), de maneira que as cargas orgânicas superficiais aplicadas às lagoas facultativas primárias devessem estar em torno de 350 kg DBO/ha.dia. Entretanto, a análise operacional, com resultados observados entre lagoas em cada série foge ao intento do presente estudo. Isto porque a apreciação está concentrada na qualidade do efluente despejado no ambiente.

Cada série de lagoa etiquetada de PS₁ a PS₁₀ possuem características particulares em relação as dimensões, condições de operação e características do esgoto bruto. Estas foram escolhidas de

maneira proposital objetivando tornar o trabalho o mais abrangente possível frente a aleatoriedade dos dados recorrente da variedade de configurações e condições. As Tabela 2, 3 e 4 mostra alguns valores intermediários médios de remoção de poluentes entre a lagoa facultativa (LF), maturação primária (LM1) e secundária (LM2) tal como comprimento pela largura (C/L), Tempo de Detenção Hidráulico (dias) e profundidade (h) (metros). Alguns valores negativos são observados devido ao aumento da biomassa algal nas lagoas.

Tabela 1. Designação, localização e descrição das séries de lagoas de estabilização do estudo.

Série de Lagoas	Coordenadas geográficas	Vazão (m ³ /dia)	Área total (m ²)	Volume (m ³)
PS ₁	5°45'27"S - 35°59'44"O	108	2211	3207.8
PS ₂	5°07'17"S - 36°38'09"O	3940	37350	67500.0
PS ₃	5°11'53"S - 37°18'44"O	492	32785	58065.0
PS ₄	6°26'22"S - 35°13'18"O	253	1872	3484.0
PS ₅	6°14'17"S - 35°04'02"O	646	6392	11888.0
PS ₆	5°53'31"S - 35°11'04"O	7615	109086	189884.0
PS ₇	6°45'58"S - 36°43'52"O	170	3952	5012.2
PS ₈	6°18'45"S - 35°28'24"O	300	12796	23402.3
PS ₉	5°47'39"S - 35°18'34"O	260	5796	11314.8
PS ₁₀	5°12'15"S - 35°27'30"O	810	25980	27267.6

Tabela 2. Remoção média e parâmetros construtivos das lagoas facultativas primárias das ETE's PS₁ a PS₁₀.

Lagoa Facultativa	Remoção							Parâmetros Construtivos		
	Estação	DBO	DBO _F	DQO	DQO _F	SST	AMT	CTT	TDH (dias)	C/L
PS ₁	60.6%	64.9%	51.3%	25.6%	-10.9%	62.1%	98.6%	15.55	2.50	1.5
PS ₂	67.2%	63.6%	66.5%	56.1%	40.3%	58.5%	95.6%	11.65	2.80	2
PS ₃	61.8%	43.6%	65.0%	66.5%	-26.0%	72.5%	96.5%	72.26	2.80	2
PS ₄	65.1%	60.2%	66.7%	60.2%	63.2%	14.0%	98.7%	10.69	2.00	2
PS ₅	57.1%	63.4%	49.7%	50.0%	-70.7%	47.4%	94.5%	14.24	2.90	2
PS ₆	57.0%	41.1%	47.0%	32.9%	17.3%	47.0%	97.0%	13.79	3.80	2
PS ₇	50.1%	45.0%	48.5%	31.0%	26.2%	63.5%	98.4%	20.63	1.90	1.3
PS ₈	66.6%	70.6%	57.7%	48.2%	48.4%	48.5%	91.1%	56.12	2.30	2
PS ₉	67.1%	69.1%	52.6%	50.6%	30.3%	39.0%	98.8%	23.26	1.70	2
PS ₁₀	48.8%	61.6%	50.9%	48.7%	11.3%	65.7%	98.9%	17.49	2.40	1.1

Tabela 3. Remoção média e parâmetros construtivos das lagoas de maturação primárias das ETE's PS₁ a PS₁₀.

Lagoa de Maturação Primária	Remoção							Parâmetros Construtivos		
	Estação	DBO	DBO _F	DQO	DQO _F	SST	AMT	CTT	TDH (dias)	C/L
PS ₁	7.5%	11.9%	20.6%	25.1%	-2.2%	3.2%	85.6%	7.08	1.2	1.4
PS ₂	-10.7%	10.5%	5.9%	28.5%	3.7%	2.2%	77.3%	2.74	2	1.5
PS ₃	18.1%	28.5%	-4.0%	16.8%	-15.5%	37.9%	77.7%	22.88	1.2	1.5
PS ₄	23.6%	22.8%	10.3%	15.9%	-19.7%	24.8%	52.8%	1.54	2.6	1.5
PS ₅	6.6%	11.5%	25.6%	34.2%	5.0%	10.1%	44.4%	2.08	3.5	1.5
PS ₆	4.8%	17.4%	7.3%	28.4%	4.3%	1.9%	27.4%	5.52	1.4	1.5
PS ₇	21.4%	24.1%	30.0%	40.9%	16.6%	14.6%	40.7%	4.96	2.1	1.2
PS ₈	25.2%	19.0%	24.5%	27.7%	10.2%	46.7%	85.7%	11.44	1.6	1.5
PS ₉	-17.9%	21.9%	13.6%	26.3%	15.3%	1.7%	66.5%	10.13	0.8	1.9
PS ₁₀	17.5%	15.7%	1.5%	25.2%	28.9%	33.1%	97.8%	8.09	0.9	1

Tabela 4. Remoção média e parâmetros construtivos das lagoas de maturação secundária das ETE's PS₁ a PS₁₀.

Lagoa de Maturação Secundária	Remoção (%)							Parâmetros Construtivos		
	Estação	DBO	DBO _F	DQO	DQO _F	SST	AMT	CTT	TDH (dias)	C/L
PS ₁	22.9%	18.7%	22.6%	25.5%	45.8%	52.3%	77.6%	7.08	1.20	1.4
PS ₂	21.6%	-0.3%	22.3%	9.8%	2.8%	-12.7%	76.8%	2.74	2.00	1.5
PS ₃	11.7%	7.0%	31.9%	24.8%	-9.6%	13.3%	94.2%	22.88	1.20	1.5
PS ₄	6.2%	3.2%	12.7%	15.4%	23.4%	2.0%	-13.6%	1.54	2.60	1.5
PS ₅	11.4%	13.2%	21.6%	20.6%	0.9%	6.7%	72.6%	2.08	3.50	1.5
PS ₆	5.2%	-10.5%	17.1%	10.8%	19.0%	13.3%	86.8%	5.62	1.90	1.5
PS ₇	8.7%	7.5%	15.5%	14.1%	10.1%	14.8%	64.9%	3.89	2.60	1.2
PS ₈	-15.2%	-28.3%	12.1%	17.4%	-44.3%	47.1%	79.0%	10.45	2.80	1.5
PS ₉	28.2%	31.6%	26.0%	23.9%	27.5%	13.8%	69.9%	10.13	0.80	1.9
PS ₁₀	-9.8%	-5.6%	-14.1%	-9.0%	14.7%	57.8%	57.7%	8.09	0.90	1

O monitoramento dos sistemas de lagoas de estabilização compreendeu o período entre maio de 2009 e setembro de 2010. As coletas de amostras pontuais de esgoto bruto e efluente tratado tiveram frequência quinzenal, efetuadas no período da manhã, por volta das 10 horas. Houve rigor no horário das coletas das amostras buscando eliminar o efeito da flutuação sazonal devido as flutuações da insolação no decorrer do dia.

Foram considerados os seguintes parâmetros nas amostras coletadas: temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), amônia total (AMT), sólidos suspensos totais (SST) e coliformes termotolerantes (C_{TT}). Foram determinadas também as parcelas filtradas de DBO e DQO (DBO_F e DQO_F , respectivamente) em filtro de fibra de vidro tipo AP-40. As análises foram realizadas conforme os procedimentos descritos em APHA (2012).

Os parâmetros analíticos selecionados no monitoramento são comumente considerados na norma ambiental brasileira. Os padrões de qualidade para os parâmetros analisados neste trabalho foram retirados das resoluções CONAMA n°430/11 e SEMACE n° 154/02. Ambas foram utilizadas para contemplar todos os parâmetros de qualidade.

Quanto ao desempenho dos sistemas de lagoas, optou-se pela adoção de resultados de sistemas em escala real e existentes no nordeste brasileiro. Neste sentido, foram considerados valores conservadores, para admissão de margem de segurança quanto à expectativa de desempenho. A Tabela 5 contém os valores de referência quanto à remoção de poluentes e qualidade de efluente esperados para as séries de lagoas do estudo.

Tabela 5. Valores de referência para avaliação do desempenho dos sistemas de lagoas

Parâmetro	Remoção ¹	Efluente	Referência
DBO	70 %	≤ 120 mg/L	CONAMA n° 430/11
DBO_F	80 %	≤ 60 mg/L	SEMACE 154/02
DQO	60 %	≤ 300 mg/L	-
DQO_F	70 %	≤ 200 mg/L	SEMACE 154/02
SST	50 %	≤150 mg/L	SEMACE 154/02
AMT	60 %	≤ 20 mg N/L	CONAMA n° 430/11
C_{TT}	3.000 logs	5000 NMP/100 mL	SEMACE 154/02
pH	-	7.5 a 10.0	SEMACE 154/02
OD	-	≥ 3.0 mg/L	SEMACE 154/02

¹ Valores médios mínimos, adaptados com base em da Silva et al. (2011).

Abordagem com o diagrama de Pareto

Inicialmente o valor médio de desempenho de cada sistema de lagoas compôs um diagrama de Pareto. Este recurso gráfico permitiu verificar quais parâmetros violaram com maior frequência a concepção técnica de desempenho quanto à remoção esperada. Em seguida o diagrama foi aplicado ao conjunto total de amostras analisadas em referência aos limites estabelecidos em norma. O enfoque foi repetido com admissão de tolerância de 20% sobre os limites normativos. No caso do parâmetro C_{TT} a tolerância foi relativa à contagem de até 10^4 células/100 ml.

O diagrama de Pareto foi complementado pelo Índice de Conformidade (I_{CONF}), descrito na equação 1, que sugere o quanto o efluente de um sistema de lagoas atinge metas de qualidade. Trata-se, na verdade de um índice de padronização utilizado em sistemas de índice de qualidade de água (ver Lumb et al., 2011). No cômputo do I_{CONF} somente os valores normativos específicos foram considerados. No caso do parâmetro C_{TT} empregou-se a razão entre os logaritmos das densidades bacterianas. A interpretação do Índice de Conformidade é dada pela seguinte regra: $I_{CONF} \leq 1.0 \rightarrow$ Satisfatório; $1.1 \leq I_{CONF} \leq 1.5 \rightarrow$ Regular; $1.6 \leq I_{CONF} \leq 2.0 \rightarrow$ Ruim e; $I_{CONF} > 2.0 \rightarrow$ Péssimo.

$$I_{CONF} = \sum_{i=1}^n (V_i / P_i) / n$$

Equação (1)

Em que: V é o valor observado do parâmetro i ; P é valor do padrão i e n é número de parâmetros.

Abordagem com aritmética Fuzzy

Empregou-se o conceito de risco fuzzy (\tilde{R}_F), que deriva da ideia de função marginal de um número difuso em torno de um número real, ou de outro número difuso. Interpretou-se o funcionamento do todo em relação a valores de referência que operam como regra auxiliar. Os números fuzzy empregados foram do tipo triangular, referindo-se ao desempenho do conjunto de ETE ou da qualidade do efluente tratado. Este enfoque tem sugestão de aplicação em Kaufmann e Gupta (1991), com demonstração em Ganoulis (2009) e Araújo, Sales e Souza (2010), por exemplo.

A Figura 1 traduz o risco fuzzy para a descrição apresentada. Nela o número fuzzy triangular (NFT), $\tilde{A} = [a, b, c]$, representa a variação da qualidade do efluente.

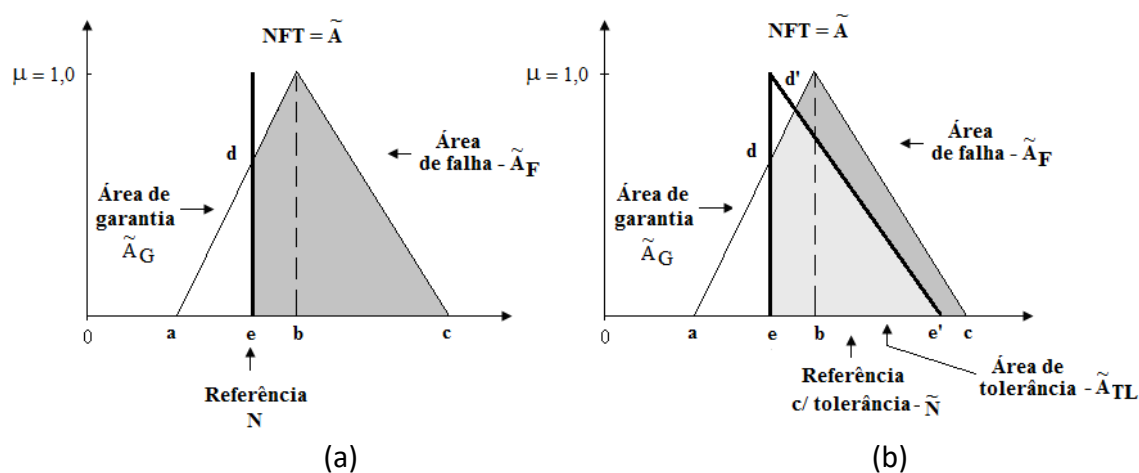


Figura 1. Risco fuzzy (R_F), com número real (a) e com tolerância à direita (b).

O número real na Figura 1(a) é o limite normativo (N). Caso seja admitida alguma tolerância, o limite é estendido à direita ou esquerda para representá-la (\tilde{N}). Isto é mostrado na Figura 1(b), com tolerância à direita. A falha, ou violação à norma (\tilde{A}_F), também é um número *fuzzy* e corresponde à área cinza mais escura (equação 2). Desta maneira o risco *fuzzy* (\tilde{R}_F) é dado pela área do todo que excede o limite pré-estabelecido como referência e representado na equação 3.

$$\tilde{A}_F = \tilde{A} - \tilde{N} \text{ ou } (N) \quad \text{Equação (2)}$$

$$\tilde{R}_F = \frac{\tilde{A}_F}{\tilde{A}} \quad \text{Equação (3)}$$

Resultados e discussão

As temperaturas das amostras de esgoto bruto e tratado refletiram o perfil climático homogêneo dos locais em que estavam instaladas as estações de tratamento. A média para o esgoto bruto foi de 29.8° C ($\pm 0.8^\circ$ C), com amplitude de 2.8° C. No efluente tratado a média foi de 28.5° C ($\pm 0.6^\circ$ C) e a amplitude de 2.1° C.

Dentre os sistemas de lagoas monitorados e admitido o desempenho médio na remoção de poluentes, os parâmetros que apresentaram maior incidência de violação foram sólidos suspensos totais (SST) e coliformes termotolerantes (C_{TT}). A expectativa de remoções de apenas 50% e 3 unidades logarítmicas para estes respectivos parâmetros pode não ser a melhor representação da realidade com sistemas em escala real. Ao mesmo tempo tal resultado sugere a necessidade de pós-tratamento, com a remoção de material algal do efluente. Isto permitiria não apenas a redução de SST e C_{TT} , mas também do conteúdo orgânico e maior remoção de nutrientes, conforme recomendam USEPA (2002), Mara e Johnson (2007), Von Sperling et al., (2007) e Al-sa`Ed et al., (2011).

A Figura 2 mostra as violações do desempenho esperado na remoção de poluentes nos sistemas de lagoa de estabilização do estudo. Os melhores resultados foram obtidos com os parâmetros DQO_F e DBO_F. Expectativas de remoção de 70 e 80% para os respectivos parâmetros são factíveis. Para amônia total e amostras não filtradas de DQO, duas das estações estudadas apresentaram violações da expectativa de desempenho. No caso da DBO não filtrada o número de sistemas subiu para quatro. Destaca-se que, quanto aos valores de remoção, apenas o C_{TT} apresentou alguma correlação com o TDH ($r = 0.470$, para $\alpha = 0.05$).

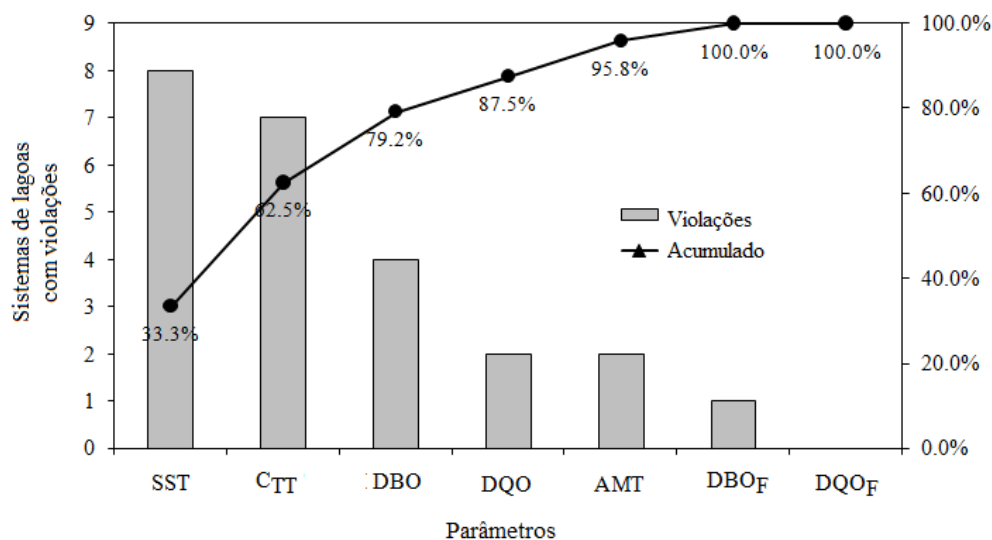


Figura 2. Violações do desempenho esperado na remoção de poluentes nos sistemas de lagoa de estabilização do estudo.

A Figura 3 mostra as violações ocorridas em relação aos valores de referência definidos nas normas ambientais. Neste caso o parâmetro C_{TT} ficou à frente na frequência de não conformidade. Isto é explicado pelo fato das medidas centrais de C_{TT} nos efluentes de sistemas de lagoas serem representadas pela média geométrica. Trata-se de um valor discretizado que sofre redução na variação de escala, diferente dos demais parâmetros. No caso do conteúdo representado como microdado, isto não ocorre. O valor observado é simplesmente comparado com o valor limite estabelecido em norma. A frequência de violação do valor de norma apresentou correlação positiva com o coeficiente de variação dos parâmetros de monitoramento ($r = 0.618$, para $\alpha = 0.05$), com base nos valores apresentados na Tabela 2. No caso de admissão de tolerância a correlação positiva foi um pouco mais representativa ($r = 0.694$, para $\alpha = 0.05$).

Para o conjunto das amostras efluentes ($n = 158$) o valor médio do Índice de Conformidade (I_{CONF}) foi de $1.2 (\pm 0.7)$ e variou de 0.5 a 4.8. O índice é um valor agregado que sumariza um estado regular no caso deste estudo. A Tabela 6 mostra os resultados de forma mais minudente, em que se destaca um peso maior do parâmetro OD para estados de ruim e péssimo. Isto se deu em razão de extremos de baixas concentrações. Melhores resultados foram observados com os parâmetros DQO_F , DQO, pH e AMT. Estes ratificam os resultados anotados com o diagrama de Pareto, como sendo parâmetros com menor frequência de violações da norma ambiental.

Cabe destacar que o uso de índices deve ser acompanhado de interpretações atentas, pois cada modelo tem suas limitações. Estas podem estar associadas não apenas à subjetividade, mas principalmente às escalas e padronizações. Ainda assim devem se juntar a outros recursos, de maneira auxiliar.

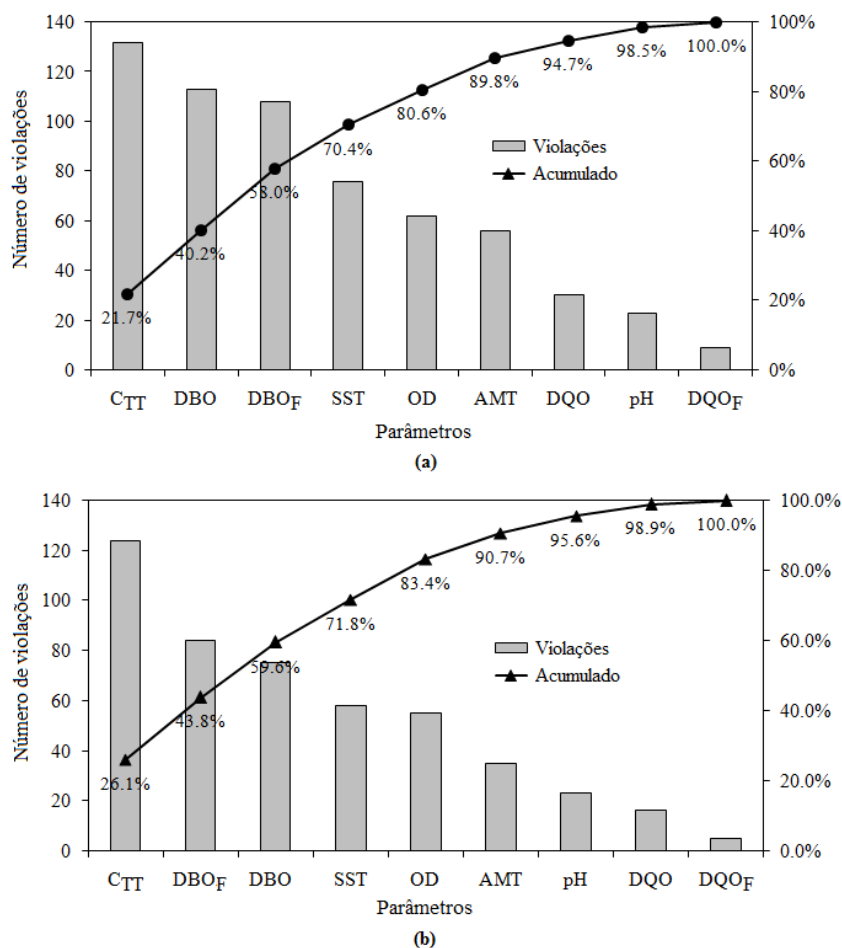


Figura 3. Violações na qualidade do efluente das amostras dos sistemas de lagoa de estabilização do estudo, com valor normativo estrito (a) e com tolerância de 20% (b).

Tabela 6. Índice e frequência de estados de conformidade nas amostras do estudo.

Parâmetro	Estado de conformidade (%)				I _{CONF}
	Satisfatório	Regular	Ruim	Péssimo	
pH	100.0	-	-	-	0.9
OD	62.0	9.5	8.2	20.3	2.6
DBO	32.9	42.4	13.3	11.4	1.3
DBO _F	36.1	34.2	17.7	12.0	1.3
DQO	84.2	10.1	5.7	-	0.8
DQO _F	94.3	5.1	0.6	-	0.6
C _{TT}	16.5	74.7	8.9	-	1.2
AMT	70.3	25.3	3.8	0.6	0.8
SST	55.1	36.1	6.3	2.5	1.0

O resultado do cômputo do risco *fuzzy* é mostrado na Tabela 7. A possibilidade de falha *fuzzy* expressa pelo \tilde{R}_F , quanto ao desempenho esperado sugere que a biomassa de algas influencia este risco, conforme destacado nos parâmetros DBO, DQO e SST. No caso da violação da norma ambiental, os resultados foram um pouco diferentes dos apontados pelo diagrama de Pareto. Os parâmetros com maior grau de falha, porém, foram os mesmos que apresentaram maior grau de violação dos limites normativos (i.e. DBO, DBO_F, C_{TT} e SST).

Tabela 7. Risco *fuzzy* (\tilde{R}_F) para falha no desempenho médio para remoção de poluentes e na qualidade do efluente em atendimento da norma ambiental.

Parâmetro	Remoção	Norma	Norma com tolerância
pH	n.a.	0.091	≅ 0.000
OD	n.a.	0.176	0.132
DBO	0.838	0.833	0.769
DBO _F	0.092	0.839	0.791
DQO	0.322	0.456	0.344
DQO _F	≅ 0.000	0.310	0.191
C _{TT}	0.510	0.647	0.591
AMT	0.240	0.564	0.489
SST	0.950	0.652	0.573

Os valores de \tilde{R}_F para violação dos limites da norma correlacionaram positivamente ($r = 0.768$, para $\alpha = 0.05$) com o percentual de violação no total de amostras. No caso de risco *fuzzy* com tolerância do limite de norma, a correlação foi mais representativa ($r = 0.812$, para $\alpha = 0.05$). As correlações entre \tilde{R}_F e os valores de I_{CONF} não foram significativas ($r \leq 0.300$, para $\alpha = 0.05$). Isto ocorreu porque a função que explica a conformidade é uma razão expressa como valor abrupto (*crisp value*), enquanto o número utilizado para cômputo do risco difuso é dado por uma função intervalar.

Conclusão

Neste estudo foram propostas duas abordagens simples para a avaliação de desempenho de estações de tratamento de esgotos (ETE). Os métodos foram aplicados em 10 (dez) séries de lagoas de estabilização em escala real, analisando-se o desempenho esperado para sistemas de tratamento de esgotos e o atendimento de normas ambientais para despejo.

Para o desempenho esperado e utilizando Pareto, os parâmetros SST, C_{TT} e DBO apresentaram o maior número de falhas. Para o atendimento de normas ambientais, os resultados também indicaram que a matéria orgânica e os coliformes termotolerantes são os principais parâmetros de violação. Neste caso, porém, a ordem de grau de violações foi diferente e os sólidos suspensos totais representaram a quarta maior causa de falhas.

Com a abordagem *fuzzy*, o grau de falha para o desempenho esperado apontou para os mesmos parâmetros indicados com o diagrama de Pareto. Para o atendimento da norma ambiental, a interpretação dos resultados com aritmética *fuzzy* também foi similar ao do uso de Pareto, mudando apenas a ordem dos parâmetros.

A partir da configuração proposta para os sistemas de lagoas de estabilização, dos parâmetros analisados e dos métodos utilizados, observou-se congruência entre os resultados obtidos. Assim, para as estações de tratamento de esgotos em questão, as violações e falhas sugerem a necessidade de pós-tratamento, a fim de atender às normas ambientais.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado graças ao apoio do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA-UFC). Com os dados cedidos generosamente pela CAERN (Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte)

Referências

- Al-saed, R., Abu-madi, R., Zimmo, R. (2011) Novel design concept for facultative ponds using rock filters to reclaim the effluent. *ASCE, Journal of Environmental Engineering*, **137**(4), 284-290.
- APHA, American Public Health Association, AWWA, American Water Works Association, WEF, Water Environment Federation (2012) *Standart methods for examination of water and wastewater*. 22 ed. Washington: Publication Office American Public Health Association.
- Araújo, J.A.F., Sales, R.J.M., Souza, R.O. (2013) Risco de eutrofização em reservatórios de regiões semiáridas com uso da teoria dos conjuntos difusos, *REGA*, **10**(1), 29-39.
- Ayyub, B.M. (2014) *Risk analysis in engineering and economics*, 2nd edition, CRC Press. *Taylor & Francis USA*, New York, 616 pp.
- Bertsimas, D., Brown, D.B., Caramanis, C., (2011) Theory and application of robust optimization, *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, **53**(3), 464-501.
- Cabanillas, J., Ginebreda, A., Guillén, D., Martinez, D., Barcló, D., Moragas, L., Robusté, J., Darbra, R.M. (2012) Fuzzy logic based risk assessment of effluents from waste-water treatment plants, *Science of the Total Environment* **439**(1), 202-210.
- Clauset A., Shalizi, C.R., Newman, M.E.J. (2009) Power-law distributions in empirical data, *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, **51**(4), 661-703.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2011) Resolução 430. 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução 357/05, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União nº 92. Brasília, 16 de maio de 2011. Acesso em 12 de março de 2018, disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>

- Cotman, M., Pintar, A. (2013) Sampling uncertainty of wastewater monitoring estimated in a collaborative field trial, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **51**(1), 71-78.
- Da Silva, F.J.A., Souza, R.O., Castro, F.J.F., Araújo, A.L.C. (2011) Prospectus of waste stabilization ponds in Ceará, Northeast Brazil, *Water Science and Technology*, **63**(6), 1265-1270.
- De-La-Ossa-Carretero, J.A., Del-Pilar-Ruso, Y., Giménez-Casaldueiro, F., Sánchez-Lizaso, J.L. (2016) Monitoring the effects of wastewater treatment strategies, *Environmental Monitoring and Assessment*, **188**(2), 110-120.
- Dias, D.F.C., Possmoser-Nascimento, T.E., Rodrigues, V.A.J., Von Sperling, M. (2014) Overall performance evaluation of shallow maturation ponds in series treating UASB reactor effluent: ten years of intensive monitoring of a system in Brazil, *Ecological Engineering*, **71**(3), 206-214.
- Ganoulis, J. (2009) Risk analysis of water pollution. 2nd edition. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 311pp.
- Icaga, Y. (2007) Fuzzy evaluation of water quality classification, *Ecological Indicators*, **7**(3), 710–718.
- Kaufmann, A., Gupta, M. M. (1991) Introduction of fuzzy arithmetic: theory and applications, *Van Nostrand Reinhold*, New York, 384 pp.
- Lumb, A., Sharma, T.C., Bibeau, J.-F. (2011) A review of geneses and evolution of water quality index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health* **3**(1), 11-24.
- Mara, D.D., Johnson, M.L. (2007) Waste stabilization ponds and rock filters: solutions for small communities, *Water Science and Technology*, **55**(7), 103–107.
- Oliveira, S. C., Von Sperling, M. (2008) Reliability analysis of wastewater treatment plants, *Water Research* **42**(4), 1182-1194.
- Pandey, V., Bairwa, A., Bhattacharya, S. (2015) Application of the Pareto principle in rapid application development model, *International Journal of Engineering and Technology*, **5**(3), 2649-2654.
- Pedrycz, W., Ekel, P., Parreiras, R. (2011) Fuzzy multicriteria decision-making - models, methods and applications. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. 338p.
- Santin, I., Pedret, C., Vilanova, R., Meneses, M. (2016) Advanced decision control system for effluent violations removal in wastewater treatment plants, *Control Engineering Practice*, **49**(3), 60-75.
- SEMACE, Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (2002) Portaria número 154. 22 de julho de 2002. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará. Diário Oficial do Estado. Fortaleza, 01 de Outubro de 2002. Acessado em 12 e março de 2018, disponível em:
http://antigo.semace.ce.gov.br/integracao/biblioteca/legislacao/conteudo_legislacao.asp?cd=95
- Sin, G., Gernaey, K.V., Neumann, M.B., Van Loosdrecht, M.C.M., Gujer, W. (2011) Global sensitivity analysis in wastewater treatment plant model applications: prioritizing source of uncertainty, *Water Research*, **45**(2), 639-651.
- Skeffington, R. A. (2006) Quantifying uncertainty in critical loads: (a) literature review. *Water, Air and Soil Pollution*, **169**(1), 3-24.
- Trillas, E., Eciolaza, L. (2015) Fuzzy logic - an introductory course for engineering students. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer International Publishing. Switzerland, 204 pp.
- Von Sperling, M., Andrada, J.G.B., Melo Júnior, W.R. (2007) Coarse filters for pond effluent polishing: comparison of loading rates and grain sizes, *Water Science and Technology*, **55**(11), 121–126.
- WHO, World Health Organization (2016) Sanitation safety planning – manual safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta. WHO Press, Geneva, 138 pp.