

II-300 - RISCO PROBABILÍSTICO E *FUZZY* NO ATENDIMENTO DE CRITÉRIOS PARA DESPEJO DE EFLUENTES – APLICAÇÃO COM LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Gustavo Ross Ribeiro Lima

Engenheiro Químico, Universidade Federal do Ceará. Mestrando em Saneamento Ambiental no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

João Igor da Rocha Leitão

Engenheiro Químico e Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará. Doutorando em Saneamento Ambiental no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

André Luis Calado Araújo

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Sanitária. PhD em Engenharia Sanitária (University of Leeds, UK). Professor da Diretoria de Educação e Tecnologia de Recursos Naturais do IFRN. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária (PPGES/UFRN). acalado@ifrn.edu.br

Fernando José Araújo da Silva⁽¹⁾

Doutor, Mestre e Graduado em Engenharia Civil. Professor Adjunto na UFC e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

Endereço⁽¹⁾: Bloco 713, 1º andar, *Campus* do PICI, Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Brasil. CEP 60451-970. Fone: (85) 33669624. E-mail: fjas@deha.ufc.br.

RESUMO

O controle da qualidade de efluentes de Estações de Tratamento de Esgotos requer programas de monitoramento eficientes. Este permite avaliar o desempenho dos sistemas de tratamento, com estabelecimento de graus de garantia desejados ou de falha tolerados. Assim, o grau de confiabilidade de um sistema de tratamento de esgotos, quanto ao atendimento da norma ambiental, é expresso como garantia e está associado ao quanto este atende aos limites definidos na legislação. O presente estudo aborda o tema, com investigação aplicada à confiabilidade de três sistemas de lagoas de estabilização. Esta foi verificada com duas abordagens: simulação Monte Carlo e aritmética *fuzzy*. Tanto na abordagem probabilística, com Monte Carlo, quanto com a aritmética *fuzzy* o risco foi baseado em função marginal. Os parâmetros com maior risco de falha foram coliformes termotolerantes (C_{TT}) e DBO_F . Os parâmetros correspondentes ao menor risco foram amônia e pH. O risco probabilístico e o difuso apresentaram correspondência entre si.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento de ETE, Atendimento à norma ambiental, Metodologias de cálculo de graus de falha e de garantia.

INTRODUÇÃO

A qualidade de efluente de Estações de Tratamento de Esgotos é verificada a partir de programas de monitoramento. Os sistemas de tratamento de esgotos funcionam como filtros que atuam na remoção de poluentes. O sinal de saída (*i.e.* o efluente tratado), porém, apresenta grande variabilidade em relação aos resultados preconizados em projeto e aos exigidos pela legislação. O controle permite avaliar o desempenho dos sistemas de tratamento, com estabelecimento de graus 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, quanto ao atendimento da norma ambiental, é expresso como garantia e está associado ao quanto este atende aos limites definidos na legislação. Esta garantia é o complemento do risco de falha, totalizando o inteiro de observações. As normas estabelecem padrões e condições para o lançamento de efluentes em corpos hídricos (*exempli gratia*: Resolução n° CONAMA 430/2011 e Portaria SEMACE n° 154/02).

O planejamento e a execução de programas eficientes para controle de efluentes apresentam limitações, que resultam da escassez de recursos financeiros, técnicos, capital intelectual e mesmo de logística. No Brasil, isto

é agravado em regiões mais pobres. A despeito disto, cabe considerar que o monitoramento de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) é ferramenta essencial na gestão da água e combate à poluição.

É necessário interpretar as informações obtidas nos programas de monitoramento, organizando-as e resumindo-as de forma simples e objetiva. Importa estabelecer critérios e métodos eficientes e confiáveis para a avaliação do desempenho das ETE, mas principalmente para o atendimento de exigências normativas. Estes critérios devem ser factíveis e realísticos, ante aos recursos e informações disponíveis.

Um recurso relativamente simples é a simulação Monte Carlo, que parte de um conhecimento prévio das funções distribuições de probabilidade características de cada conjunto amostral dos parâmetros de controle monitorados (McBEAN; ROVERS, 1998). Mais simples ainda é a utilização da aritmética *fuzzy*, que dá suporte a uma teoria que opera com conjuntos de dados pequenos ou informações limitadas. Tanto na abordagem probabilística quanto com a aritmética *fuzzy* estimam o risco ou da garantia é são baseados em função marginal.

O corrente estudo surge da premissa acima e apresenta dois enfoques sobre o assunto, sendo um com base probabilística e outro *fuzzy*. A investigação é concentrada em sistemas de lagoas de estabilização, uma das tecnologias de tratamento de esgotos mais empregadas no país, com destaque na região Nordeste. A perspectiva em apreço é baseada no texto de Vieira (2005), que emprega diferentes modelos para análise de risco em recursos hídricos.

METODOLOGIA

Foram selecionadas 3 (três) Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do tipo lagoas de estabilização em série. Cada série era constituída por uma lagoa facultativa primária, seguida de uma lagoa de maturação primária e uma lagoa de maturação secundária. Os sistemas estavam localizados em Mossoró, Santana do Seridó e Santo Antônio pertencentes ao Estado do Rio Grande do Norte (ver características nas Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Identificação dos sistemas de lagoas de estabilização em estudo.

Nome da ETE	Designação	Configuração	Coordenadas Geográficas
<i>Passagem de Pedras</i>	LS ₁	LF _P + LM _P + LM _S	5°11'53'' S – 37°18'44'' O
<i>Sítio Santana</i>	LS ₂	LF _P + LM _P + LM _S	6°45'58'' S – 36°43'52'' O
<i>Santo Antônio</i>	LS ₃	LF _P + LM _P + LM _S	6°18'45'' S – 35°28'24'' O

LF_P – Lagoa facultativa primária; LM_P – Lagoa de maturação primária e LM_S – Lagoa de maturação secundária.

Tabela 2. Características operacionais das ETEs do estudo.

Sistema	Vazão (m ³ /dia)	TDH (dias)			Volume (m ³)			Área (m ²)		
		LF _P	LM _P	LM _S	LF _P	LM _P	LM _S	LF _P	LM _P	LM _S
LS ₁	492	72	23	23	35550	11258	11258	17775	7505	7505
LS ₂	170	21	5	4	3507	844	661	2698	703	551
LS ₃	300	56	11	10	16836	3431	3135	8418	2288	2090

TDH – Tempo de detenção hidráulica.

Os esgotos afluente e efluente de cada lagoa, em cada série, foram analisados com os seguintes parâmetros: pH, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio da amostra filtrada (DBO_F), demanda química de oxigênio da amostra filtrada (DQO_F), amônia total (AMT), sólidos suspensos totais (SST), coliformes termotolerantes (C_{TT}) e enterococos fecais (E_{CF}). Para as amostras filtradas, DBO_F e DQO_F, foi utilizado filtro AP-40. As coletas correram no período da manhã, com temperatura média de 28°C. As análises foram realizadas conforme os procedimentos descritos em APHA (1998).

Abordagem probabilística

Determinou-se para cada parâmetro monitorado a estatística de aderência K-S (*Kolmogorov-Smirnov*) para a hipótese das seguintes distribuições: Normal (N), Log-Normal (L), Gama (G) e Weibull (W). Estas são mostradas pelas equações de 1 a 4. Isto permitiu selecionar a distribuição mais representativa de cada conjunto

amostral. Em seguida foi conduzida uma simulação Monte Carlo com 2500 iterações. O teste de aderência, os parâmetros das funções de representação das distribuições e as simulações foram conduzidos através *software* R. O cômputo do risco probabilístico (R_P) foi dado pela razão representada na equação 5.

Função Distribuição de Probabilidade Normal

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que: μ = média e σ = desvio padrão.

Função de Distribuição de Probabilidade Log-Normal

$$f(x) = e^{-\frac{((\ln x)^2)/2\sigma^2}{x\sigma\sqrt{2\pi}}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que: μ = média e σ = desvio padrão

Função de Distribuição de Probabilidade Gamma

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)} \beta^{\gamma}}{\beta^{\gamma}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que: γ = fator de forma (*shape*) e β = fator de escala (*scale*)

Função de Distribuição de Probabilidade Weibull (versão dois parâmetros)

$$f(x) = \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^{\gamma}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que: γ = fator de forma (*shape*); α = fator de escala (*scale*)

$$R_P = \frac{\text{Número de valores simulados que ultrapassaram o limite da norma}}{\text{Total de valores simulados}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Abordagem difusa

O conceito de risco *fuzzy* (\tilde{R}_F) deriva da ideia de função marginal, em que um número difuso varia em torno de um número real, de um intervalo, ou de outro número difuso. Interpretou-se o funcionamento do todo em relação a uma medida que operou como regra auxiliar (*i.e.* os valores da norma). Os números *fuzzy* empregados foram tipo triangular, referindo-se aos valores mínimo, média e máximo das observações.

A Figura 1 traduz o risco *fuzzy* para a descrição apresentada, com falha à direita (Figura 1a), à esquerda (Figura 1c) ou fora de intervalo (Figura 1b). Nela o número *fuzzy* triangular (NFT), $\tilde{A} = [a, b, c]$ representa a variação da qualidade do efluente. O número real na figura é o limite normativo (N). A falha, ou violação à norma (\tilde{A}_F), também é um número *fuzzy* e corresponde à área cinza (equação 6). 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 7. Este enfoque tem sugestão de aplicação em Kaufmann e Gupta (1991).

Neste estudo foram empregados como valores normativos os limites estabelecidos na Portaria n° 154 (SEMACE, 2002), que trata especificamente de lagoas de estabilização. Estes são mostrados na Tabela 3.

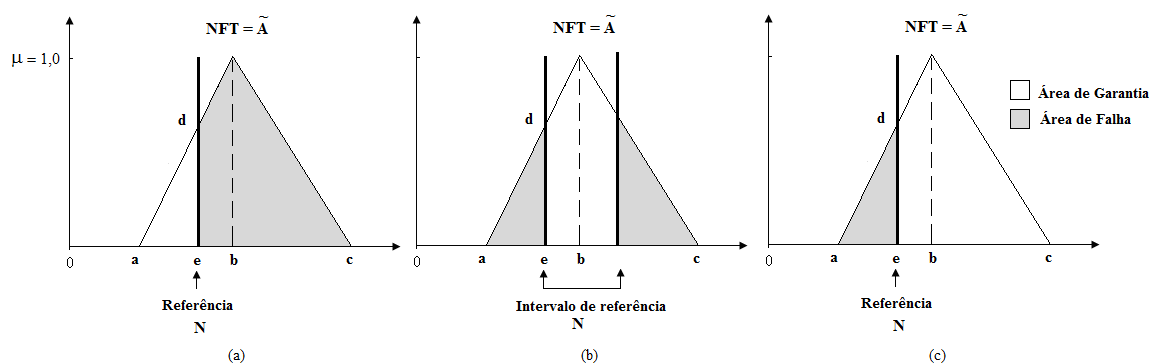


Figura 1: Representação gráfica do risco *fuzzy* (R_F) com NFT.

$$\tilde{A}_F = \tilde{A} - \tilde{N} \text{ ou } (N) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\tilde{R}_F = \frac{\tilde{A}_F}{\tilde{A}} \quad \text{Eq. 7}$$

Tabela 3. Parâmetros e limites considerados no estudo de garantia.

Parâmetro	DBO_F mg/L	DQO_F mg/L	SST mg/L	AMT mg N/L	C_{TT} células/100mL	E_{CF} células/100mL	OD mg/L	pH
Critério	≤ 60	≤ 200	≤ 150	≤ 20	$\leq 5,0 \times 10^3$	$\leq 5,0 \times 10^3$	$> 3,0$	5,0 – 9,0

Fonte: adaptado de SEMACE (2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada parâmetro a distribuição hipotética que melhor representou o conjunto de dados é mostrada na Tabela 4. Houve tendência de maior variabilidade dos parâmetros do estudo ao longo das séries, crescendo das primeiras lagoas (facultativas primárias) em direção às finais (de maturação primária e terciária). Isto implicou maiores coeficientes de variação e dominância das distribuições Log-Normal (44%) e Weibull (24%). É claro, esta é uma visão do todo, mas houve distinções entre parâmetros e tipos de lagoas.

Tabela 4. Distribuições mais ajustadas dos parâmetros do estudo com base no teste K-S.

Parâmetro	LF _P			LM _P			LM _S		
	LS ₁	LS ₂	LS ₃	LS ₁	LS ₂	LS ₃	LS ₁	LS ₂	LS ₃
pH	G	G	W	N	L	N	L	L	L
OD	L	N	N	L	W	N	L	L	L
DBO_F	N	W	G	L	G	G	L	L	G
DQO_F	L	L	W	L	L	W	L	L	W
C_{TT}	W	L	W	L	L	W	L	L	W
E_{FC}	L	W	W	L	N	W	L	W	N
AMT	L	G	N	L	W	N	W	N	G
SST	N	L	L	N	N	L	W	N	L

Na Tabela 5 são mostrados os resultados de cômputo de risco de falha, tanto com a abordagem probabilística quanto com a difusa. O risco é expresso como partes do inteiro. Os valores virtualmente iguais à unidade sugerem falha plena, enquanto os valores virtualmente iguais a zero sugerem garantia plena.

Nas lagoas os parâmetros com maior risco de falha foram coliformes termotolerantes (C_{TT}) e DBO_F . Os parâmetros correspondentes ao menor risco foram amônia e pH. Isto é válido tanto para o risco probabilístico, quanto para o difuso. Em relação aos riscos de falha nas séries de lagoas, a LS₁ apresentou melhor resultado,

seguida da LS₃ e da LS₂. Como houve correspondência entre R_P e R_F é possível estimar este último a partir do primeiro, conforme indicado na Figura 2.

Tabela 5. Riscos probabilístico e difuso calculados nas lagoas das séries do estudo.

Parâmetro	LF _P			LM _P			LM _S		
	LS ₁	LS ₂	LS ₃	LS ₁	LS ₂	LS ₃	LS ₁	LS ₂	LS ₃
Risco probabilístico									
pH	0,04	0,51	0,14	0,02	0,33	0,15	0,01	0,20	0,21
OD	0,46	0,69	0,33	0,13	0,88	0,37	0,37	0,63	0,19
DBO _F	0,91	0,81	0,56	0,83	0,70	0,47	0,82	0,88	0,64
DQO _F	0,13	0,72	0,48	0,01	0,10	0,10	0,01	0,04	0,06
C _{TT}	0,81	≅ 1,00	≅ 1,00	0,18	0,99	0,96	0,02	0,90	0,89
E _{FC}	0,40	0,84	0,91	≅ 0,00	0,73	0,23	≅ 0,00	0,44	≅ 0,00
AMT	0,10	0,08	0,83	≅ 0,00	≅ 0,00	0,24	0,01	≅ 0,00	0,04
SST	0,22	0,80	0,33	0,44	0,54	0,25	0,60	0,29	0,64
Risco fuzzy									
pH	≅ 0,00	0,37	0,13	≅ 0,00	0,14	0,29	≅ 0,00	0,07	0,07
OD	0,84	0,85	0,32	≅ 0,00	0,77	0,42	0,13	0,34	0,18
DBO _F	≅ 1,00	0,95	0,81	0,94	0,90	0,77	0,99	0,99	0,82
DQO _F	0,11	0,83	0,67	≅ 0,00	0,04	0,03	≅ 0,00	0,02	0,01
C _{TT}	≅ 1,00	≅ 1,00	≅ 1,00	0,95	≅ 1,00	≅ 1,00	0,15	≅ 1,00	0,99
E _{FC}	0,64	≅ 1,00	≅ 1,00	≅ 0,00	0,98	0,57	≅ 0,00	0,73	≅ 0,00
AMT	≅ 0,00	0,01	0,90	≅ 0,00	≅ 0,00	0,14	≅ 0,00	≅ 0,00	0,02
SST	0,13	0,96	0,26	0,28	0,47	0,30	0,61	0,25	0,87

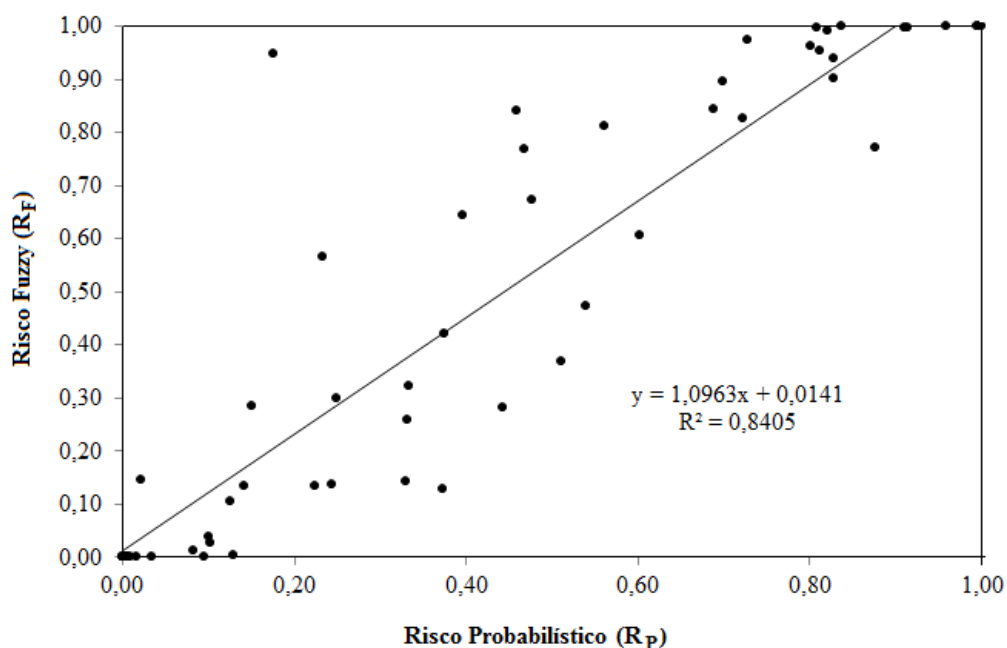


Figura 2. Correlação entre risco probabilístico (R_P) e risco fuzzy (R_F).

CONCLUSÃO

A confiabilidade de três sistemas de lagoas de estabilização foi verificada através de cômputo do risco de falha no atendimento de padrões de lançamento de efluentes. Duas abordagens foram aplicadas: a simulação Monte Carlo e a aritmética *fuzzy*. Tanto na abordagem probabilística, com Monte Carlo, quanto com a aritmética *fuzzy* o risco foi baseado em função marginal.

Os parâmetros com maior risco de falha foram coliformes termotolerantes (C_{TT}) e DBO_F . Os parâmetros correspondentes ao menor risco foram amônia e pH. O risco probabilístico e o difuso apresentaram correspondência entre si. Dentre as séries de lagoas, a LS_1 apresentou melhor resultado, seguida da LS_3 e da LS_2 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington, D.C.: APHA – American Public Health Association, 1998.
2. CONAMA. **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.
3. KAUFMANN, A.; GUPTA, M. M. **Introduction of fuzzy arithmetic: theory and applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 384 p.
4. McBEAN, E. A.; ROVERS, F. A. **Statistical procedures for analysis of environmental monitoring data & risk assessment**. Environmental Management & Engineering Series. Volume 3. New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1998. 313 p.
5. SEMACE. **Portaria 154/02**. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. Diário Oficial do Estado, Série 2, Ano 5, No 187. Fortaleza, 01 out. 2002. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. Fortaleza, 2002.
6. VIEIRA, V. P. P. B. **Análise de risco em recursos hídricos – fundamentos e aplicações**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Coleção ABRH 10. Porto Alegre: ABRH, 2005. 372 p.