



II-171 – ANÁLISE DE EFICIÊNCIA E CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DO TIPO LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Ana Gláucia Magalhães Silveira⁽¹⁾

Química pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Mestre em Saneamento Ambiental pela UFC.

Marcos Erick Rodrigues da Silva

Doutor em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela UFC. Professor do IFCE Campus Sobral.

André Bezerra dos Santos

Doutor em Saneamento Ambiental pela Wageningen University - Holanda. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Endereço⁽¹⁾: Av. Carneiro de Mendonça, 1900 – Pici – Fortaleza – Ceará – CEP: 60510-466 - Brasil - Tel: +55 (85) 3101-4768 - Fax: +55 (85) 3101-4767 - e-mail: glaucia.magalhaes@cagece.com.br

RESUMO

O trabalho teve como objetivo geral realizar uma análise de desempenho, confiabilidade e situação operacional de lagoas de estabilização localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). A confiabilidade foi avaliada por meio do Coeficiente de Confiabilidade (CDC) e o desempenho foi avaliado por meio de estatística descritiva, eficiência de remoção e percentual de atendimento aos padrões ambientais de lançamento vigentes. Foram selecionadas oito lagoas de estabilização e os dados analisados corresponderam ao período de janeiro de 2007 a março de 2011. Optou-se por estudar os parâmetros de maior relevância e mais analisados no período avaliado: pH, DQO, DQO filtrada, DBO, DBO filtrada, OD, SST, sólidos sedimentáveis, amônia, coliformes totais e *E.coli*. O desempenho das ETEs nos parâmetros pH, DQO filtrada e DBO filtrada não foi muito significativo, entretanto nos parâmetros OD, SST, amônia e *E.coli* observou-se uma clara superioridade da tipologia ANA+FAC+MAT. Em relação à eficiência, verificou-se também os melhores resultados para esta tipologia, que por apresentar um maior número de unidades de tratamento também apresentou maior estabilidade. Para todos os parâmetros, foi grande a variabilidade dos coeficientes de variação e de confiabilidade das ETEs, não sendo evidenciada correlação entre os valores de CDC e as modalidades de tratamento. Quanto ao percentual de atendimento à legislação, verificou-se também um desempenho superior da modalidade ANA+FAC+MAT e um desempenho aquém do esperado para a tipologia FAC, demonstrando um tratamento deficiente se comparado às outras modalidades de lagoas de estabilização.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento, Águas residuais – Purificação, Lagoas de Estabilização, Confiabilidade.

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos processos de tratamento de esgotos sanitários atualmente utilizados no Brasil, as lagoas de estabilização se destacam devido principalmente a sua simplicidade operacional e elevada eficiência de remoção de matéria orgânica, baixo custo de manutenção e operação, favorecidas pelas condições climáticas do Brasil, sendo largamente utilizadas também na região nordeste.

Os dados oriundos do monitoramento da qualidade do efluente de Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs necessitam de um tratamento adequado. Para se fazer uma interpretação mais precisa e exata a respeito das verdadeiras condições do sistema é fundamental o uso de ferramentas estatísticas. Desta forma, a determinação de características importantes como atendimento aos padrões de lançamento, confiabilidade e desempenho podem representar, por exemplo, o sucesso de um determinado tipo de tratamento.

O conceito de confiabilidade tem estado presente em vários trabalhos na área e uma definição bastante aceita para o termo, é que a confiabilidade de um sistema é a probabilidade de se obter um desempenho adequado por, pelo menos, um período específico de tempo, sob determinadas condições. Em termos de desempenho de uma ETE, a confiabilidade pode ser entendida como a porcentagem de tempo em que se consegue cumprir os padrões de lançamento de efluentes. Por conseguinte, ocorrerá uma falha de um processo de tratamento sempre que um dado padrão de lançamento de efluente for excedido (NIKU; SCHROEDER, 1981).

A confiabilidade operacional de uma ETE está relacionada aos aspectos de falhas nos equipamentos e aos aspectos inerentes ao processo de tratamento, buscando-se avaliar o grau de confiabilidade que foi alcançado pelos sistemas, definindo o limite ou padrão que pode ser alcançado em cada processo (VON SPERLING; PINTO; OLIVEIRA, 2009).

Um sistema de tratamento de esgotos, quando bem operado traz inúmeros benefícios para a população e se espera que sejam mais eficientes e confiáveis. Além disso, o impacto do lançamento de efluentes e a proteção dos corpos receptores é uma preocupação constante, e com o passar dos anos, as legislações ambientais que regulam os padrões de lançamento, tornaram-se cada vez mais rígidas, para garantir que os impactos ambientais provocados pela disposição destes efluentes sejam aceitáveis.

Outro aspecto a ser ressaltado é que com a mudança das legislações novos estudos de confiabilidade devem ser conduzidos com os recentes padrões de lançamento, como por exemplo, a eficiência de remoção imposta pela Resolução nº 430/11 do CONAMA.

METODOLOGIA

Foram selecionadas oito lagoas de estabilização localizadas em Fortaleza e na sua região metropolitana no período de janeiro de 2007 a março de 2011.

Na Tabela 1 são apresentadas as Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) do tipo lagoas de estabilização avaliadas e suas respectivas configurações:

Tabela 1 – Descrição das lagoas de estabilização avaliadas e suas respectivas configurações

Identificação	Descrição	Sigla
Araturi	2 Lagoas Facultativas em paralelo	FAC
Nova Metrópole	1 Lagoa Facultativa	FAC
José Walter	1 Lagoa Facultativa + 2 Lagoas de Maturação em série	FAC +MAT
Tabapuá	1 Lagoa Facultativa + 2 Lagoas de Maturação em série	FAC +MAT
Tupãmirim	1 Lagoa Facultativa Aerada + 1 Lagoa Facultativa Secundária + 2 Lagoas de Maturação em série	FAC AER + FAC SEC + MAT
Marechal Rondon	1 Lagoa Anaeróbia + 2 Lagoas Facultativas em paralelo + 2 Lagoas de Maturação em série	ANA + FAC + MAT
Palmeiras	1 Lagoa Anaeróbia + 1 Lagoa Facultativa + 2 Lagoas de Maturação em série	ANA + FAC + MAT
Parque Fluminense	1 Lagoa Anaeróbia + 1 Lagoa Facultativa + 1 Lagoa de Maturação em série	ANA + FAC + MAT

Optou-se por estudar os parâmetros de maior relevância e mais analisados no período avaliado: pH, DQO, DQO filtrada, DBO, DBO filtrada, OD, SST, sólidos sedimentáveis, amônia, coliformes totais e *E.coli*. Os dados de monitoramento foram analisados por meio de estudos estatísticos preliminares, visando à caracterização das ETEs estudadas, e ainda a fim de compará-los aos valores comumente encontrados na literatura.

Após a remoção de *outliers*, foram calculadas para cada modalidade de tratamento, as estatísticas básicas relativas ao número de dados, médias aritmética e geométrica, mediana, moda, valores máximos e mínimos, quartis inferior e superior, percentis de 10 e de 90%, amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação.

Também foram avaliados os dados das concentrações afluentes às ETEs, com o intuito de compará-las aos dados encontrados na literatura, além de servir como subsídio sobre os percentuais de eficiência de remoção esperado, considerando os desempenhos usuais de cada tipo de configuração de lagoa de estabilização.

A eficiência se relaciona com o nível de atividades e componentes do projeto durante sua execução (BID, 1997). Seja qual for sua natureza, depende do método empregado na elaboração e execução do projeto da ETE (SATELES *et al.*, 2003). Segundo Dos Santos (2007) para a avaliação da eficiência de uma ETE em termos de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos é importante a definição do grau ou porcentagem de remoção de determinado poluente no tratamento ou em uma etapa dele. O processo de tratamento deve ainda garantir a eficiência desejada e o atendimento aos padrões de lançamento no corpo receptor.

Foram calculadas as eficiências médias de remoção dos constituintes: Demanda Química de Oxigênio – DQO, DQO filtrada, Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, DBO filtrada, Sólidos Suspensos Totais – SST, amônia, coliformes totais e *E. coli* para cada ETE e para cada tipo de tratamento, a fim de compará-las em termos de eficiência de remoção das cargas afluentes. A partir dos limites de lançamento preconizados pelas legislações consultadas, apresentadas na tabela 2, foram determinados valores de concentrações efluentes a serem adotadas no estudo.

Tabela 2 – Padrões de Lançamento de Esgoto das Legislações Estadual e Nacional

Parâmetros/Legislação	Portaria nº 154/02 – SEMACE ¹	Resolução nº 357/05 – CONAMA	Resolução nº 430/11 – CONAMA
pH	7,5 – 10,0	5,0 a 9,0	5,0 a 9,0
DQO	-	-	-
DQO Filtrada	200mg/L	-	-
DBO	-	-	Remoção de 60%
DBO Filtrada	60mg/L	-	-
OD	> 3,0 mg/L	-	-
SST	150mg/L	-	-
Amônia	5mg/L ²	20mg/L	20mg/L
Coliformes Totais	-	-	-
<i>E. coli</i>	5000NMP/100mL	-	-

¹ – Os valores da tabela referem-se aos padrões para lagoas de estabilização, para outros tipos de tratamento são estabelecidos diferentes padrões.

² – A Portaria 111/11 SEMACE altera o padrão de lançamento de amônia para 20mg/L.

Fonte: Adaptado das Resoluções 357/05 e 430/11 CONAMA e 154/02 e 111/11 SEMACE

O conceito de confiabilidade tem estado presente em vários trabalhos na área e uma definição bastante aceita para o termo, citada por Niku e Schroeder (1981), é que a confiabilidade de um sistema é a probabilidade de se obter um desempenho adequado por, pelo menos, um período específico de tempo sob determinadas condições. Em termos de desempenho de uma ETE, a confiabilidade pode ser entendida como a porcentagem de tempo em que se consegue cumprir os padrões de lançamento de efluentes. Por conseguinte, ocorrerá uma falha de um processo de tratamento sempre que um dado padrão de lançamento de efluente for excedido (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005a).

Para o cálculo da confiabilidade das ETEs adotou-se a metodologia desenvolvida por Niku, Schroeder e Samaniego (1979) e utilizada por Oliveira (2006) e Monteiro (2009) a qual determina um valor de concentração média efluente que esteja abaixo dos padrões de lançamento para um determinado nível de confiabilidade. A partir do produto entre a variável normal padronizada e do coeficiente de variação (CV) dos dados (relação entre o desvio padrão e a média dos valores efluentes) obteve-se o coeficiente de confiabilidade (CDC) de cada ETE, que ao ser multiplicado pela concentração efluente especificada na legislação resulta na concentração média efluente para o nível de confiabilidade adotado.

Desta forma, foram calculados os CVs, CDCs, m_x e percentuais esperados de atendimento às metas, por ETE e por modalidade de tratamento para os parâmetros DQO e SST considerando um nível de confiabilidade de 95% ou uma probabilidade de falha de alcançar o padrão de 5%.

RESULTADOS

Os resultados da análise por meio da estatística descritiva das concentrações dos parâmetros pH, DQO, DQO filtrada, DBO, DBO filtrada, OD, SST, amônia, coliformes totais e *E. coli*, efluentes às ETES analisadas, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Estatística descritiva referente às concentrações efluentes por tipo de lagoa

ETE	Parâmetro	pH	DQO	DQO Filtrada	DBO	DBO Filtrada	OD	SST	Amônia	CT	<i>E.coli</i>
	Unidades	-	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	NMP/100mL	
Araturí	Média	8,0	347	68	130	31	4,0	153	21,1	3,7E6	4,7E5
	Desvio Padrão	0,3	108	30	51	14	2,2	31	3,1	3,1E6	3,8E5
	CV (%)	3	31	44	39	44	55	20	15	63	66
	Nº de Dados	32	32	15	7	13	17	29	7	10	18
Nova Metrópole	Média	7,8	374	83	213	45	2,6	202	20,5	2,8E6	5,0E5
	Desvio Padrão	0,3	116	36	44	18	1,6	79	3,6	3,0E6	3,2E5
	CV (%)	4	31	44	21	39	62	39	18	78	54
	Nº de Dados	39	40	20	8	13	19	39	12	16	23
José Walter	Média	7,9	327	94	201	63	4,3	141	24,3	2,2E6	2,2E4
	Desvio Padrão	0,2	119	53	32	36	1,8	52	7,1	4,6E6	2,3E4
	CV (%)	2	36	57	16	57	42	37	29	106	73
	Nº de Dados	30	36	18	9	13	17	32	10	13	22
Tabapuá	Média	8,0	202	64	126	30	2,5	66	22,2	1,5E6	9,4E3
	Desvio Padrão	0,4	101	32	74	13	1,3	37	9,7	3,7E6	1,7E4
	CV (%)	5	50	51	58	43	52	56	44	113	95
	Nº de Dados	35	35	20	9	13	15	34	13	10	19
Tupãmirim	Média	8,4	226	59	104	32	12	98	19,6	6,5E5	1,7E3
	Desvio Padrão	0,3	66	9	28	10	6,6	37	4,4	4,0E6	8,5E3
	CV (%)	4	29	16	27	32	55	37	22	141	136
	Nº de Dados	36	37	14	10	12	20	36	11	13	19
Marechal Rondon	Média	8,5	150	52	67	27	6,3	62	16,1	4,8E5	7,4E1
	Desvio Padrão	0,5	36	15	27	6	3,1	20	2,1	7,7E5	3,4E2
	CV (%)	6	24	28	40	22	49	33	13	86	148
	Nº de Dados	34	31	16	7	12	16	32	5	11	16
Palmeiras	Média	8,6	172	55	60	26	16,0	71	11,2	2,0E5	1,2E2
	Desvio Padrão	0,4	41	17	16	14	3,2	15	4,5	5,4E5	1,6E4
	CV (%)	4	24	31	26	52	20	21	40	124	146
	Nº de Dados	31	31	11	6	11	12	26	4	10	16
Parque Fluminense	Média	8,3	184	53	93	28	5,5	73	27,2	1,7E6	1,6E4
	Desvio Padrão	0,3	62	16	23	7	2,3	29	11,6	3,9E6	6,8E4
	CV (%)	3	34	31	25	23	42	39	43	104	163
	Nº de Dados	37	36	15	8	11	19	36	8	14	20

Obs.: A média dos valores de CT e *E. coli* foi obtida a partir da média geométrica

- **Demanda Química de Oxigênio – DQO**

As Figuras 1 a 3 exibem, respectivamente, o boxplot da variação da DQO nas modalidades FAC, FAC+MAT e ANA+FAC+MAT.

Figura 1 – Boxplot da variação de DQO nas lagoas facultativas (FAC)

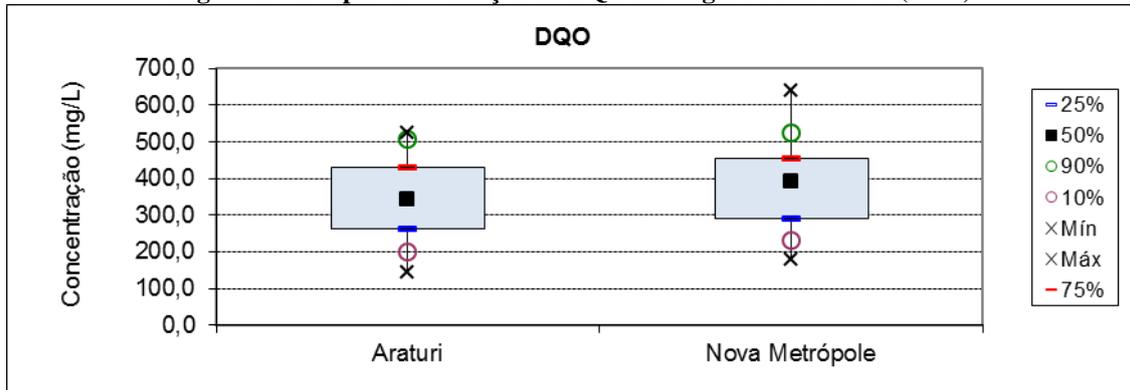


Figura 2 – Boxplot da variação de DQO em lagoas facultativas seguidas de maturação (FAC+MAT)

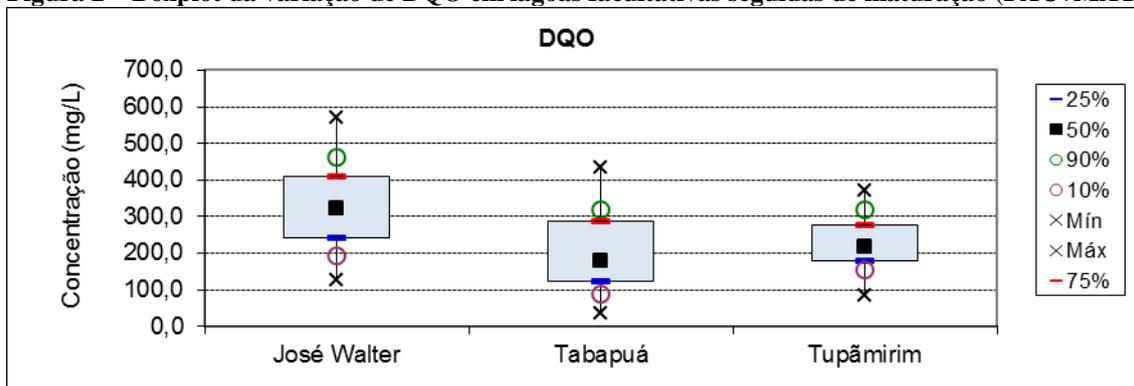
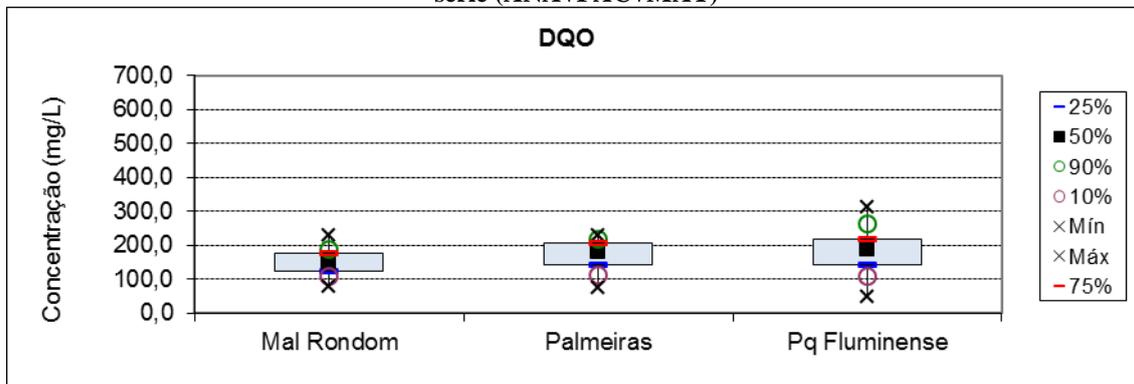


Figura 3 – Boxplot da variação de DQO em lagoas anaeróbias seguidas de facultativa e maturação em série (ANA+FAC+MAT)



Dos Santos (2007) descreve que ETEs constituídas de lagoas facultativas apresentam uma faixa de DQO efluente entre 120 e 200mg/L. No entanto observa-se na Tabela 3 e Figura 1, que as ETEs Araturi e Nova Metrópole apresentaram valores médios de 347 e 374mg/L, respectivamente, muito superior ao intervalo descrito pela literatura. Tal comportamento pode ser devido a um conjunto de fatores como falhas no projeto, sobrecarga orgânica, sobrecarga hidráulica, ou muito comumente devido a falhas operacionais como excesso de lodo ou areia na lagoa, que diminuem o volume útil da lagoa e subsequente diminuição no TDH. Observa-se também na Figura 9 uma grande flutuação dos valores efluentes de DQO conforme observado pelas variações nos percentis de 25% e 75% (tamanho das caixas no gráfico Box-Plot).

Os resultados de DQO para o período de 2007 a 2011 são superiores também aos encontrados por Araújo (2000) na análise de um conjunto de lagoas facultativas da Região Metropolitana de Fortaleza – RMF, que encontrou uma média de 186mg/L.

Estudos realizados por Oliveira e Von Sperling (2005b) apresentaram valores médios de DQO de 525mg/L. Os autores atribuem essa média às contribuições industriais não relatadas pelas estações de tratamento ou o tipo de amostragem praticado, além do baixo consumo per capita de água e, ainda, à existência de menores coeficientes de retorno.

Como pode ser observado na Tabela 3 e Figura 2, a ETE José Walter apresentou uma DQO média bem superior às demais, além de elevada amplitude de dados. Observa-se também que exceto a ETE José Walter, os sistemas compostos de FAC+MAT apresentam DQO efluente mais baixa que as encontradas em lagoas facultativas.

Ressalta-se a importância das lagoas de maturação em realizar o polimento do efluente em termos de matéria orgânica, muito embora se saiba que a principal função dessas lagoas é a remoção de microrganismos patogênicos. A média de DQO nos sistemas FAC+MAT foi de 252mg/L, valor também bem superior ao valor médio de 128mg/L encontrado por Araújo (2000).

Em relação à tecnologia ANA+FAC+MAT observa-se menores valores médios de DQO efluente, além de menores coeficientes de variação. Dos Santos (2007) relata que o intervalo de DQO dessa tipologia está compreendido entre 100 e 180mg/L. Dessa forma, os dados obtidos estão dentro da faixa reportada, destacando-se a ETE Marechal Rondon que obteve uma DQO efluente média de 150mg/L. Araújo (2000) e Monteiro (2009) obtiveram valores médios de DQO de 92mg/L e 68,7mg/L, respectivamente, assim bem inferiores aos encontrados no presente trabalho.

- **Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO**

As Figuras 4 a 6 exibem, respectivamente, o boxplot da variação da DBO nas modalidades FAC, FAC+MAT e ANA+FAC+MAT. Observa-se que de uma forma geral houve comportamento semelhante ao obtido para a DQO, em termos de melhor tipo de tratamento e flutuações alcançadas.

Figura 4 – Boxplot da variação de DBO nas lagoas facultativas (FAC)

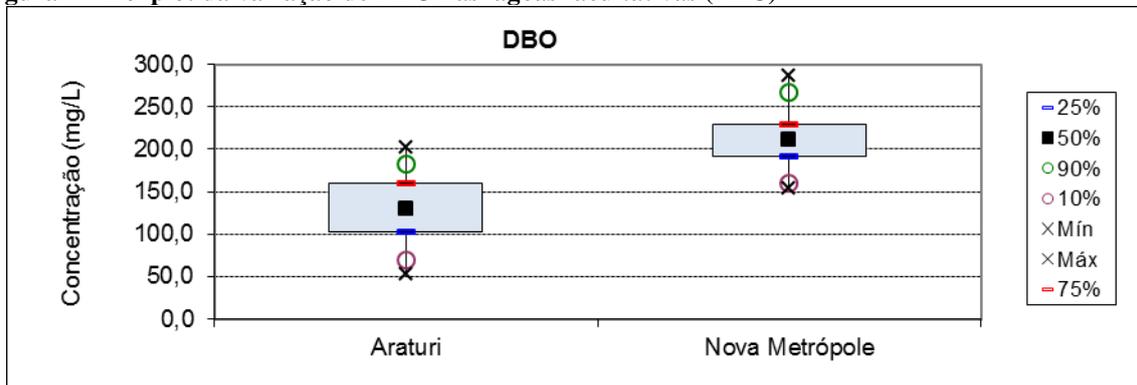


Figura 5 – Boxplot da variação da DBO em lagoas facultativas seguidas de maturação (FAC+MAT)

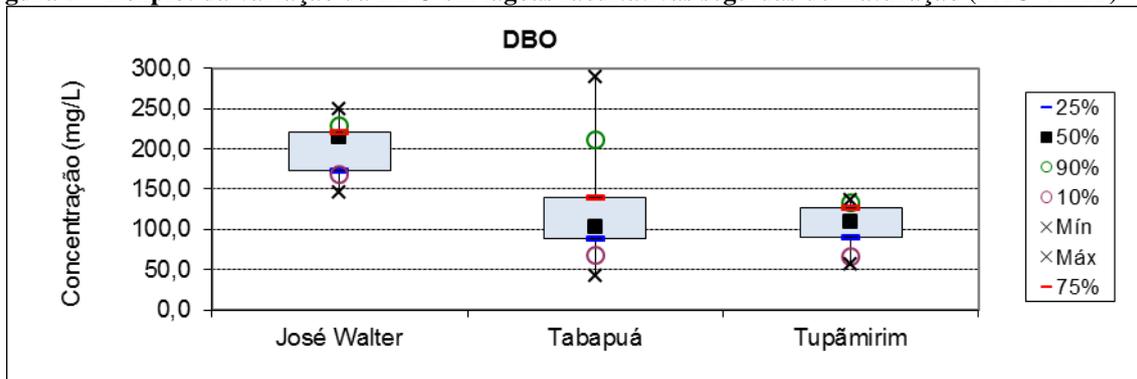
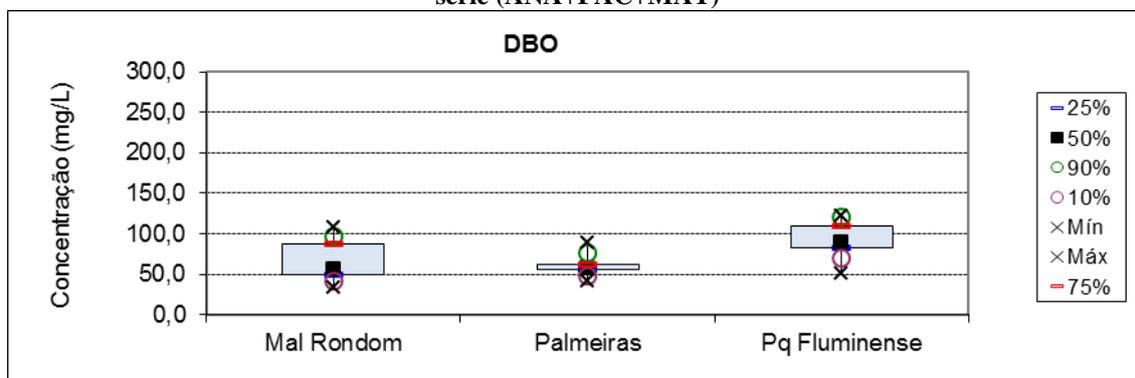


Figura 6 – Boxplot da variação de DBO em lagoas anaeróbias seguidas de facultativa e maturação em série (ANA+FAC+MAT)



Dos Santos (2007) relata que a DBO efluente de lagoas facultativas (FAC) está compreendida entre 50 e 80mg/L. Como pode ser observado na Tabela 3 e Figura 4, as ETEs Araturi e Nova Metrópole apresentaram uma DBO efluente média de 130 e 213mg/L, respectivamente, concentra es bem superiores às descritas pela literatura. Além disso, destaca-se a diferença entre a média das duas ETEs.

Oliveira e Von Sperling (2005a) acharam DBO média de 136mg/L em efluentes de lagoas facultativas, portanto, acima do relatado pela literatura e bem próximo ao obtido na ETE Araturi. Por sua vez Araújo (2000) obteve uma DBO média efluente de 70mg/L para a tipologia FAC no estudo realizado em ETEs também operadas pela CAGECE.

Na Tabela 3 e Figura 5, pode ser observado para a tipologia FAC+MAT que as ETEs Tabapu  e Tupãmirim apresentaram uma DBO média efluente de 127 e 105mg/L, respectivamente, apesar de a ETE Tupãmirim demonstrar uma maior homogeneidade dos dados. A ETE José Walter apresentou um efluente de qualidade inferior, com uma DBO média de 201mg/L.

Para a tipologia ANA+FAC+MAT, observa-se uma maior homogeneidade dos dados, ou seja, menores coeficientes de varia o, além de baixos valores efluentes de DBO (Tabela 3 e Figura 6). Segundo Dos Santos (2007), a concentra o de DBO em uma série ANA+FAC+MAT   da ordem de 40 a 70mg/L. Portanto, os valores de DBO obtidos estão dentro da faixa descrita pela literatura, com exce o da ETE Parque Fluminense, que registrou valores médios de DBO efluente ligeiramente superiores de 93mg/L. Essa ETE possui apenas uma única lagoa de matura o, o que pode justificar o valor encontrado, confirmando a boa eficiência registrada em sistemas que possuem mais de uma lagoa de matura o, servindo essas para o polimento da DBO remanescente.

- **Amônia**

As Figuras 7 a 9 exibem, respectivamente, o boxplot da varia o da amônia nas modalidades FAC, FAC+MAT e ANA+FAC+MAT.

Figura 7 – Boxplot da variação da Amônia em lagoas facultativas (FAC)

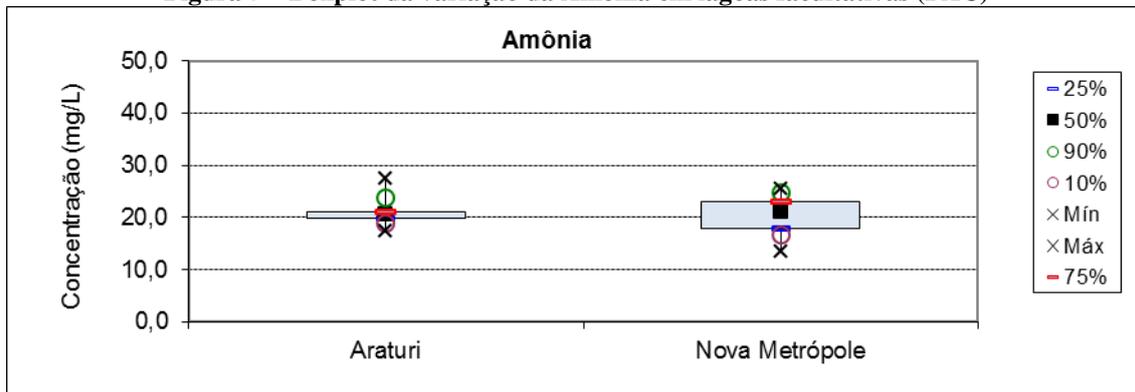


Figura 8 – Boxplot da variação da Amônia em lagoas facultativas seguidas de maturação (FAC+MAT)

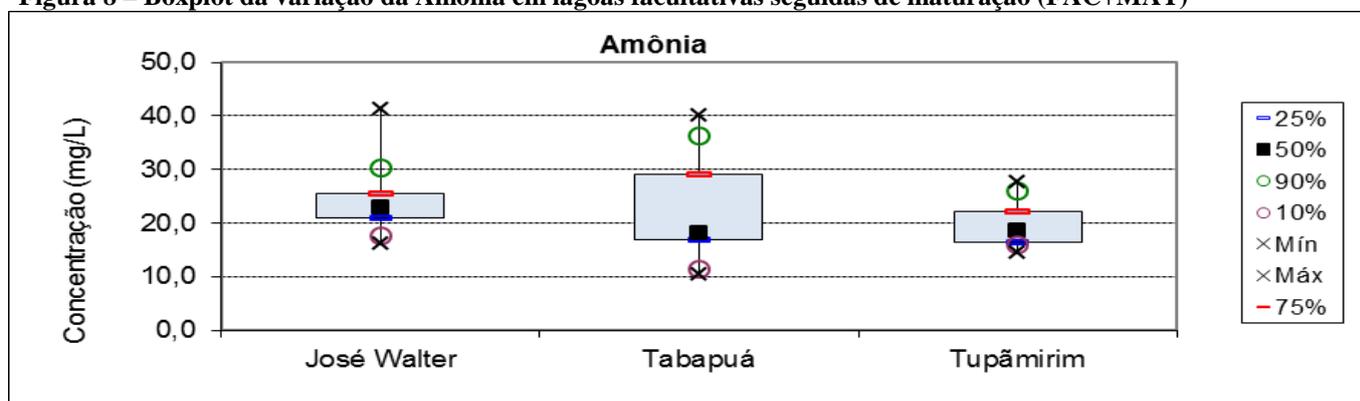
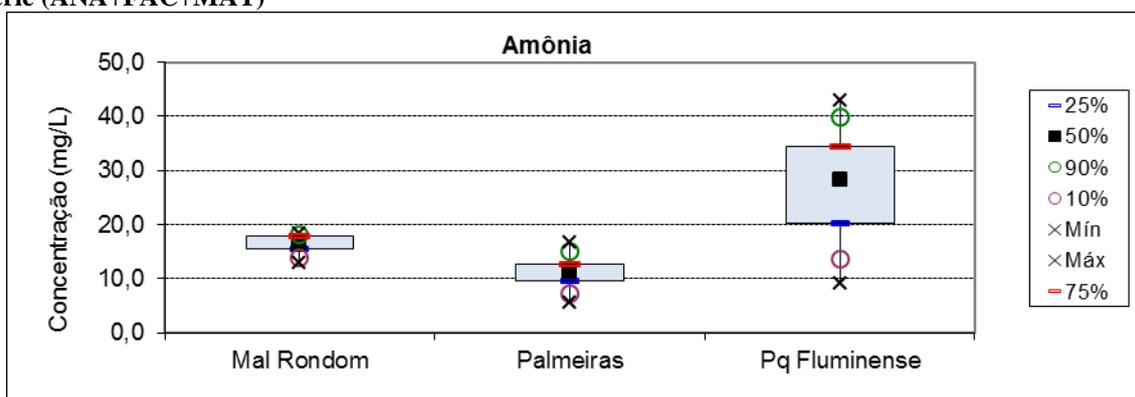


Figura 9 – Boxplot da variação de Amônia em lagoas anaeróbias seguidas de facultativa e maturação em série (ANA+FAC+MAT)



Analisando os dados mostrados na Tabela 3 e Figura 7 para a modalidade FAC,   possível observar que as ETEs Araturi e Nova Metrópole apresentaram uma média efluente de nitrogênio amoniacal de 21,1 e 20,5mg/L, respectivamente, valores acima do limite de 5mg/L definido na Portaria n  154/02 da SEMACE. Araújo (2000) obteve uma média de 25,6mg/L para esta modalidade. Entretanto, esses valores não causam surpresa, pois em lagoas facultativas a concentra o de amônia   usualmente superior a 15mg/L (VON SPERLING, 2002).

Desde abril de 2011, começou a vigorar a Portaria n  111/11 da SEMACE, que altera o padrão de lançamento de amônia para 20mg/L, ficando assim igual ao que estabelece a Resolu o n  430/11 do CONAMA. Dessa

forma, a ETE Araturi e Nova Metrópole obtiveram 40 e 20% dos dados, respectivamente, dentro do preconizado pelas legislações atuais.

Observa-se através da Tabela 3 e Figura 8 que todas as ETEs da tipologia FAC+MAT apresentaram 50% dos dados acima do estabelecido pela Portaria nº 111/11 da SEMACE.

Como pode ser visto na Tabela 3 e Figura 9, as ETEs Marechal Rondon e Palmeiras apresentam todos os valores dentro do preconizado pelas legislações vigentes. Reitera-se que esse tipo de tratamento não consegue remover amônia até o limite que era estabelecido pela legislação. Segundo Von Sperling (2005), a concentração efluente usual da tipologia ANA+FAC+MAT está compreendida entre 10 e 15mg/L.

A ETE Parque Fluminense que possui apenas uma lagoa de maturação na série ANA+FAC+MAT obteve uma grande heterogeneidade dos dados e uma média de 27,2mg/L, bem superior as demais, 16,1 (Marechal Rondon) e 11,2mg/L (Palmeiras). Uma possibilidade levantada para uma média efluente tão elevada na ETE Parque Fluminense é de que apenas uma lagoa de maturação não seja suficiente para elevação do pH até níveis que promovam a volatilização da amônia, um dos mecanismos mais importantes de remoção de amônia em lagoas de estabilização.

- *Escherichia coli* – *E. coli*

As Figuras 10 a 13 exibem, respectivamente, o boxplot da variação de *E.coli* nas modalidades FAC, FAC+MAT e ANA+FAC+MAT.

Figura 10 – Boxplot da variação de *E. coli* em lagoas facultativas (FAC)

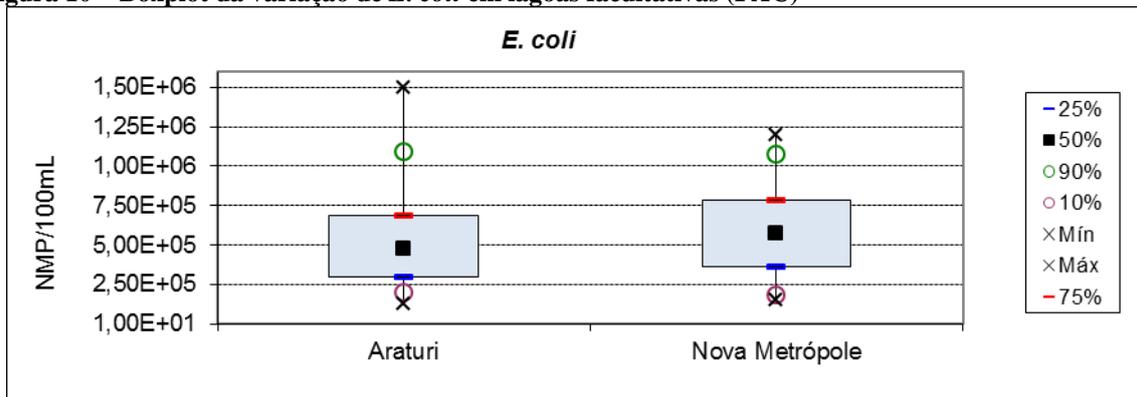


Figura 11 – Boxplot da variação de *E. coli* em lagoas facultativas seguidas de maturação (FAC+MAT)

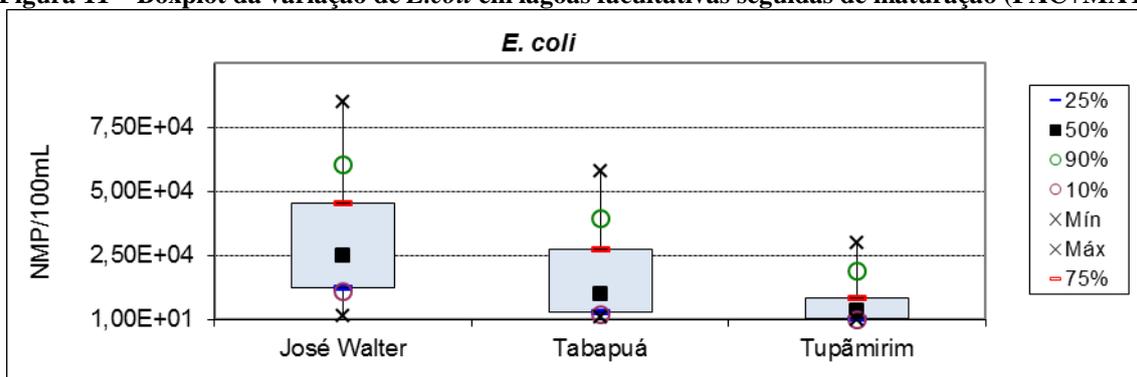


Figura 12 – Boxplot da variação em *E.coli* em lagoas anaeróbias seguidas de facultativa e maturação em série (ANA+FAC+MAT)

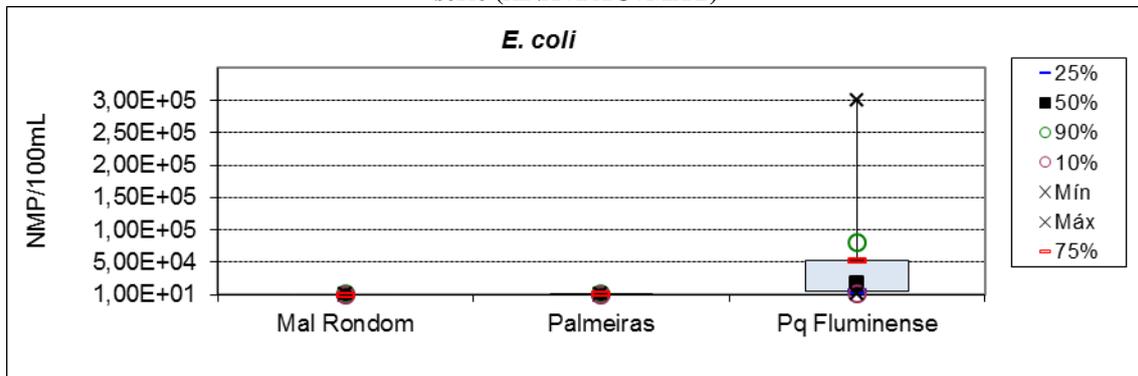
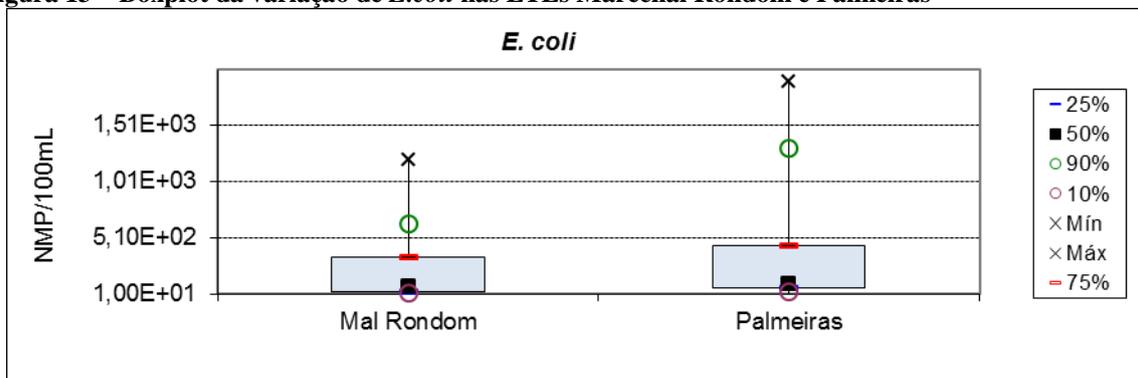


Figura 13 – Boxplot da variação de *E.coli* nas ETEs Marechal Rondon e Palmeiras



Na Tabela 3 e Figura 10, para a modalidade FAC, é possível verificar que as duas ETEs possuem todos os valores de *E. coli* acima do permitido pela Portaria nº 154/02 da SEMACE, cujo limite é 5000NMP/100mL. A ETE Araturi apresentou uma média de $4,7 \times 10^5$ e a ETE Nova Metrópole $5,0 \times 10^5$ NMP/100mL, valores bem próximos aos reportados em Araújo (2000) de $1,2 \times 10^6$ NMP/100mL. Comprova-se assim que lagoas facultativas isoladas não são capazes de produzir efluentes com os padrões de lançamento vigentes quer no Ceará quer em outros estados do Brasil. Jordão e Pessoa (2005) relatam concentrações esperadas dos efluentes de lagoas facultativas da ordem de 10^6 a 10^7 NMP/100mL.

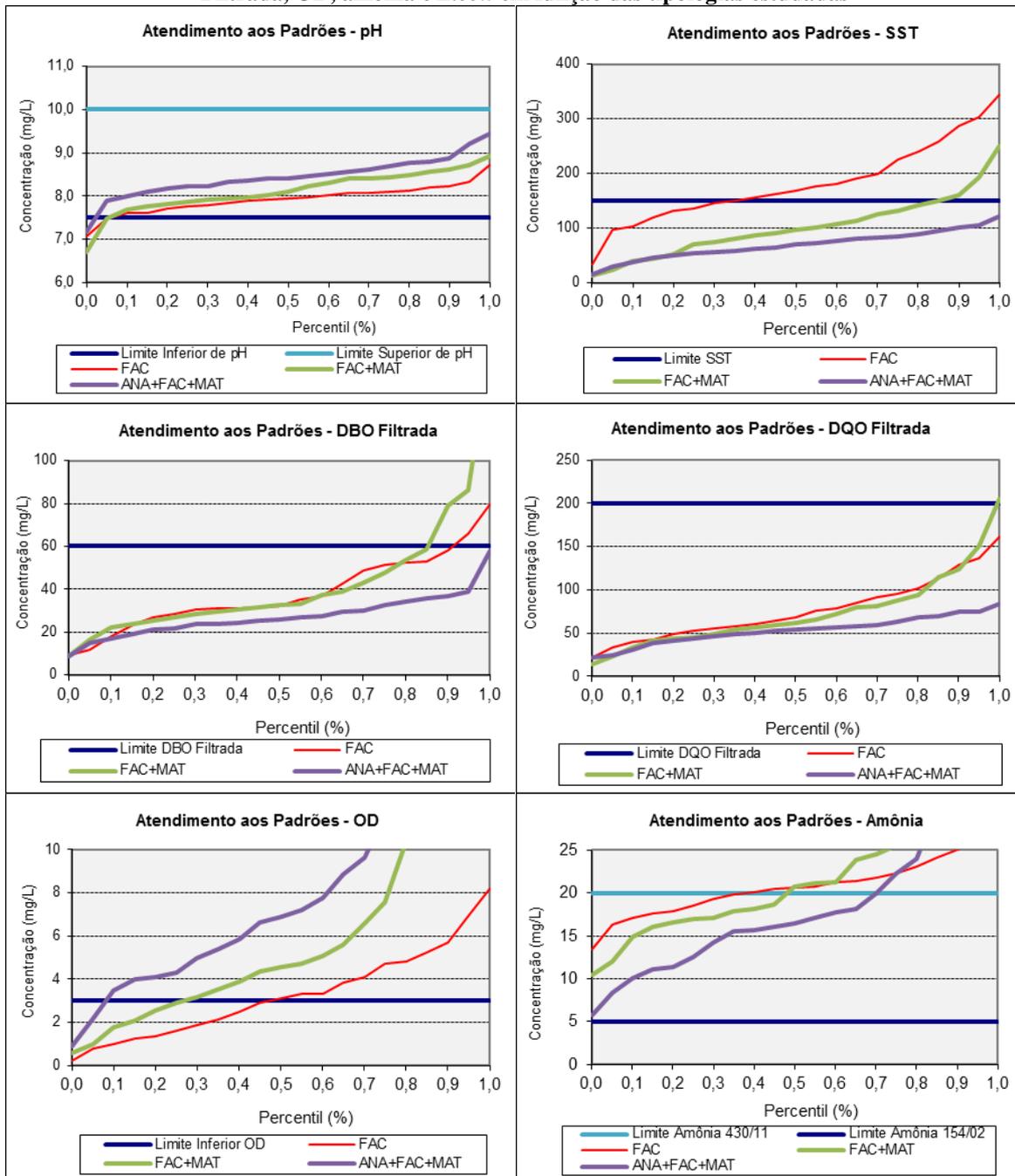
Analisando os dados nos sistemas compostos de FAC+MAT (Tabela 3 e Figura 11), a ETE Tupãmirim apresentou a menor média de *E. coli* dentro a tipologia estudada, com valores médios de $6,3 \times 10^3$ NMP/100mL, enquanto as concentrações obtidas nas ETEs José Walter e Tabapuá foram $3,1 \times 10^4$ e $1,8 \times 10^4$ NMP/100mL, respectivamente.

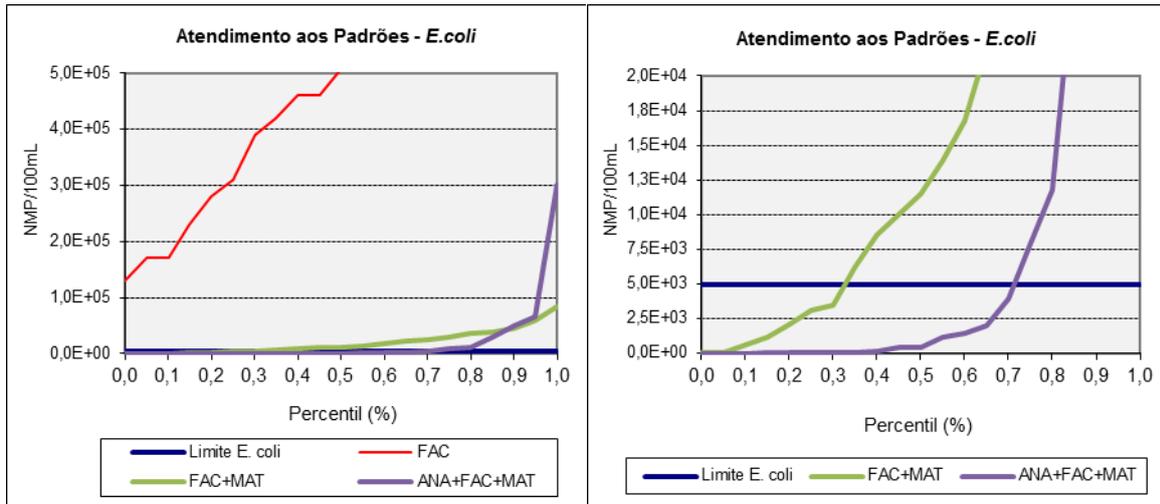
Para as ETEs do tipo ANA+FAC+MAT mostradas na Tabela 3 e Figura 12, observa-se que a ETE Parque Fluminense, que possui apenas uma lagoa de maturação, apresentou os maiores valores médios de *E. coli*, da ordem de $1,6 \times 10^4$ NMP/100mL. Segundo Von Sperling (2002) para produzir efluentes que possam cumprir os padrões estabelecidos pelas legislações é necessário uma série de 3 a 4 lagoas de maturação.

Por meio da Tabela 3 e Figura 13, é possível observar que as ETEs, que possuem duas lagoas de maturação, apresentam todos os valores dentro do limite preconizado pela legislação. Os valores médios de *E. coli* obtidos para as ETEs Marechal Rondon e Palmeiras foram $2,3 \times 10^2$ e $4,0 \times 10^2$ NMP/100mL, respectivamente. Segundo Dos Santos (2007), lagoas ANA+FAC+MAT apresentam concentração efluente usual de 10^2 a 10^4 NMP/100mL. Concentrações médias menores para o parâmetro *E. coli* foram obtidas em Araújo (2000), da ordem de $2,3 \times 10^1$ NMP/100mL, em estudos realizados em lagoas de estabilização do tipo ANA+FAC+MAT operadas pela CAGECE.

Na Figura 14 observa-se os gráficos de distribuição de frequência acumulada para os parâmetros pH, SST, DQO Filtrada, DBO Filtrada, OD, amônia e *E. coli* em função das tipologias estudadas.

Figura 14 – Distribuição de frequência acumulada para os parâmetros pH, SST, DQO Filtrada, DBO Filtrada, OD, amônia e *E.coli* em função das tipologias estudadas





Na Figura 14 é possível observar para o parâmetro DBO filtrada nas lagoas facultativas, que 90% dos dados estiveram dentro dos padrões de descarte estabelecidos na Portaria nº 154/02 da SEMACE. Em relação à tipologia FAC+MAT 85% dos dados de DBO filtrada estiveram dentro dos padrões, e 100% dos dados para as lagoas do tipo ANA+FAC+MAT.

Analisando-se a DQO filtrada, e o limite de 200 mg/L definido na supracitada legislação, verifica-se que 100% dos dados atenderam à legislação para todas as configurações de lagoas de estabilização avaliadas.

Quanto ao parâmetro SST, observa-se que para as lagoas facultativas (FAC), 35% dos dados estiveram dentro dos padrões especificados na Portaria nº 154/02 da SEMACE, enquanto nas lagoas facultativas seguidas de maturação (FAC+MAT) este valor subiu para 85%. Por fim, os sistemas compostos por lagoas anaeróbias seguidas de facultativas e maturação em série (ANA+FAC+MAT), 100% dos dados atenderam à legislação.

Em relação ao nitrogênio amoniacal, todas as modalidades obtiveram 100% dos dados acima da concentração de 5mg/L definida na Portaria nº 154/02 da SEMACE. Considerando o novo padrão de 20mg/L, estabelecido pela Resolução nº 430/11 do CONAMA e pela Portaria nº 111/11 da SEMACE, tem-se que 40% dos dados da tipologia FAC dentro do padrão estabelecido. Para as modalidades FAC+MAT e ANA+FAC+MAT tem-se que 50% e 70% dos dados, respectivamente, se encontram dentro do novo limite imposto.

Em relação à qualidade microbiológica, 100% dos dados da tipologia FAC estão fora do padrão especificado pela Portaria nº 154/02 da SEMACE em termos do parâmetro *E.coli*, sendo que 70% e 30% dos dados estiveram fora, respectivamente, para as modalidades FAC+MAT e ANA+FAC+MAT.

Os testes de aderência às distribuições foram aplicados para analisar os ajustes às distribuições normal, lognormal, gama e exponencial. Houve uma grande variação nos resultados obtidos, dependendo do tipo de teste aplicado. Os resultados variaram ainda mais expressivamente quando se compara os resultados dos testes Kolmogorov-Smirnov e Qui-quadrado. Entretanto, a distribuição lognormal pode ser adotada como representante do comportamento de todos os parâmetros. Portanto, é possível utilizar a metodologia descrita por Niku *et al* (1979) para o cálculo do coeficiente de confiabilidade (CDC).

Foram calculados os coeficientes de confiabilidade (CDC) para os parâmetros de interesse, considerando os coeficientes de variação (CV) efetivamente apresentados pelas ETEs, para um nível de confiabilidade de 95%. A partir desses dados foi possível determinar as concentrações de projeto (m_x) necessárias para o alcance dos padrões especificados pela legislação (X_s). Calculou-se também, o percentual esperado de atendimento aos padrões de lançamento adotados. Foi utilizada como referência a Portaria nº 154/02 da SEMACE e em alguns casos a Resolução nº 430/11 do CONAMA.

No parâmetro SST, o maior CV foi obtido pela ETE Tabapuá (FAC+MAT), entretanto essa ETE apresentou uma boa eficiência de remoção, com uma média de 67%. Enquanto a ETE Nova Metrópole (FAC) apresentou uma péssima eficiência de remoção, uma média de apenas 16% e o CV obtido foi de 0,39, ou seja, denotando

uma maior estabilidade operacional e um efluente apresentando uma média de 202mg/L, acima do estipulado pela legislação estadual.

No parâmetro amônia, os menores valores de CDC foram obtidos nas ETES Tabapuá (FAC+MAT), Palmeiras e Parque Fluminense, ambas do tipo ANA+FAC+MAT. Interessantemente, o maior valor de CDC foi obtido na ETE Marechal Rondon, também da tipologia ANA+FAC+MAT.

A Tabela 4 apresenta os valores de percentual esperado de atendimento à legislação dos parâmetros DQO filtrada, DBO filtrada, SST, amônia e *E.coli* para as ETES avaliadas.

Tabela 4 – Percentual esperado de atendimento à legislação

Parâmetro	Araturi	Nova Metrópole	José Walter	Tabapuá	Tupã mirim	Mal Rondon	Palmeiras	Parque Fluminense
DQO (%)	99,7	98,9	95,5	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0
DBO (%)	96,4	82,5	57,3	96,9	98,6	100,0	97,2	100,0
SST (%)	50,5	27,1	63,7	96,6	91,2	99,8	100,0	98,1
Amônia 5mg/L (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0
Amônia 20mg/L (%)	39,2	48,2	29,6	48,6	58,2	95,5	95,4	29,3
<i>E. coli</i> (%)	0,0	0,0	9,3	52,8	93,2	99,9	99,9	56,4

Com relação ao parâmetro DQO verifica-se que todas as ETES estudadas apresentaram elevado percentual de atendimento (> 95%), com destaque para as ETES do tipo ANA+FAC+MAT que exibiram atendimento ao padrão em 100% do tempo.

Para a DBO os melhores resultados foram obtidos pelas ETES pertencentes à tipologia ANA+FAC+MAT em que o percentual esperado de atendimento esteve próximo de 100%. A ETE José Walter foi a que apresentou o menor percentual de atendimento (<60%), muito embora pertença a tipologia FAC+MAT.

Para os SST, novamente, os maiores percentuais de atendimento foram obtidos nas ETES Mal Rondon, Palmeiras e Parque Fluminense, pertencentes à modalidade ANA+FAC+MAT. As ETES Araturi e Nova Metrópole, ambas do tipo FAC+MAT, apresentaram reduzidos percentuais de atendimento, em especial para essa última.

Observa-se que para a amônia quando o padrão de lançamento era 5mg/L, todas as ETES possuíam nenhuma ou quase nenhuma probabilidade de alcançar o padrão de lançamento, com exceção da ETE Palmeiras que apresentou apenas 3%, como cumprimento esperado ao padrão, todas as outras ETES apresentaram 0%. Com o aumento do limite para 20mg/L, observa-se que o percentual esperado de cumprimento aos padrões aumentou significativamente.

De acordo com a Tabela 4, para o parâmetro *E.coli*, as ETES Araturi Nova Metrópole constituídas apenas por lagoa facultativa (FAC) apresentaram probabilidade nula de atendimento ao padrão estabelecido pela legislação. Já a ETE José Walter, apesar de ser composta por lagoa facultativa seguida de uma lagoa de maturação, é esperado que a probabilidade de atendimento ao padrão de *E.coli* seja menor que 10%. Dessa forma, verifica-se que em relação às ETES pertencentes a sua tipologia, a ETE José Walter mostrou um desempenho inferior, levando a presumir possíveis problemas operacionais.

CONCLUSÕES

Em relação ao atendimento aos padrões, observou-se que dentre os parâmetros pH, DQO filtrada e DBO filtrada, o desempenho das ETES foi similar, destacando-se a tipologia ANA+FAC+MAT com um desempenho superior. Os testes de aderência às distribuições normal, lognormal, gama e exponencial revelaram haver uma grande variação nos resultados obtidos, dependendo do tipo de teste estatístico aplicado. De uma maneira geral, a distribuição lognormal pode ser adotada como representante do comportamento de todos os parâmetros.

Para todos os parâmetros, foi grande a variabilidade dos coeficientes de variação (CV) e de confiabilidade (CDC) das ETEs, não sendo evidenciada correlação entre os valores de CDC e as modalidades de tratamento. As ETEs José Walter e Tabapuá apresentaram os valores mais baixos de CDC no parâmetro DQO, o que denota que essas ETEs possuem uma menor estabilidade operacional. Os maiores valores de CDC foram apresentados pela ETE Tupãmirim e pelas ETEs da modalidade ANA+FAC+MAT (Mal Rondon, Palmeiras e Parque Fluminense).

Quanto ao percentual de atendimento à legislação, o estudo indicou que alguns parâmetros como os microbiológicos e os relativos aos nutrientes não são atendidos em boa parte do tempo. Entretanto, verificou-se bom nível de atendimento em relação à remoção da matéria orgânica, com destaque para as ETEs do tipo ANA+FAC+MAT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAÚJO, L. F. P. Reúso com Lagoas de estabilização, potencialidades no Ceará – Fortaleza: SEMACE, p.132. 2000.
2. BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID), Oficina de Evaluación (EVO), Evaluación: Uma herramienta de gestión para mejorar el desempeño de los proyectos, 1997
3. CEARÁ. GOVERNO DO ESTADO. Portaria 154, de 22/07/2002. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. 2002
4. CEARÁ. GOVERNO DO ESTADO. Portaria 111, de 05/04/2011. 2011
5. CONAMA. Resolução nº. 357/2005 – Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento e estabelecimento das condições e padrões de lançamento de efluentes. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente. Brasília. 2005.
6. CONAMA. Resolução nº. 430/2011 – Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2011.
7. DOS SANTOS, A. B., Avaliação técnica de sistemas de tratamento de esgotos. Banco do Nordeste, Fortaleza, 2007, 206 p.
8. JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. Segrac Editora, 4ª Ed., Belo Horizonte, 2005, 906 p.;
9. MONTEIRO, C. L. R..Análise da eficiência e confiabilidade em 56 estações de tratamento de esgotos localizadas na região metropolitana de Fortaleza. Dissertação. 2009
10. NIKU, S.; SCHROEDER, E. D.; SAMANIEGO; F. J. Performance of activated sludge process and reliability-based design. Journal Water Pollution Control Association, v. 51, n. 12, p. 2841 - 2857, Dec., 1979
11. NIKU, S., SCHROEDER, E. D., Factors affecting effluent variability from activated sludge processes. Journal Water Pollution Control Association, v. 53, n. 5, p. 546 - 559, May, 1981.
12. OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: Análise de desempenho. Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), v. 10, p. 347 – 357, 2005a;
13. OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: influência de fatores de projeto e operação. Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), v. 10, p.358 – 368, 2005b;
14. OLIVEIRA, S. M. A. C. Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. Tese. Belo Horizonte, 232 p., 2006.
15. OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of stabilizations ponds systems. Water Sci Technol, 55(11):127-34. 2007;
16. OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. Water Research, v. 42, p. 1182 – 1194. 2008;
17. SATELES, W. P.; PAZ, F. E.; MEDRADO, S.; PASQUALETTO, A. Eficiência das lagoas de estabilização da estação de tratamento de esgoto do parque Atheneu, Goiânia, 2003.
18. VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização, v.3, 2ª Ed. Belo Horizonte, 196 p. 2002.



XII SIBESA
XII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental
2014



19. VON SPERLING, M.; PINTO, M. T.; OLIVEIRA, S. C.. Síntese Global do Desempenho e da Confiabilidade dos Sistemas de Tratamento de Esgoto. In: Nutrientes de Esgoto Sanitário: Utilização e Remoção, Ed. ABES. Cap. 11. 2009.