PREVISÃO DO VOLUME DE LODO PRODUZIDO EM ESTAÇAO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM PREDOMINÂNCIA DE COR

Mariangela Dutra de Oliveira [1]
Engenheira Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora efetiva do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).
Gabriel Peruzzo Vianna [2]
Engenheiro Sanitarista e Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).

Endereço[1]**:** Av. Vitória 1729 - Jucutuquara, Vitória - ES, 29040-780, Brasil - +55 (27) 99969-2509, mariangeladutra@ifes.edu.br

RESUMO

A estimativa da produção de lodo em Estações de Tratamento de Água constitui etapa essencial para o planejamento operacional, dimensionamento de unidades e definição de disposição final sustentável. Este estudo avaliou métodos empíricos da literatura para estimar o volume de lodo gerado em unidade com elevada cor na água bruta. Os resultados comparados com as medições reais de lodo, não apresentando significância estatística (p-valor = 5%). Foi proposta uma formulação adequada à realidade da ETA, utilizando o modelo de regressão linear múltipla. Considerando o reduzido número de dados medidos, foi possível a construção de modelo com duas variáveis (turbidez e cor), que apresentaram coeficiente de determinação de 95% e erro médio quadrático de 26,4t, sem significâncias estatísticas (p-valor de 5%). Ao aplicar a formulação proposta e comparar os resultados com o volume e medido os resultados, utilizando o teste de Wilcoxon, não apresentaram significância (p-valor = 5%), mesmo existindo uma forte correlação entre os resultados (r = 98%). Conclui-se que, embora a variável cor tenha se mostrado relevante, os dados disponíveis são insuficientes para validação estatística, sendo considerados preliminares.

PALAVRAS-CHAVE: produção de lodo, estação de tratamento de água; regressão linear múltipla**.**

1 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), entre os quais se destaca o ODS 6 – Água Potável e Saneamento. Esse objetivo busca assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento, por meio de ações como a melhoria da qualidade da água, a redução da poluição, a eliminação de despejos irregulares e a minimização da liberação de substâncias químicas e materiais perigosos. Ademais, prevê o aumento da reciclagem e da reutilização segura da água, com metas estabelecidas até 2030 (Organização das Nações Unidas - ONU, 2025).

A agenda global dialoga diretamente com os desafios enfrentados pelo Brasil. No país, a preocupação com o acesso seguro e em quantidade adequada à água potável ganhou força com a Lei nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico e estabelece diretrizes voltadas à universalização dos serviços (Brasil, 2020). Nesse contexto regulatório, o tratamento de água para consumo humano é feito principalmente por estações de tratamento de água de ciclo completo, que engloba as etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (Di Bernardo, Dantas, Voltan, 2017). Cada uma dessas etapas contribui para a remoção de partículas em suspensão e microrganismos que possam comprometer a saúde dos consumidores, garantindo assim a potabilidade da água distribuída.

Entretanto, apesar da relevância sanitária dessas unidades, seu funcionamento gera impactos ambientais consideráveis. O descarte inadequado do lodo produzido nas etapas de decantação e filtração constitui um dos principais desafios (Di Bernardo, Dantas, Voltan, 2017). Apesar da magnitude desse resíduo, unidades de tratamento de lodo ainda são pouco comuns nas Estações de tratamento de água (ETAs) brasileiras. Assim, o resíduo gerado nos decantadores e na lavagem dos filtros são frequentemente descartados diretamente em corpos hídricos próximos (Di Bernardo, Dantas, Voltan, 2012). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e

Estatística – IBGE (2017) a maior parte do lodo gerado nas estações de tratamento são lançados em corpos d'água (52%) e em aterro sanitário (21%) quanto avaliado todo o lodo gerado no Brasil.

No Estado do Espírito Santo tem-se 76% lançado em corpos d'água, seguido de 9% lançado em lixões ou terrenos baldios e 5% lançado em aterro sanitário IBGE (2017). Tal prática evidência que, embora os resíduos produzidos pelas ETAs sejam classificados como sólidos inertes e inofensivos segundo NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), sua destinação final ainda constitui um desafio significativo.

Paralelamente às questões supracitadas, outra dificuldade enfrentada pelas ETAs refere-se à baixa precisão dos modelos empíricos utilizados para estimar a geração de sólidos. Embora existam diversas equações propostas na literatura, geralmente baseadas em parâmetros como vazão afluente, dosagem de coagulantes, sólidos em suspensão e turbidez, estudos apontam que tais formulações nem sempre reproduzem adequadamente as condições reais de operação, resultando em estimativas com elevada incerteza e possível sub ou superdimensionamento das unidades de manejo de resíduos. Além disso, poucas equações incorporam de forma explícita e relevante a variável cor da água bruta, apesar de sua reconhecida influência na carga de matéria orgânica e, consequentemente, na formação de lodo (KATAYAMA et al, 2015). Essa limitação revela uma lacuna técnica importante que precisa ser melhor estudada.

2 OBJETIVOS

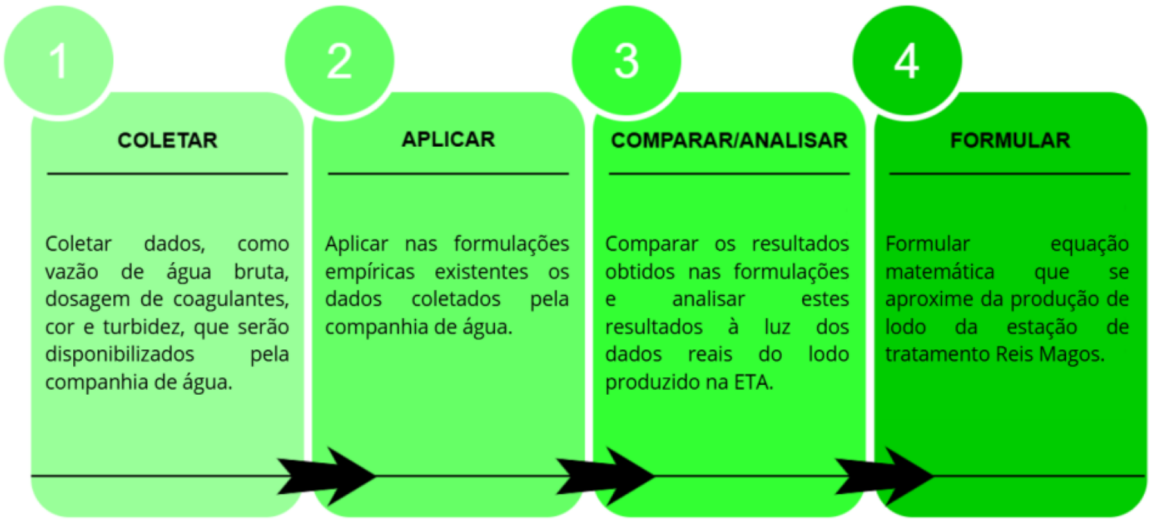
Avaliar os métodos empíricos para uma ETA com elevado nível de cor na água bruta comparando os resultados entre si e com dados reais gerados na ETA. Pretende-se ainda propor uma formulação matemática mais adequada à realidade operacional da estação, a fim de reduzir as discrepâncias entre os valores estimados e os volumes efetivamente produzidos

3 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2002), a pesquisa bibliográfica compreende o desenvolvimento de estudos por meio de consultas a livros, artigos e publicações científicas em geral capazes de fundamentar a produção científica. A pesquisa apresenta abordagem quantitativa, uma vez que se fundamenta na análise numérica de dados operacionais reais das ETAs, visando identificar relações, padrões e variáveis capazes de compor a formulação matemática proposta. Quanto à sua natureza, é uma pesquisa aplicada, pois busca a solução de um problema real. No que se refere aos objetivos, o estudo é exploratório, pois visa aprofundar a compreensão das relações entre as variáveis operacionais envolvidas no processo e identificar elementos que permitam a elaboração de uma formulação matemática capaz de melhorar a estimativa da produção de lodo de ETA com água bruta com elevados valores de cor.

O esquema apresentado na Figura 1 ilustra as etapas metodológicas que orientaram o desenvolvimento deste estudo. O processo foi organizado em quatro fases principais: coletar, aplicar, comparar, analisar e formular.

Figura 1 – Etapas a serem realizadas no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Área do estudo de caso

A área de estudo foi a estação de tratamento de água localizada na região sudeste do Brasil, sob concessão da companhia estadual, que opera com vazão de projeto de 500 L/s, em unidade do tipo convencional completo, composta por dois módulos pré-fabricados de 250L/s, composto pelas unidades de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação. A unidade dispõe de Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR), com tratamento conjunto de lodo de decantadores e água de lavagem dos filtros. O sistema é composto por duas lagoas que funcionam como decantadores, com descarte do clarificado e bombeamento do lodo para unidades de desidratação em número de quatro do tipo sacos geotêxteis, operando 2 a 2 alternadamente, sendo o rodízio realizado semanalmente.

3.2 Coleta e tratamento de dados

Os dados operacionais utilizados no estudo foram fornecidos em planilhas eletrônicas pela Concessionária e organizadas em planilha eletrônica e segmentadas de forma a compatibilizar cada conjunto de informações com o respectivo período de retirada de lodo da ETA A Tabela 1 apresenta o período de armazenamento do lodo nos geotêxtis (2023 a 2025) e o volume retirado e encaminhado para aterro, em toneladas.

Tabela 1 – Dados do período de recebimento de lodo pelos geotêxtis e o volume de lodo (t) encaminhado para aterro

Período de armazenamento de lodo	Volume de Lodo encaminhado para aterro (t)
1º período – 02/06/2023 a 21/12/2023	275,34
2º período – 22/12/2023 a 28/02/2024	205,43
3º período – 04/03/3034 a 17/07/2024	194,20
4º período – 09/08/2024 a 24/01/2025	108,24

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as variáveis disponibilizadas, foram selecionados para desenvolvimento desse estudo: Tu = turbidez da água bruta (NTU), C = cor aparente da água bruta (uH), D = dosagem do coagulante Polifer (mg/L) e Q = vazão média de água bruta a ser tratada (L/s), por representarem diretamente as condições de qualidade da água afluente e o regime operacional da estação. Para cada um desses parâmetros foram determinados os valores mínimos, médios e máximos, de modo a representar três cenários operacionais distintos (condição mais branda, condição típica e condição mais crítica).

Foi avaliado o número de dados fornecidos pela estatística descritiva, avaliando a sua normalidade e linearidade, a correlação entre turbidez e cor em cada período e entre a dosagem de coagulante e turbidez e

cor, verificando qual das duas variáveis é mais expressiva na determinação da dosagem de coagulante na ETA, sempre considerando o nível de significância de 5%.

3.3. Aplicação das formulações empíricas

Utilizando os dados operacionais e de água bruta, já tratados, foi determinado com as formulações empíricas clássicas a produção de lodo gerado na ETA. Foram consideradas as equações propostas por American Water Works Association – AWWA – 1978 (Andreoli, 2013), Association Française pour l'Étude des Eaux – AFEE (1993), Cornwell – 1987 (Cornwell, 2006), Kawamura – 1991 (Kawamura, 2000), Dillon (1996), American Water Works Association – AWWA (1999) e Richter (2001).

As formulações empíricas foram aplicadas separadamente com os cenários de mínimo, médio e máxim produção de lodo, considerando os períodos de armazenamento fornecidos pela concessionária, permitindo a comparação dos volumes de lodo estimados com os dados observados na ETA. Esses dados permitiram avaliar não apenas o ajuste das equações às condições médias de operação, mas também sua sensibilidade a cenários mais conservadores (mínimos) e mais críticos (máximos) de qualidade da água afluente e de carga hidráulica da ETA. O Quadro 2 sintetiza em quais das fórmulas empíricas cada um desses parâmetros foi efetivamente utilizado como variável de cálculo.

Quadro 2 – Parâmetros considerados em cada formulação

Fórmula / Parâmetro	Tu = Turbidez da água bruta (NTU)	C = Cor na água bruta (uH)	D = dosagem de coagulante (mg/L)	Q = Vazão média de água bruta a ser tratada (L/s)
AWWA (1078)	X			
AFEE (1983)	X	X	X	
Cornwell (1987)			X	X
Kawamura (1991)	X		X	
Dillon (1996)		X		
AWWA (1999)			X	X
Richter (2001)	X	X	X	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uso das formulações algumas considerações foram feitas:
• Cabe ressaltar que na ETA não se faz uso de polímero no pré-tratamento e não se teve adição de cal para correção de pH, ou magnésio para remoção da dureza na água bruta no período da pesquisa;
• Nas formulações que utilizam sulfato de alumínio ou cloreto férrico foi utilizada a dosagem do coagulante Polifer (a base de alumínio e ferro) sem nenhum ajuste na formulação.
• Quando não há informação sobre SST foi utilizada a relação SST = 1,5 x Tu, segundo Ferreira Filho (2017).
• Na formulação de AWWA (1999) e Richter o valor de dosagem de coagulante foi multiplicado pela constante de 2,9 correspondente a constante de cloreto férrico.
• Na formulação de Kawamura – 1991 (Kawamura, 2000) foi utilizado o valor de $Fc1$médio de 0,25 e o valor de $Fc2$ médio de 1,50.
• Na formulação da Richter (2001) foi utilizado $K1$ médio de 1,5 e $K2$ médio de 0,4.

3.4 Comparação e análise das formulações empíricas

As análises estatísticas foram conduzidas no software JASP, uma plataforma gratuita e de código aberto para análise de dados, baseada na linguagem R (JASP TEAM, 2023). Inicialmente foram calculadas estatísticas descritivas básicas (moda, mediana, média, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose e valores mínimo e máximo) para o volume real e para cada variável utilizada nas fórmulas empíricas.

Na sequência, verificou-se a normalidade das distribuições utilizando no JASP, o teste de normalidade de Shapiro–Wilk e gráficos de probabilidade normal (Q–Q plots) para as variáveis de interesse e o volume real medido. Considerando o baixo número de dados reais medidos na ETA, ressalta-se que é importante a avaliação conjunta de testes numéricos e inspeção gráfica e teste de hipótese permitindo julgar se os desvios observados podem comprometer a interpretação dos resultados do teste de normalidade (Hair et al., 2009).

Para completar a análise de normalidade foi utilizado o test t para amostra única avaliando o valor de d Cohen, onde d < 020 indica um pequeno desvio do valor de referência para a medida de tendência central da variável, 0,2 < d < 0,5 um desvio médio, 0,5 < d < 0,8 um desvio grande e d > 1,3 um desvio muito grande não confirmando a normalidade dos dados (Jasp, 2023).

Considerando o conjunto de dados com apenas 4 informações, e com o objetivo de avaliar a medida de tendência central do valor de lodo medido e dos valores estimados pelas formulações empíricas, optou-se por utilizar o teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas, sem realização de transformação das variáveis. Foi avaliado o pressuposto de normalidade dos grupos em análise, conforme apresentada por Hair et al. (2009) e por Bussab e Morettin (2010), avaliado a estatística para um nível de significância de 5%, considerando as hipóteses Ho = se a diferença entre as medianas for = 0, e H1 = se a diferença entre as medianas for ± 0. Complementarmente foi avaliado Correlação Biserial ($r_{rβ}$) por postos verificando a força da subestimação ou superestimação dos resultados de cada formulação empírica quando comparado com o valor real medido na ETA para a condição média. Correlação Biserial ($r_{rβ}$) <0,10 efeito trivial, 0,10< $r_{rβ}$<0,30 pequeno efeito, 0,30 < $r_{rβ}$ < 0,50 efeito médio, 0,50 < $r_{r\ β}$ < 0,70 efeito grande e $r_{rβ}$ > 0,70 efeito muito grande (Jasp, 2023).

3.5 Proposta de formulação matemática para quantificação do Volume lodo de ETA

Nesta etapa, foi desenvolvido um modelo de regressão múltipla para quantificação do volume de lodo gerado na ETA, a partir dos parâmetros operacionais selecionados.

Adotou-se a regressão linear como abordagem inicial, por se tratar de um método adequado para descrever e quantificar o efeito médio de variáveis explicativas sobre uma variável resposta contínua (Levine et al, 2008; Bussab, Morettin, 2010; HAIR et al., 2009). A escolha desse modelo foi fundamentada em dois critérios principais:
• Avaliação gráfica: Uso de diagramas de correlação entre o volume de lodo e os parâmetros operacionais, visando verificar a existência de relações aproximadamente lineares;
• Verificação da suposição de normalidade das variáveis: Uso do teste de Shapiro–Wilk e de gráficos de probabilidade normal.

O modelo de regressão pode ser expresso pela equação 1, sendo composto por apenas uma variável no caso da regressão linear simples e por “n” variáveis no caso de regressão linear múltipla (HAIR et al, 2025).

Y = c + b1*x1 + b2*x2 + b3*x3 ……. Bn*xn + ε equação (1)

Onde:
y- representa a estimativa da variável dependente.
c- corresponde ao intercepto do modelo.
b- refere-se ao coeficiente de regressão associado à variável preditora.
x- representa o valor da variável independente.
E = componente de erro aleatório (com base em resíduos).

O número de variáveis para composição do modelo depende do número de dados disponíveis. Como o número de dados é muito pequeno temos um grau de liberdade residual limitado, conforme apresentado na equação 2.

Glresidual = n−p−1 equação (2)

Onde:
n = número de observações da variável dependente
p = número de variáveis independentes

O número de variáveis do modelo de regressão linear múltipla depende do número de dados disponíveis. Por exemplo se você tem apenas 4 dados para formulação de um modelo tem-se na Quadro 3 a situação da formulação desenvolvida.

Quadro 3 – Situação da formulação desenvolvida quando se tem baixo número de dados conhecido

Número de variáveis (p)	GL residual	Situação da formulação
1	2	Possível (frágil)
2	1	Possível (muito frágil)
3	0	Modelo saturado
4	-1	Impossível desenvolver um modelo

Fonte: Jasp (2003).

Em um modelo com 3 variáveis você não tem erro residual, assim o modelo se "encaixa perfeitamente" por obrigação matemática. Segundo Levine et al (2008) e Jasp (2023) para se realizar uma análise de regressão linear é necessário avaliar alguns princípios além da linearidade:
• Independência de erros: requer que os erros sejam independentes entre si;
• Normalidade de erros: requer que os erros sejam normalmente distribuídos para cada valor de X
• Igualdade de variâncias (homoscedasticidade): requer que a variância dos erros seja constante para todos os valores de X.

O modelo deve ser avaliado pela qualidade do seu ajuste a partir das somas dos quadrados dos resíduos (RMSE), sendo que quando menor for esse resultado melhor será a resposta do modelo (Jasp, 2023).

Uma vez atendidas essas premissas de forma satisfatória foram construídas vários modelos com as variáveis operacionais avaliando a correlação entre as variáveis (R), o coeficiente de determinação (R^2) que indica o quanto aquela variável explica o resultado esperado ou o volume de lodo da ETA e o teste Durbin-Watson que verifica as correlações entre os resíduos, devendo estar acima de 1 e abaixo de 3, idealmente, em torno de 2.

Por fim foi utilizada a estatística do teste F (ANOVA de regressão) para avaliar a significância das variáveis para o modelo preditor, para um nível de confiança de 95% (Levine et al, 2008; Jasp, 2023).

4 RESULTADOS

4.1 Tratamento dos dados

Os dados do sistema e da água bruta foram tabulados e organizados em planilhas conforme período de armazenamento de lodo informado na Tabela 1.

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva dos dados considerando o período de 06/2023 a 02/2025. Nesse período o coagulante utilizado na ETA foi o Polifer, com concentração média variando de 32,20 a 33,06% e a densidade média variando de 1,25 a 1,26 g/cm^3. Observa-se que os dados apresentam uma boa consistência sendo realizada medição de vazão e dosagem de coagulante a cada hora e dos parâmetros de qualidade da água bruta a cada duas horas.

Após consolidação dos dados de qualidade da água foram elaboradas as tabelas 3 (1º período), 4 (2º período), 5 (3º período) e 6 (4º período) com o número de dados válidos e análise descritiva dos dados, verificando se tendem uma distribuição normal. Observa-se em todas as tabelas que se tem assimetria e curtose diferentes de zero e nível de significância do teste Shapiro-Wilk para a normalidade dos dados $p < 0,05$, supondo que os dados não seguem uma distribuição normal. O gráfico QQ Plot reforça esta hipótese com desvio nas pontas.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos dados operacionais e de qualidade da água bruta fornecidos pela Concessionária

Período de armazenamento de lodo	Estatística descritiva dos dados	Vazão afluente total (L/s)	Dosagem total do coagulante (mg/L)	Água Bruta		
				Cor (uH)	Turbidez (NTU)	pH
1º período	Número de dados	4.872	4.872	4.872	4.872	4.872
02/06/2023 a	Nº de dados válidos	4.850	4.848	2.419	2.428	2.422
21/12/2023	Mínimo	128,00	7,00	17,40	9,98	5,39
	Máximo	420,00	26,00	205,20	219,00	7,78
	Médio	273,71	14,22	65,37	30,88	6,50
2º período	Número de dados	1.656	1.656	1.656	1.656	1.656
22/12/2023 a	Nº de dados válidos	1.627	1.630	811	812	812
28/02/2024	Mínimo	165,80	12,00	33,50	12,76	5,85
	Máximo	380,00	40,00	546,00	298,66	6,78
	Médio	309,17	18,15	91,48	41,40	6,50
3º período	Número de dados	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577
04/03/3034 a	Nº de dados válidos	3.542	3.537	1.769	1.769	1.769
17/07/2024	Mínimo	102,40	8,00	15,60	9,81	5,77
	Máximo	421,40	32,00	524,00	241,00	6,86
	Médio	296,17	13,72	67,56	26,87	6,46
4º período	Número de dados	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800
09/08/2024 a	Nº de dados válidos	4.472	4.485	2.236	2.234	2.233
24/01/2025	Mínimo	136,00	5,00	1,03	6,09	3,10
	Máximo	454,00	36,00	400,00	208,00	9,42
	Médio	299,52	18,75	93,04	29,89	6,37

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Estatística descritiva dos dados válidos – 1º período

Estatística	Vazão afluente (L/s)	Dosagem coagulante - Polifer (mg/L)	AB Cor (uH)	AB Turbidez (NTU)	AB pH
Nº Dados Válidos	2.414	2.414	2.414	2.414	2.414
Mediana	274,00	14,00	62,30	28,20	6,52
Média	273,59	14,23	65,39	30,72	6,50
Desvio Padrão	37,40	4,33	21,51	13,19	0,21
Coeficiente de variação	0,14	0,30	0,33	0,43	0,03
Assimetria	-0,29	0,90	1,89	3,37	-1,13
Curtose	0,29	1,36	6,28	25,27	3,84
Teste de Shapiro-Wilk	0,99	0,93	0,87	0,77	0,92
P-value	$9{,}776\times10^{-11}$	$7{,}689\times10^{-33}$	$4{,}299\times10^{-41}$	$7{,}714\times10^{-50}$	$7{,}242\times10^{-35}$
Mínimo	134,00	7,00	17,40	9,98	5,39
Máximo	420,00	36,00	205,20	219	7,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos dados válidos – 2º período

Estatística dos dados	Vazão afluente (L/s)	Dosagem coagulante Polifer (mg/L)	AB Cor (uH)	AB Turbidez (NTU)	AB pH
Nº Dados Válidos	811	811	811	811	811
Mediana	315,00	16,00	68,10	26,22	6,54
Média	308,91	18,16	91,48	41,37	6,50
Desvio Padrão	32,37	5,00	60,36	42,23	0,19
Coeficiente de variação	0,11	0,28	0,66	1,02	0,03
Assimetria	-1,17	1,62	3,21	3,42	-1,43
Curtose	1,89	2,59	15,86	13,04	1,70
Teste de Shapiro-Wilk	0,92	0,82	0,68	0,57	0,86
P-value	$5{,}498\times10^{-20}$	$6{,}126\times10^{-29}$	$1{,}599\times10^{-36}$	$9{,}458\times10^{-41}$	$4{,}114\times10^{-26}$
Mínimo	165,80	12,00	33,50	12,76	5,85
Máximo	379,40	40,00	546,00	298,70	6,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Estatística descritiva dos dados válidos – 3º período

Estatística dos dados	Vazão afluente (L/s)	Dosagem coagulante Polifer (mg/L)	AB Cor (uH)	AB Turbidez (NTU)	AB pH
Dados Válidos	1767	1767	1767	1767	1767
Mediana	302,00	12,00	49,86	22,31	6,45
Média	296,36	13,70	67,57	26,87	6,46
Desvio Padrão	34,88	5,23	50,15	18,86	0,15
Coeficiente de variação	0,12	0,38	0,74	0,70	0,02
Assimetria	-0,84	1,55	3,67	5,42	-0,56
Curtose	1,10	1,66	20,11	39,39	0,97
Teste de Shapiro-Wilk	0,96	0,76	0,61	0,50	0,97
P-value do Shapiro-Wilk	$7{,}381\times10^{-22}$	$6{,}308\times10^{-45}$	$1{,}004\times10^{-52}$	$5{,}264\times10^{-57}$	$4{,}115\times10^{-18}$
Mínimo	102,40	8,00	15,60	9,81	5,77
Máximo	421,4	31	524	241	6,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Estatística descritiva dos dados válidos – 4º período

Estatística dos dados	Vazão afluente (L/s)	Dosagem coagulante Polifer (mg/L)	AB Cor (uH)	AB Turbidez (NTU)	AB pH
Dados Válidos	2228	2.228	2.228	2.228	2.228
Mediana	304,00	19,00	81,30	23,44	6,37
Média	299,71	18,75	92,86	29,87	6,37
Desvio Padrão	36,41	6,62	47,12	21,56	0,25
Coeficiente de variação	0,12	0,35	0,51	0,72	0,04
Assimetria	-0,80	0,46	1,63	3,53	-0,54
Curtose	1,01	-0,51	4,14	16,59	24,49
Teste de Shapiro-Wilk	0,96	0,95	0,87	0,63	0,90
P-value do Shapiro-Wilk	$3{,}935\times10^{-24}$	$4{,}993\times10^{-28}$	$5{,}383\times10^{-40}$	$2{,}575\times10^{-56}$	$1{,}730\times10^{-35}$
Mínimo	150,80	5,00	1,03	6,09	3,10
Máximo	400,00	36,00	400,00	208,00	9,42

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Correlação entre variáveis nos períodos analisados com o conjunto de dados consolidados

Período	Correlação entre TU x C	Correlação entre DC x C	Correlação entre DC x TU
1º período - 02/06/2023 a 21/12/2023	0,82	0,51	0,32
2º período - 22/12/2023 a 28/02/2024	0,71	0,75	0,44
3º período - 04/03/2024 a 17/07/2024	0,84	0,84	0,59
4º período - 09/08/2024 a 24/01/2025	0,81	0,73	0,45

DC = dosagem de coagulante; Tu = turbidez; C = cor
Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 7 apresenta a correlação entre 0,71 e 0,84 para os parâmetros turbidez e a cor indicando que existe uma forte relação entre as duas variáveis. Isso se deve principalmente ao fato de que a cor apresentada no banco de dados é a cor aparente. Pode-se observar na análise dos dados que os valores de cor são em média 2,23 a 3,44 vezes superior aos valores de turbidez, indicando a presença expressiva de sólidos dissolvidos na água bruta.

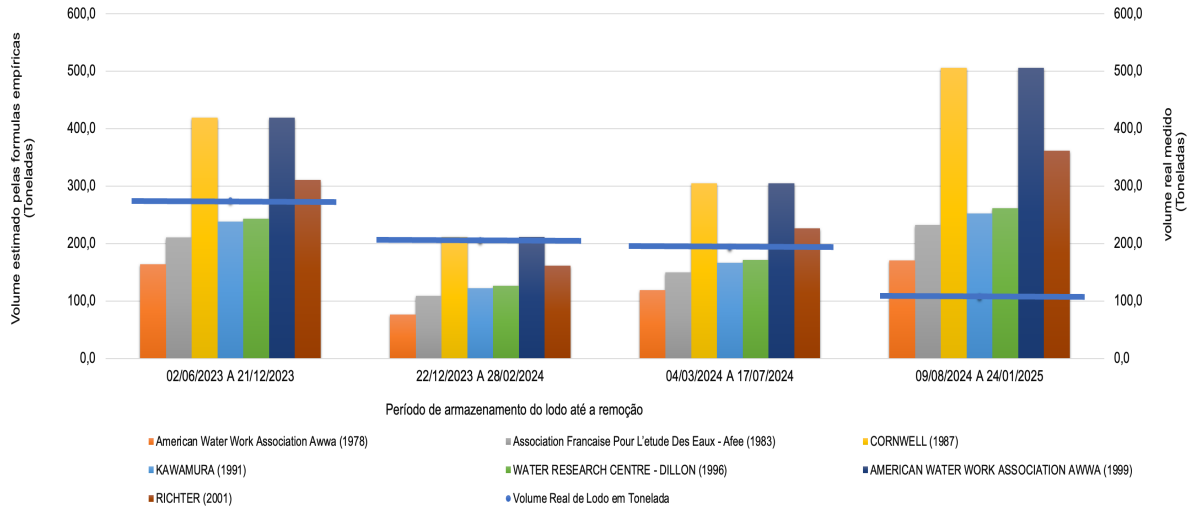
Analisando os valores de correlação entre dosagem de coagulante com a cor e a turbidez observa-se que há uma relação mais forte entre as variáveis dosagem de coagulante e cor, sendo relevante para essa ETA que a cor seja um parâmetro para determinação do volume de lodo gerado. O fato desses dados terem que ser reduzidos a um número de 4 representando os períodos de medição real do lodo produzido, compromete o poder das inferências estatísticas, tornando os resultados menos robustos.

4.2 Determinação do volume de lodo estimado com as formulações empíricas

A Figura 2 apresentam o cenário médio com o volume de lodo calculado com base nas formulações empíricas propostas, de cada período de medição, por se mostrar mais adequada, representando a tendência central do comportamento do sistema e fornecendo uma estimativa mais próxima da condição efetivamente observada no armazenamento do lodo, evitando superestimativas ou subestimativas associadas aos cenários extremos em um sistema.

Como todo o lodo gerado no sistema é direcionado para duas lagoas de sedimentação, ocorre a mistura e a homogeneização das contribuições provenientes das diferentes condições operacionais ao longo do tempo em cada unidade. Dessa forma, os cenários mínimo e máximo representam situações extremas e pontuais de produção de lodo, que não se mantêm isoladas no processo, uma vez que seus efeitos são diluídos quando o material se acumula e se combina no interior das lagoas.

Figura 2 – Representado do volume medido e dos valores médios estimados em cada período.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Comparação e análise estatística dos volumes reais e estimados pelas formulações empíricas

A Tabela 8, gerada a partir das análises realizadas no software JASP, apresenta as estatísticas descritivas do volume real de lodo gerado e das variáveis utilizadas nas formulações empíricas para estimativa do lodo considerando o cenário médio.

Segundo teste Shapiro-Wilk tem-se r ≥ 0,05 sendo aceita a hipótese Ho com indicativo de que os dados seguem uma distribuição normal. Entretanto como o conjunto de dados é muito pequeno o poder estatístico do teste Shapiro–Wilk é baixo podendo-se apenas afirmar que não houve evidência suficiente contra a normalidade dos dados.

Tabela 8 – Estatística descritiva do lodo medidos e variáveis utilizadas para estimativa do lodo nas formulações empíricas

Estatística dos dados	Volume Real de Lodo (T)	Turbidez (NTU)	Cor (uH)	Dosagem de coagulante (mg/L)	Vazão (L/s)
Dados válidos	4	4	4	4	4
Mediana	199,82	30,30	79,53	16,20	298,03
Média	195,80	32,21	79,33	16,21	294,64
Desvio Padrão	68,53	6,33	14,87	2,61	15,00
Coeficiente de variação	0,35	0,20	0,19	0,16	0,05
Assimetria	-0,35	1,58	-0,01	0,01	-1,24
Curtose	1,44	2,91	-5,85	-5,55	2,19
Teste de Shapiro-Wilk	0,97	0,85	0,79	0,83	0,91
P-value do Shapiro-Wilk	0,82	0,23	0,08	0,17	0,50
Mínimo	108,20	26,87	65,39	13,70	273,60
Máximo	275,30	41,37	92,86	18,75	308,90

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados de assimetria variaram de -0,35 a 1,58 (valores > 1 não aceitáveis em distribuição normal) e os de curtose de -5,85 a 2,91 (valores > 2 não aceitáveis em distribuição normal), indicando que os dados não seguem uma distribuição normal. O coeficiente de variação indica uma dispersão baixo (< 0,5).

Com base nas informações acima não tendo evidência suficiente da normalidade dos dados, a comparação entre o volume real e os volumes estimados para o cenário médio com as formulações propostas, foi realizada utilizando o teste não paramétrico, teste Wilcoxon para amostras pareada, considerando o nível de significância de 5%.

4.4 Teste de hipótese comparando volumes estimados e volume real medido

Utilizando o teste T para amostras pareadas com teste não paramétrico de Wilcoxon serão avaliados os valores de tendência central do valor medido e dos valores estimados pelas formulações empíricas considerando as hipóteses Ho = se a diferença entre as medianas é = 0, e H1 = se a diferença entre das medianas é ± 0, conforme apresentado na Tabela 9.

Considerando a estatística do teste Wilcoxon tem-se ($p \geq 0,05$) não há evidência de diferença significativa entre as medianas do valor real medido e dos valores estimados pelas fórmulas empíricas. Considerando o número de dados e que o teste tem um reduzido poder avaliou-se a correlação biserial por postos.

Tabela 9 – Resultados do teste não paramétrico Wilcoxon para amostras pareadas

Volume real e estimados com base nas equações	Teste de normalidade – Shapiro Wilk (p)	Estatística do teste Wilcoxon			
		W	Z	p	Correlação Biserial por postos
AWWA (1978)	0,19	9	1,46	0,25	0,80
AFEE (1983)	0,15	6	0,37	0,88	0,20
CORNWELL (1987)	0,49	0	-1,83	0,13	-1,00
KAWAMURA (1991)	0,18	6	0,37	0,88	0,20
DILLON (1996)	0,18	6	0,37	0,88	0,20
AWWA (1999)	0,48	0	-1,83	0,13	-1,00
RICHTER (2001)	0,24	3	-0,73	0,63	-0,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a correlação biserial por postos, há indicativo de diferença consistente muito forte de subestimação (-) /superestimação (+) pelas fórmulas empíricas com valores de $r_{rb} > 0,70$, para as equações AWWA (1978), CORNWELL (1987), AWWA (1999). Já para a equação de RICHTER (2001) há indicativo de subestimação média ($0,30 < r_{rb} < 0,50$) e para AFEE (1983), KAWAMURA (1991), DILLON (1996), indicativo de superestimação pequena ($0,10 < r_{rb} < 0,30$). Observa-se que a formulações com pequena e média subestimação (-) / superestimação (+), tem a variável cor em sua estrutura.

Assim, se confirma que a escolha da equação empírica influencia significativamente nos volumes estimados, justificando a necessidade de análises complementares como avaliação de erros, correlação e aderência operacional para a seleção da formulação mais representativa para aplicação prática.

4.5 Desenvolvimento da formulação matemática para a ETA

Os gráficos de dispersão entre o volume de lodo e os parâmetros operacionais sugeriram uma relação aproximadamente linear, atendendo a um dos princípios dos modelos de regressão linear, conforme reportado por Bussab; Morettin (2010).

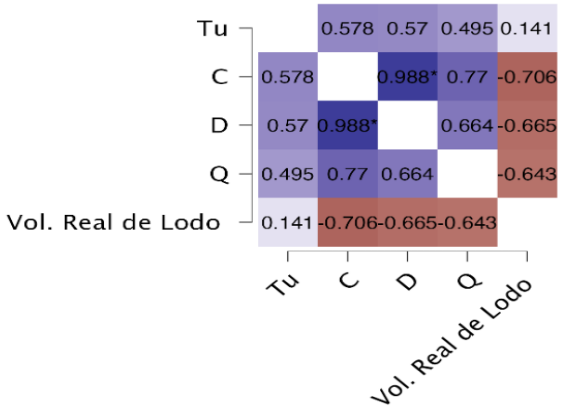
Adicionalmente, o teste de normalidade de Shapiro–Wilk apresentado na Tabela 8 indica ($p \geq 0,05$), mostrando de que os dados seguem uma distribuição normal. Entretanto, segundo Levine et al (2008) esta análise pode estar enviesada devido ao pequeno número de dados, determinando baixo poder do teste.

Segundo equação 2 e considerando o pequeno número de dados medidos de volume de lodo a formulação matemática proposta será possível sendo considerada frágil quando utilizada apenas uma variável, com duas variáveis possível e muito frágil e com 3 variáveis (limite) será um modelo saturado onde se “encaixa perfeitamente” por obrigação matemática.

Assim inicialmente foi avaliado a correlação entre as variáveis utilizando o mapa de calor com o coeficiente de Pearson mesmo considerando o baixo poder dos testes. No cenário médio o mapa de calor (Figura 3) para as

variáveis operacionais evidencia correlações muito forte entre cor (C), dosagem de coagulante (D) chegando a quase uma relação perfeita (r = 099), uma relação forte com a Vazão afluente (Q) com r= 077, e uma correlação moderada com turbidez (Tu) com r = 0,58. Já a turbidez (Tu) se correlaciona moderadamente com as demais variáveis operacionais sendo para cor (r = 058), Dosagem de coagulante (r = 0,57) e vazão afluente (r = 050). Assim observa-se que quando a cor aumenta a dosagem de coagulante aumenta quase que na mesma proporção.

Figura 3 - Mapa de Calor com coeficiente de correlação de Pearson.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao volume real de lodo, observam-se correlações negativas fortes com C (r ≈ –0,71), D (r ≈ –0,67) e Q (r ≈ –0,63), e apenas muito fraca com Tu (r ≈ 0,14). Essa relação negativa ou inversa não corresponde a realidade operacional do sistema, visto que não há aumento do volume de lodo com a redução de cor, dosagem de coagulante e vazão afluente ao sistema. Essa condição pode estar relacionada ao pequeno número de dados e a fragilidade dos testes ou mesmo a presença de outiliers distorcendo os resultados.

4.6 Equações propostas

As equações propostas, utilizando modelo linear de regressão estão apresentadas na Tabela 10. A avaliação dos modelos foi realizada com base no coeficiente de determinação (R^2), teste Durbin-Watson que verifica as correlações entre os resíduos e o teste F (ANOVA de regressão) para avaliar a significância (p < 0,05) das variáveis para o modelo preditor.

Tabela 10 – Equações propostas e análise da sua significância.

Variáveis	Função de Regressão Linear	R^2	D-W	FIV	ANOVA (F)	ANOVA (p)	RMSE (t)
Turbidez x Dosagem x Vazão	VL = 961,63 + 9,35 x TU – 20,94 x D – 2,47 x Q	1,0					
Turbidez x Cor x Dosagem	VL = 246,98 + 8,96 x TU – 12,10 x D + 38,24 x D	1,0					
Turbidez x Cor	VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C	0,95	1,87	1,5	9,65	0,22	26,35
Turbidez x Vazão	VL = 1247,27 + 6,59 x Tu - 4,301x Q	0,69	2,1	1,32	1,13	0,55	65,79
Turbidez x Dosagem	VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96x D	0,84	1,63	1,48	2,67	0,40	47,12
Cor x Vazão	VL = 714,37 - 2,39 x C – 1,12 x Q	0,52	1,22	2,45	0,55	0,70	82,01
Cor x Dosagem	VL = 363,77 – 9,67 x C + 36,98 x D	0,54	1,28	43,11	0,6	0,68	80,13
Dosagem x Vazão	VL = 861,93 - 11,16 x D - 1,65 x Q	0,51	1,21	1,79	0,53	0,70	82,68
Cor	VL = 453,84 -3,25 x C	0,50	1,15	1,00	1,99	0,29	59,56

Fonte: Elaborado pelo autor

O valor de R^2 pode variar de 0 a 1 sendo que $0 < R^2 < 0,3$ indica que o modelo não explica a variável dependente, $0,3 < R^2 < 0,6$ o modelo explica de forma moderada $0,6 < R^2 < 1$ o modelo tem boa explicação sendo valores > 0,8 com muito boa explicação e valores iguais a 1 ajuste perfeito ou saturação do modelo apenas pela matemática em pequenas amostras.

O teste Durbin-Watson varia de 0 a 4 e quando próximo de 2 indica que os resíduos são independentes, sem autocorrelação entre as variáveis, sendo que valores entre 1,5 e 2,5 são aceitáveis, D-W<2 indica uma autocorrelação positiva e DW > 2 uma autocorrelação negativa, D - W = 0 indica forte autocorrelação positiva e D - W = 4 uma forte correlação negativa. A interpretação fica limitada em pequenas amostras.

O índice de tolerância FIV varia de 1 a 10 sendo que 1 < VIF < 6 indica que os resíduos são independentes, 6 < VIF < 12 erro padrão por inflação e VIF > 10 coeficiente instável, valores elevados trazem p-valor alto mesmo com R^2 elevado, coeficientes mudam de sinal, intervalos de confiança muito largos e modelo instável.

A estatística do modelo pelo teste F (ANOVA de regressão) com significância de 5%, indica para p-valor < 0,05 modelo significativo, p-valor > 0,05 modelo não significativo. Se o grau de liberdade residual (GL residual) for muito pequeno a estatística F perde confiabilidade, o p-valor fica instável pelo baixo poder do teste. O ideal é que se tenha um número de dados maior que 15 e um Gl residual >10.

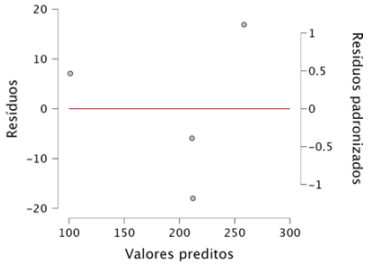
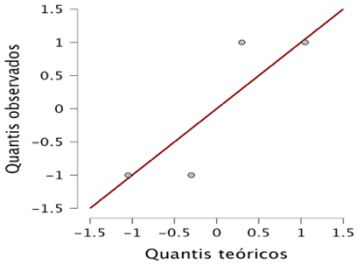
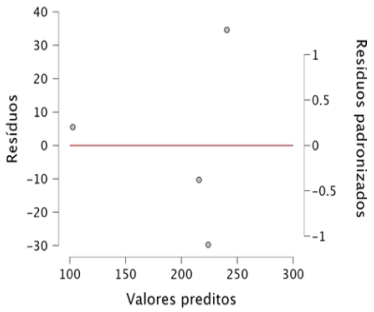
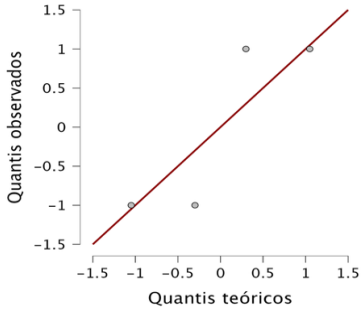
Considerando a limitação do número de observações, as análises de regressão foram estruturadas de forma a respeitar os graus de liberdade do modelo. Inicialmente foram avaliadas regressões lineares múltiplas com até três variáveis independentes, porém essa configuração resultou em modelo saturado, sem erro residual, comprometendo sua validade estatística. Assim, priorizou-se a utilização de modelos com duas variáveis independentes, mantendo ao menos um grau de liberdade residual, além da regressão linear simples utilizando apenas a variável cor aparente (C), em razão da predominância de cor na água bruta. Foram testadas as combinações possíveis entre turbidez (Tu), cor (C), dosagem de coagulante Polifer (D) e vazão média (Q), buscando identificar as variáveis com maior capacidade explicativa do volume de lodo gerado na estação. O valor de RMSE é o erro previsto para o modelo em média sendo expresso em toneladas

Os modelos com 2 variáveis não apresentaram significância estatística, mas atenderam os pressupostos de linearidade das variáveis, independência dos erros pelo teste Durbin Watson e índice de tolerância FIV, mas não atende ao teste de normalidade dos erros pelo teste F (ANOVA de regressão), mesmo apresentando uma igualdade de variância pela análise gráfica dos resíduos. Esta situação também pode ser observada no modelo de regressão linear simples com a Cor que a variável de interesse na ETA. A situação acima exposta apenas se apresentou de forma diferenciada para a formulação entre a Cor e Dosagem de coagulante onde o valor de FIV foi de 43,11, indicando padrão inflado e coeficientes instáveis.

Dentre os modelos propostos os com melhores resultados, mesmo sem significância estatística, foram os modelos com Turbidez e Cor (R^2 = 0,95 e RMSE = 26,35) e com Turbidez e Dosagem de coagulante (R^2 = 0,84 e RMSE = 47,12). A Figura 4 apresenta os resultados gráficos dos resíduos dois modelos.

Na etapa seguinte, os dois modelos de regressão com melhores resultados foram aplicados aos quatro períodos de monitoramento da ETA, utilizando os dados médios, comparados com os volumes reais, por meio do teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas, a fim de verificar a significância dos resultados.

Figura 4 – Gráficos de resíduos para as formulações de turbidez e cor e turbidez e dosagem

Formulação	Resíduos x valores preditos	Normalidade dos resíduos
Turbidez x Cor VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C		
Turbidez x Dosagem de coagulante VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96 x D		

Fonte: Elaborado pelo autor

4.7 Avaliação dos volumes de lodo obtidos pelas formulações propostas

A Tabela 11 apresenta o volume estimado pelas formulações propostas. A Correlação de Pearson entre os valores reais e os valores estimados é de r = 0,98 para a formulação de Turbidez e Cor e de r = 0,92 para a turbidez e dosagem de coagulante, indicando força na relação.

Tabela 11 – Volume do lodo estimado pelas formulações propostas

Período de armazenamento de lodo (valores mínimos)	02/06/2023 A 21/12/2023	22/12/2023 A 28/02/2024	04/03/2024 A 17/07/2024	09/08/2024 A 24/01/2025
Volume Real de Lodo (Toneladas)	275,34	205,43	194,20	108,24
Volume estimado pelas formulações empíricas Turbidez x Cor (Toneladas)				
VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C	258,48	211,42	212,26	101,19
Volume estimado pelas formulações empíricas Turbidez x Dosagem de coagulante (Toneladas)				
VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96x D	240,77	215,59	223,85	102,66

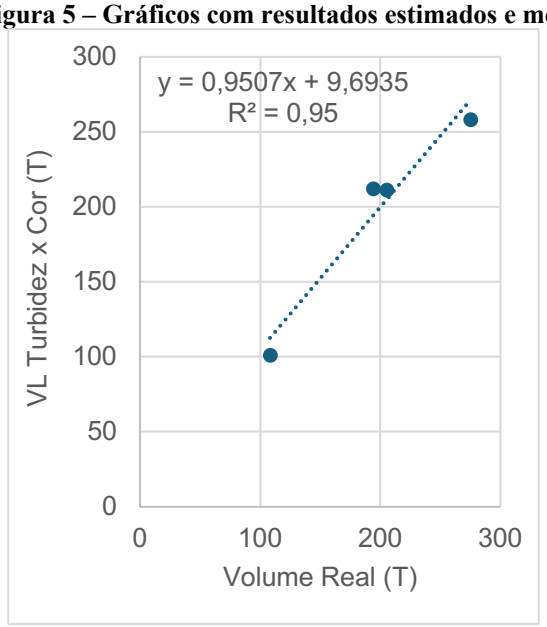
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5 apresenta os resultados estimados e medidos apresentados na Tabela 11 por período com a curva de tendência.

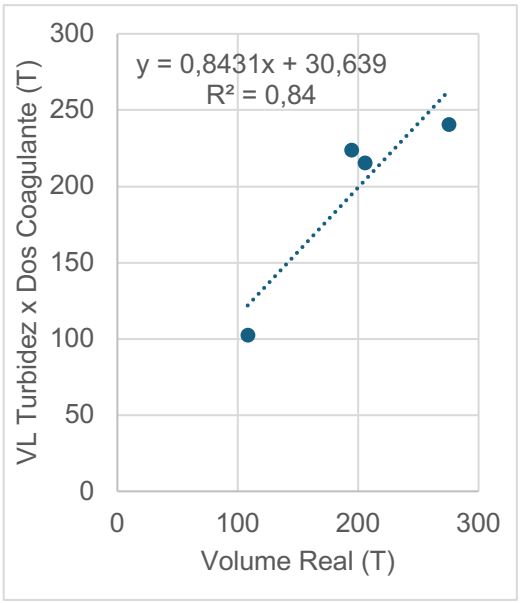
A Tabela 12 apresenta o resultado da estatística descritiva dos dados de volume de lodo real e estimado pelas fórmulas. Observa-se que os dados seguem uma distribuição normal ($r \geq 0,05$), entretanto devido ao baixo número de dados a estatística tem baixo poder. Os dados de assimetria variaram de -0,35 a -1,83 (valores > 1 não aceitáveis em distribuição normal) e os de curtose de 1,44 a 3,49 (valores > 2 não aceitáveis em distribuição normal), indicando que não é possível afirmar que os dados não seguem uma distribuição normal, mas devido ao baixo número de dados recomenda-se uso de testes não paramétricos.

A Tabela 13 apresenta a estatística avaliando os resultados estimados quando comparado com o volume real medido, com nível de significância de 5%, utilizando o teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas.

Figura 5 – Gráficos com resultados estimados e medidos com curva de tendência



Turbidez x Cor
VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C



Turbidez x Dosagem de coagulante
VL = 396,58+8,34 x Tu – 28,96 x D

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Estatística descritiva dos dados reais e estimados pelas formulações

Estatística dos dados	Volume Real de Lodo (T)	Turbidez x Cor (T) VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C	Turbidez x Dos. Coag (T) VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96x D
Válidos	4	4	4
Mediana	199,80	211,80	219,70
Média	195,80	195,80	195,70
Desv. Padrão	68,53	66,82	62,92
Coef. variação	0,35	0,34	0,32
Assimetria	-0,35	-1,33	-1,83
Curtose	1,44	2,52	3,49
Teste de Shapiro-Wilk	0,97	0,88	0,78
P-value	0,82	0,32	0,072
Mínimo	108,2	101,2	102,7
Máximo	275,3	258,5	240,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Resultados do teste não paramétrico Wilcoxon para amostras pareadas obtidas com as novas formulações

Volume real e estimados com base nas equações	Teste de normalidade – Shapiro Wilk (p)	Estatística do teste Wilcoxon			
		W	Z	p	Correlação Biserial por postos
Turbidez x Cor VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C	0,92	5	0	1.00	0,00
Turbidez x Dosagem coagulante VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96x D	0,96	5	0	1,00	0,20

Fonte: Elaborado pelo autor

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk indicou distribuição normal das diferenças ($p = 0,92$). O teste de Wilcoxon pareado não identificou diferença significativa entre os métodos ($W = 5$; $z = 0$; $p = 1,00$), com tamanho de efeito nulo ($r = 0,00$), indicando equivalência prática entre as estimativas.

Dessa forma, entre os modelos avaliados, o que considera as variáveis Turbidez e Cor mostrou-se mais consistente e com melhor ajuste aos volumes reais medidos nos quatro períodos analisados, com menor erro residual, reforçando a relevância da variável cor na previsão do volume de lodo em uma ETA com predominância desse parâmetro.

5 CONCLUSÃO / RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou o desempenho de diferentes formulações empíricas para estimativa da produção de lodo na ETA, considerando a característica específica da água bruta da estação, marcada pela predominância de cor em relação à turbidez.

Os resultados preliminares obtidos com o conjunto de dados disponível indicaram que as equações tradicionalmente apresentadas na literatura não se mostraram plenamente representativas para a realidade operacional da ETA estudada. Observou-se alternância entre subestimação e superestimação dos volumes de lodo do comparados aos valores reais medidos, evidenciando inconsistências na capacidade dessas formulações em reproduzir o comportamento do sistema. Tal resultado pode ser explicado pelo fato de que grande parte dessas equações foi desenvolvida a partir de condições operacionais e características de água distintas daquelas observadas na estação analisada.

Essa limitação também se refletiu nos testes estatísticos aplicados, que não indicaram significância ao comparar os valores estimados com os volumes reais de lodo produzidos. Dessa forma, verifica-se que as equações existentes não apresentam ajuste satisfatório às condições operacionais da ETA. A análise reforça que o uso isolado de formulações empíricas pode não representar adequadamente sistemas com características específicas, especialmente em cenários com predominância de determinados parâmetros de qualidade da água, como a cor.

Entre os cenários analisados, o cenário médio apresentou maior coerência com o comportamento físico do sistema, uma vez que o lodo gerado sob diferentes condições operacionais é direcionado às lagoas de sedimentação, onde ocorre a mistura dos fluxos, reduzindo a representatividade prática dos cenários extremos quando analisados isoladamente.

Os modelos de regressão desenvolvidos apresentaram melhor desempenho quando consideradas as variáveis turbidez e cor. Contudo, a base amostral restrita a quatro períodos válidos comprometeu a robustez estatística das análises, limitando a significância e a validação inferencial dos modelos propostos. Assim, conclui-se que o número de observações disponíveis é insuficiente para consolidar uma formulação matemática representativa e estatisticamente consistente para a ETA em estudo.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se a ampliação do banco de dados para, no mínimo, quinze medições, de modo a aumentar os graus de liberdade e a potência dos testes estatísticos. Sugere-se também a inclusão da umidade como parâmetro de análise, bem como a avaliação de transformações nas variáveis ou a aplicação de métodos alternativos de modelagem que possam proporcionar maior estabilidade e significância estatística aos modelos preditivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 - Resíduos Sólidos.

2. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies.* 5. ed. Nova York: McGrawHill, 1999.

3. ANDREOLI, C. V.; ZARPELON, A.; BERTOLDI, B.; CARNEIRO, C. A Problemática da Geração e Disposição Final de Lodo de ETA. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba : Sanepar, 2013.

4. ASSOCIATION FRANCAISE POUR L'ÉTUDE DES EAUX (AFEE). *Traitement des boues de stations de production d'eau potable*. França: AFEE, 1993.

5. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020: Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 05 dez. 2025.

6. BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A. Estatística básica. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

7. CORNWELL, D. A. *Water treatment residuals engineering. Denver: AWWA Research Foundation and American Water Works Association*, 2006.

8. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di Bernardo; VOLTAN, P. E. N.. Métodos e técnicas de tratamento de água. 3. ed. São Carlos: LDiBe Editora, 2017.

9. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di Bernardo; VOLTAN, P. E. N. Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água. São Carlos: LDiBe, 2012

10. DILLON, G. *Application guide to waterworks sludge treatment and disposal. Blagrove: Water Research* Center, 1996.

11. FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. Tratamento de Água: Concepção, projeto e operação de estações de Tratamento. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.62

12. GIL, A. C. Como classificar as pesquisas. Atlas, v. 4, n. 1, p. 44–45, 2002.

13. HAIR, Joseph F. Jr. et al. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

14. HAIR, Joseph F. Jr.; BLACK, William C.; BABIN, Barry J.; ANDERSON, Rolph E. Análise estatística com o JASP: guia do estudante. Versão 0.14. Tradução brasileira. [S.l.]: JASP Team, 2023. Disponível em: https://jasp-stats.org. Acesso em: 5 dez. 2025.

15. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB). Rio de Janeiro, 2017.

16. JASP TEAM. JASP (Versão 0.18): software estatístico [computador]. Amsterdam: *University of Amsterdam,* 2023. Disponível em: https://jasp-stats.org. Acesso em: 5 dez. 2025.

17. KAWAMURA, S. *Integrated design and operation of water treatment facilities. Nova York:* John Wiley & Sons, 2ª ed. 2000.

18. KATAYAMA, V. T.; MONTES, C. P.; FERRAZ, T. H., MORITA, D. M.. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.20, n.4, p.559-569, 2015 Doi: 10.1590/S1413-41522015020040105046

19. LEVINE, D. M.; STEPHAN, D. F.; KREHBIEL, T. C.; BERENSON, M. L. Estatística: teoria e aplicações Usando Microsoft Excel em português. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

20. ONU – Organização das Nações Unidas. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: água potável e saneamento. As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6. Acesso em: 05 dez. 2025.

21. RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2001