# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO ESCOLA DE QUÍMICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

# AVALIAÇÃO DE LODOS GERADOS NO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação de Mestrado

**LUAN MOREIRA NOVAES** 

Rio de Janeiro 2018

# AVALIAÇÃO DE LODOS GERADOS NO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS

#### **Luan Moreira Novaes**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Orientadores:

Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.

Bianca Ramalho Quintaes, D. Sc.

Rio de Janeiro Junho de 2018 N942a

Novaes, Luan Moreira Avaliação de Lodos Gerados no Tratamento Primário de Lixiviados de Aterros Sanitários / Luan Moreira Novaes. -- Rio de Janeiro, 2018.

128 f.

Orientadora: Juacyara Carbonelli Campos.
Coorientadora: Bianca Ramalho Quintaes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos, 2018.

Tratamento de lixiviado de aterro sanitário.
 Geração de Lodos. 3. Coagulação/Floculação. I.
 Campos, Juacyara Carbonelli, orient. II. Quintaes,
 Bianca Ramalho, coorient. III. Título.

#### Luan Moreira Novaes

# AVALIAÇÃO DE LODOS GERADOS NO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

Orientado <sub>I</sub>	oor:
- Ju	uacyara Carbonelli Campos, D. Sc., EPQB/UFRJ. (Orientadora)
_	Bianca Ramalho Quintaes, D. Sc., COMLURB. (Orientadora)
Aprovado ϵ	em 25 de junho de 2018 por:
Jı	uacyara Carbonelli Campos, D. Sc., EPQB/UFRJ. (Orientadora)
- Ma	ria José de Oliveira Cavalcanti Guimarães, D. Sc., EPQB/UFRJ.
_	Elisabeth Ritter, D. Sc., UERJ.

Rio de Janeiro 2018

Aos meus pais. Pela vida, amor e exemplo.

#### **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sempre.

Aos meus pais, aos quais devo tudo nessa vida.

Aos meus irmãos pelo companheirismo, carinho e amizade.

Às minhas orientadoras Juacyara e Bianca por todo o apoio recebido, pela orientação, pelos ensinamentos, atenção e respeito em todas as etapas deste trabalho. Meu muito obrigado a vocês.

À toda equipe do Laboratório de Tratamento de Águas e Reúso de Efluentes (Labtare) da UFRJ, principalmente ao Leandro e a Júlia por toda a ajuda e atenção.

À Mariana Mattos pelo apoio incondicional nas realizações dos experimentos, por seu profissionalismo, competência e dedicação no trabalho.

À Companhia Municipal de Limpeza Urbana – COMLURB pelo fornecimento das amostras de lixiviado.

Às Indústrias Nucleares do Brasil (INB) pela liberação e apoio para que eu pudesse realizar esse curso.

À toda equipe da GEPIN.N que me acompanhou e sempre me apoiou em todos os momentos difíceis dessa trajetória.

Aos amigos Vitor Lage, Markete, Baraky e Fabiano pelas acolhidas no Rio de Janeiro, sem as quais não seria possível a realização desse curso.

À Fernanda por ser essa companheira incrível, sempre disposta a ajudar. Obrigado pelo amor, carinho e por estar sempre ao meu lado e me apoiando em todos os momentos.

Aos membros da banca, pela atenção e correção deste trabalho.

A todos os professores e funcionários da Escola de Química que de alguma forma contribuíram para essa conquista.

#### **RESUMO**

NOVAES, Luan Moreira. **Avaliação de Lodos Gerados no Tratamento Primário de Lixiviados de Aterros Sanitários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a geração de lodo em tratamentos de lixiviado de aterro sanitário. Foram realizados coagulação/floculação utilizando os coagulantes óxido de cálcio (cal), cloreto férrico e sulfato de alumínio nos lixiviados dos aterros sanitários de Seropédica e de Gericinó, ambos localizados no estado do Rio de Janeiro. Os testes com cloreto férrico e sulfato de alumínio foram desenvolvidos em duas etapas. Na primeira etapa, os testes foram realizados com uma concentração de 4000 mg coagulante/L, variando-se apenas o pH do meio. Após a determinação do pH ótimo, foram feitos novos ensaios, variando a concentração do coagulante. Os testes com cal foram realizados variando somente a concentração do coagulante. Para se avaliar a eficiência dos tratamentos, foram monitorados os parâmetros DQO, COT, cor verdadeira, absorbância em 254nm (ABS) e condutividade nos lixiviados dos aterros. Para análise inicial do lodo, foram avaliados o volume gerado e o teor de umidade e de material volátil, após cada tratamento. Uma vez determinadas as condições ideais de tratamento, o lodo gerado foi analisado e classificado de acordo com os critérios estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Norma Brasileira - NBR 10.004, de 2004. No lixiviado de Gericinó, para as condições ideais estabelecidas, o cloreto férrico apresentou remoção de DQO de 49% e geração de 360 mL de lodo/L de lixiviado; o sulfato de alumínio removeu 44% da DQO e gerou 300 mL de lodo/L de lixiviado e a cal removeu 53,1% da DQO com geração de 105 mL de lodo/L de lixiviado. No lixiviado de Seropédica, para as condições ideais, o cloreto férrico removeu 64,4% de DQO e gerou 502 mL de lodo/L de lixiviado; o sulfato de alumínio apresentou remoção de 45,7% de DQO com geração de 382 mL de lodo/L de lixiviado, enquanto a cal removeu 40,5% da DQO para 163 mL de logo gerado/L de lixiviado. O lodo resultante foi classificado como resíduo não perigoso (Classe II). Todos os coagulantes avaliados apresentaram vantagens e desvantagens no tratamento dos lixiviados dos aterros estudados. No entanto, a utilização da cal apresentou a melhor relação remoção do poluente/volume de lodo gerado, pois foi o coagulante que gerou o menor volume de lodo para as mesmas faixas de remoção observadas.

Palavras chave: Coagulação, Floculação, Lixiviado, Lodo.

#### **ABSTRACT**

NOVAES, Luan Moreira. **Evaluation of Sludge Produced in the Primary Treatment of Landfill Leachate.** Monograph (Chemical and Biochemical Process Engineering) – School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

This work aimed to evaluate the production of sludge in primary treatments of landfill leachate. Coagulation/flocculation assays were performed using the coagulants calcium oxide (lime), ferric chloride and aluminum sulphate in sanitary landfills leachates from Seropédica and Gericinó, both located in the state of Rio de Janeiro. Ferric chloride and aluminum sulfate tests were conducted in two steps. The first stage was performed with a concentration of 4000 mg coagulant/L, varying only the pH. After the determination of the optimum pH, new tests were done, varying the coagulant concentration. The lime tests were performed by varying only the concentration of the coagulant. To evaluate the treatments efficiency, COD, TOC, true color, absorbance at 254nm (ABS) and conductivity were monitored in leachates. For the initial sludge analysis, the volume generated, the moisture content and volatile material present were measured after each treatment. Once the ideal treatment conditions were determined, the sludge produced under these conditions was analyzed in order to be classified in accordance to ABNT NBR 10004/2004 criteria. In Gericinó landfill leachate, for the ideal conditions established, ferric chloride removed 49% of the COD and produced 360 mL of sludge/L of leachate; the aluminum sulfate removed 44% of the COD and generated 300 mL of sludge/L leachate and the lime removed 53.1% of the COD with generation of 105 mL of sludge/L of leachate. In Seropédica landfill leachate the ferric chloride removed 64.4% of COD and produced 502 mL of sludge/L of leachate; the aluminum sulfate presented 45.7% removal of COD with the generation of 382 mL of sludge/L of leachate, while lime removed 40.5% of the COD and generated 163 mL of sludge/L of leachate. The resulting sludge was classified as non-hazardous waste (Class II). All the evaluated coagulants presented advantages and disadvantages in the leachate treatment of the landfills studied. However, the use of lime presented the best removal of the pollutant / volume of sludge produced ratio, since it was the coagulant that generated the lowest volume of sludge for the same range of removal observed.

Keywords: Coagulation, Flocculation, Leachate, Sludge.

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil	24
Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil	24
Figura 3 - Disposição final de RSU no Brasil	25
Figura 4 - Porcentagem de coleta de resíduos por região	27
Figura 5 - Porcentagem de coleta de resíduos por nível econômico	27
Figura 6 - Composição dos resíduos em função do nível econômico da região	28
Figura 7 - Destinação Final dos RSU Coletados no Brasil em 2011 e 2012	30
Figura 8 - Situação da disposição final dos RSU no Brasil, de 1991 a 2011	30
Figura 9 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos	33
Figura 10 -Esquema de um Aterro Sanitário	34
Figura 11 - Disposição Final do RSU Coletados no Brasil em 2016	36
Figura 12 - Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos	36
Figura 13 - Camadas de Proteção do Solo no CTR Rio	40
Figura 14 - Foto aérea do CTR Rio (Setembro/2017)	41
Figura 15 - Estação de Tratamento de Chorume da CTR Rio (Setembro/2017)	41
Figura 16 - Fluxo de Resíduos no município do Rio de Janeiro	42
Figura 17 - Vista aérea do Aterro de Gericinó	43
Figura 18 - Aterro de Gericinó	43
Figura 19 - Parâmetros de decisão para seleção do tipo de tratamento de lixiviado	53
Figura 20 - Diagrama de Equilíbrio Heterogêneo do Al(OH) <sub>3</sub> .	58
Figura 21 - Diagrama de solubilidade do ferro em um sistema aquoso, representando os mecanismos de coagulação/floculação	59
Figura 22 - Aparelho de "Jar-Test" utilizado nos experimentos.	64
Figura 23 - Resultados de DQO em função da concentração de CaO. Condições de ensa Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.	
Figura 24 - Resultados de COT em função da concentração de CaO. Condições de ensai Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min	
Figura 25 - Resultados de cor verdadeira em função da concentração de CaO. Condições ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.	
Figura 26 – Resultados de ABS em função da concentração de CaO. Condições de ensaí Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.	

Figura 27 – Resultados de condutividade em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min
Figura 28 – Resultados de pH em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min72
Figura 29 - Resultados do volume de lodo gerado por volume de lixiviado em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min
Figura 30 - Resultados do teor de umidade do lodo em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min
Figura 31 - Resultados do teor de voláteis no lodo em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min
Figura 32 - Volume de lodo seco gerado por volume de lixiviado tratado. Valores obtidos através dos dados de volume de lodo gerado e umidade do lodo
Figura 33 - Massa de lodo seco gerado por volume de lixiviado tratado. Valores obtidos através dos dados de volume de lodo seco gerado e densidade do lodo
Figura 34 - Linearização da Relação Massa de lodo seco/Volume de lixiviado tratado em função da concentração de CaO
Figura 35- Resultados de DQO em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 36 - Resultados de COT em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 37 - Resultados de cor verdadeira em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,080
Figura 38 - Resultados de ABS em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,080
Figura 39 - Resultados do volume de lodo gerado por volume de lixiviado em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 40 - Resultados do teor de umidade do lodo em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,081
Figura 41 - Resultados do teor de voláteis no lodo em função da concentração de FeCl <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 RPM; Mistura lenta: 20 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0

Figura 42 - Resultados de DQO em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 43 - Resultados de COT em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 44 - Resultados de cor verdadeira em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 45 - Resultados de ABS em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 46 - Resultados do volume de lodo gerado por volume de lixiviado em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 47 - Resultados do teor de umidade do lodo em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 48 - Resultados do teor de voláteis no lodo em função da concentração de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 RPM; Mistura lenta: 20 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0
Figura 49 – Remoção de DQO em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> e FeCl <sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó (b) Seropédica 90
Figura 50 - Remoção de COT em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> e FeCl <sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica 91
Figura 51 - Remoção de cor em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> e FeCl <sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica 92
Figura 52 - Remoção de ABS em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> e FeCl <sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica 93
Figura 53 - Relação entre volume de lodo gerado e remoção do poluente, para concentrações crescentes de cal, no lixiviado de Gericinó. (a) DQO; (b) COT; (c) cor verdadeira; (d) ABS
Figura 54 - Relação entre volume de lodo gerado e remoção do poluente, para concentrações crescentes de cal, no lixiviado de Seropédica. (a) DQO; (b) COT; (c) cor verdadeira; (d) ABS
Figura 55 - Relação entre volume de lodo gerado e concentração de cal utilizada, nos lixiviados de Gericinó e Seropédica
Figura 56 - Teor de umidade no lodo gerado para os diferentes coagulantes, em ordem crescente das concentrações utilizadas (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> e FeCl <sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica

Figura 57 - Teor de sólidos voláteis do lodo gerado para os diferentes coagulantes, em ordem crescente das concentrações utilizadas (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> e FeCl <sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b)	
Seropédica	.97
Figura 58 – Resultados obtidos nas condições operacionais escolhidas, no lixiviado de Gericinó. Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L; FeCl <sub>3</sub> pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L	-
CaO 12 g coagulante/L	100
Figura 59 - Resultados obtidos nas condições operacionais escolhidas, no lixiviado de Seropédica. Al₂(SO₄)₃ pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L; FeCl₃ pH 6,0 e 3000 mg	
coagulante/L; CaO 16 g coagulante/L	100

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos
Tabela 2 - Geração de Resíduos por habitante por região
Tabela 3 - Geração de Resíduos por habitante por nível econômico
Tabela 4 - Distribuição da disposição dos resíduos (em termos gravimétricos) em função do nível econômico da região
Tabela 5 - Vantagens e Desvantagens do aterro sanitário
Tabela 6 - Composição de Lixiviados de Aterros (Valores em mg/L, exceto pH, condutividade e DBO/DQO)45
Tabela 7 - Composição de Lixiviados em Função da Fase de Degradação do Resíduo. (Valores em mg/L, exceto pH e DBO/DQO)
Tabela 8 - Características dos lixiviados brasileiros nas fases ácida e metanogênica. (Valores em mg/L, exceto pH e condutividade)
Tabela 9 - Classificação de Lixiviados em Função da Idade do Aterro49
Tabela 10 - Eficiências de Tratamentos para a Remoção de Poluentes52
Tabela 11 - Eficiência do Tratamento em Função da Idade do Aterro54
Tabela 12 - Principais Coagulantes e Suas Aplicações
Tabela 13 - Principais Coagulantes Utilizados
Tabela 14 - Resumo de estudos de coagulação/floculação em lixiviados utilizando CaO, FeCl <sub>3</sub> e Al <sub>2</sub> (SO4) <sub>3</sub>
Tabela 15 - Metodologia de análise dos parâmetros físico-químicos
Tabela 16 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado do aterro de Seropédica67
Tabela 17 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado do aterro de Gericinó. 68
Tabela 18 - Resultados da etapa de otimização do pH com FeCl₃, a concentração constante, no lixiviado do aterro de Gericinó77
Tabela 19 - Resultados da etapa de otimização do pH com FeCl <sub>3</sub> , a concentração constante, no lixiviado do aterro de Seropédica
Tabela 20 - Resultados da etapa de otimização do pH com Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , a concentração constante, no lixiviado do aterro de Gericinó
Tabela 21 - Resultados da etapa de otimização do pH com Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , a concentração constante, no lixiviado do aterro de Seropédica
Tabela 22 – Características de lodos gerados em tratamentos de efluentes diversos

Tabela 23 – Resultado obtidos nas condições operacionais escolhidas para os ensaios	de
classificação do lodo	99
Tabela 24 - Resultado da caracterização dos extratos lixiviados dos lodos gerados	. 101

#### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABS - Absorbância em 254 nm

APHA - American Public Health Association

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana

COT - Carbono Orgânico Total

CTR - Central de Tratamento de Resíduo

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

DBO/DQO - Razão de biodegradabilidade

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

ETR - Estação de Transferência

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LabTare - Laboratório de Tratamento de Águas e Reúso de Efluentes

NTK - Nitrogênio Total de Kjeldahl

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

pH - Potencial Hidrogeniônico

PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos

POA - Processos Oxidativos Avançados

PSM - Processos de Separação por Membranas

RCC – Resíduos de Construção Civil

RPM - Rotações por Minuto

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

Sisnama - Sistema Nacional do Meio Ambiente

SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SS - Sólidos Suspensos

SST - Sólidos Suspensos Totais

SSV - Sólidos Suspensos Voláteis

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	21
3.1.1 Política Nacional dos Resíduos Sólidos	22
3.1.2 Geração, Coleta, Composição e Disposição de Resíduos Sólidos Urbano Brasil e no Mundo	
3.1.3 Classificação dos Resíduos Sólidos	
3.2 ATERRO SANITÁRIO	
3.2.1 Fases de Degradação dos Resíduos em um Aterro Sanitário	37
3.2.2 Aterro Sanitário de Seropédica	39
3.2.3 Aterro Controlado de Gericinó	42
3.3 LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO	44
3.3.1 Composição dos Lixiviados	44
3.4 TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO	50
3.4.1 Coagulação/Floculação	55
3.4.2 Coagulantes Utilizados	57
4 MATERIAIS E MÉTODOS	63
4.1 COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS	63
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO	63
4.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO	63
4.3.1 Coagulação/Floculação com Óxido de Cálcio	64
4.3.2 Coagulação/Floculação com Cloreto Férrico	65
4.3.3 Coagulação/Floculação com Sulfato de Alumínio	65
4.4 CLASSIFICAÇÃO DO LODO QUANTO À SUA PERICULOSIDADE	65
4.5 METODOLOGIAS ANALÍTICAS	66
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LIXIVIADOS BRUTOS	67

5.2 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COM ÓXIDO DE CÁLCIO	69
5.3 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COM CLORETO FÉRRICO	77
5.3.1 Otimização do pH	77
5.3.2 Ensaios com o pH ótimo	78
5.4 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COM SULFATO DE ALUMÍNIO	84
5.4.1 Otimização do pH	84
5.4.2 Ensaios com o pH ótimo	85
5.5 RESUMO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	89
5.6 ESCOLHA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO DO LODO	98
5.7 CLASSIFICAÇÃO DOS SÓLIDOS	101
6 CONCLUSÕES	103
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXO I	111

### 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas enfrentados pela sociedade moderna é o gerenciamento e destinação dos resíduos gerados pela população, principalmente nos grandes centros urbanos. O aumento da industrialização, da urbanização e dos padrões de consumo, aliados ao crescimento populacional vem aumentando a geração de resíduos, e consequentemente, a pressão pela disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos e o tratamento dos passivos ambientais decorrentes disto.

À medida que o mundo avança em direção ao seu futuro cada vez mais urbanizado, a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU), considerados subprodutos resultantes do estilo de vida urbano, está crescendo ainda mais rápido do que a taxa de urbanização. Há quinze anos, havia 2,9 bilhões de residentes urbanos que geraram cerca de 0,64 kg de RSU por pessoa por dia (0,68 bilhões de toneladas por ano) (THE WORLD BANK, 2012). Em 2012, esses montantes estavam em cerca de 3 bilhões de habitantes gerando 1,2 kg por pessoa por dia (1,3 bilhão de toneladas por ano). Até 2025, isso provavelmente aumentará para 4,3 bilhões de residentes urbanos gerando cerca de 1,42 kg / pessoa / dia de resíduos sólidos urbanos (2,2 bilhões de toneladas por ano) (THE WORLD BANK, 2012). No Brasil, são gerados em média 1,04 kg RSU / habitante / dia, o que totaliza mais de 200 mil toneladas de resíduos por dia no país, ou ainda, mais de 78 milhões de toneladas ao ano (ABRELPE, 2016).

Uma das formas mais utilizadas para a destinação de resíduos sólidos é o aterro sanitário, definido como sistema que emprega métodos de engenharia para a disposição de resíduos sólidos no solo, de maneira que minimize os impactos ao meio ambiente, reduzindo os resíduos ao menor volume possível e compactando o material de cobertura no final de cada dia (ABNT, 1992). No Brasil, em 2016, cerca de 41 milhões de toneladas de RSU foram enviadas para aterros sanitários, ou 58,4% do total coletado (ABRELPE, 2016).

Essa forma de disposição, apesar de segura e ambientalmente correta, possui como principal desvantagem a geração de um lixiviado altamente poluidor. O lixiviado é o efluente aquoso gerado pela percolação da água da chuva através das células do aterro, combinada com os processos bioquímicos que ocorrem nos rejeitos nele depositados e o próprio conteúdo inerente de água dos rejeitos. É um líquido

altamente poluente e seu tratamento tem sido um desafio em todo o mundo. Os lixiviados apresentam uma composição química variável: substâncias orgânicas e inorgânicas, produtos da biodegradação aeróbica e anaeróbica, além de compostos químicos lixiviados dos resíduos sólidos que podem estar presentes nessa matriz (KJELDSEN et al., 2002).

A composição e a concentração de substâncias poluidoras presentes no lixiviado é complexa e variável, pois além de depender das características dos rejeitos depositados, é influenciada pela idade do aterro, pelas condições ambientais, pela forma operacional do aterro e pela dinâmica do processo de decomposição que ocorre no interior das células (YAO, 2013).

O aumento do rigor dos órgãos ambientais em relação ao controle, monitoramento e disposição de diversos tipos de efluentes tem alertado cada vez mais as autoridades competentes em relação aos tratamentos de lixiviados de aterros sanitários. Se não forem devidamente coletados e tratados, esse efluentes podem causar severos danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Dentre os diversos tipos de tratamento existentes, podem-se citar: tratamentos biológicos, físico-químicos, processos de separação por membranas e tratamento em conjunto com esgoto sanitário. Devido à complexidade e variabilidade desse tipo de efluente, não há um método único, universal e eficaz capaz de remover todas as substâncias poluentes presentes no lixiviado.

Em geral, os processos físico-químicos envolvem a redução de sólidos em suspensão, partículas coloidais, cor e compostos tóxicos, e podem ser utilizados como um pré-tratamento ou como uma purificação final. Dentre esses processos destacamse a coagulação/floculação, a precipitação química, os processos oxidativos avançados e a adsorção por carvão ativado (AMORIM; LEÃO; MOREIRA, 2009). Embora sejam métodos bastante consolidados e difundidos, grande parte dos tratamentos físico-químicos apresenta como principal desvantagem, a formação de lodos.

Neste trabalho, foram investigados os processos de coagulação/floculação, com ênfase na formação do lodo, utilizando diferentes coagulantes (óxido de cálcio, cloreto férrico e sulfato de alumínio) nos lixiviados dos aterros sanitários de Seropédica e Gericinó (RJ).

#### **2 OBJETIVOS**

#### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a geração de lodo em tratamentos primários de lixiviado de aterro sanitário.

#### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Avaliar a remoção de matéria orgânica no processo de coagulação/floculação, utilizando como coagulantes: óxido de cálcio, sulfato de alumínio e cloreto férrico, no tratamento primário de diferentes lixiviados;
- Avaliar quantitativamente o lodo gerado durante o processo de coagulação/floculação;
- Avaliar as características físico-químicas do lodo gerado;
- Comparar o lodo gerado durante coagulação/floculação de lixiviados oriundos de diferentes aterros;
- Determinar uma relação entre diferentes condições de tratamento e o lodo gerado (quantidade e qualidade);
- Classificar o lodo gerado, nas melhores condições de tratamento, de acordo com a norma ABNT NBR 10004/2004.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentado uma revisão da literatura sobre os principais temas abordados no trabalho. Foi realizada uma abordagem sobre resíduos sólidos, definições, classificações e legislações relacionadas, assim como, uma revisão sobre os aterros sanitários e a geração, características e tratamentos dos lixiviados.

#### 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a Lei 12.305 de 5 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu Artigo 3º, inciso XVI, resíduos sólidos são o material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Já a norma ABNT NBR 10.004/2004, define os resíduos sólidos como:

"Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível".

A PNRS introduziu a diferenciação entre resíduos e rejeitos, reconhecendo o resíduo sólido como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania e define como rejeitos os "resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e tecnicamente viáveis não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada" (BRASIL, 2010).

Em relação à origem dos resíduos sólidos, a PNRS classifica como resíduos sólidos urbanos (RSU) os resíduos domiciliares, aqueles originários de atividades

domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana, aqueles originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

#### 3.1.1 Política Nacional dos Resíduos Sólidos

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituída em 2010, foi criada com o objetivo de se enfrentar os principais problemas decorrentes do manejo e disposição inadequada dos resíduos sólidos no Brasil.

A lei busca organizar e regular a forma com que o país lida com esses resíduos e tem como focos principais a redução da geração, a correta destinação e a responsabilidade compartilhada de setores públicos e privados.

A redução da geração de resíduos é alcançada através de práticas como reciclagem e reaproveitamento. O Artigo 9º da Lei cita que deve ser observada a seguinte ordem de prioridade em relação ao gerenciamento de resíduos sólidos: "não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos" (BRASIL, 2010).

A correta destinação dos rejeitos deve observar a minimização de danos ambientais e à saúde humana. Isso inclui metas para eliminação e recuperação de lixões e determina como disposição final ambientalmente adequada de rejeitos os aterros sanitários.

Os principais objetivos da PNRS são destacados em seu Artigo 7º:

- I proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- IV adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
  - V redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- VI incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
  - VII gestão integrada de resíduos sólidos;

VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;

- IX capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
- X regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira:
  - XI prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
  - a) produtos reciclados e recicláveis;
- b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
- XII integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
  - XIII estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
- XIV incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
  - XV estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

# 3.1.2 Geração, Coleta, Composição e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil e no Mundo

No Brasil, segundo informações da ABRELPE (2016), foram gerados quase 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2016. Desse total, ainda de acordo com dados da associação, 71,3 milhões de toneladas foram coletados, o que significa que 7 milhões de toneladas de resíduos não foram coletados e, consequentemente, tiveram destino impróprio. Do total coletado, 58,4% foram destinados a aterros sanitários (destino ambientalmente adequado) e 41,6% para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2016).

Apesar do aumento populacional ocorrido no Brasil entre os anos de 2015 e 2016, observou-se uma redução da geração de RSU no mesmo período, conforme mostrado na Figura 1 (ABRELPE, 2016).



Figura 1 - Geração de RSU no Brasil. Fonte: (ABRELPE, 2016).

Observou-se também uma redução do total de RSU coletados, em termos absolutos, no mesmo período, conforme Figura 2. O porcentual coletado manteve-se estável, na faixa de 91%.



Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil. Fonte: (ABRELPE, 2016).

Em relação ao destino do RSU coletado, observa-se um dado negativo: entre 2015 e 2016, houve uma leve queda na porcentagem de resíduos destinados a aterros sanitários e um aumento do porcentual destinado a aterros controlados e lixões, conforme está mostrado na Figura 3.



Figura 3 - Disposição final de RSU no Brasil. Fonte: (ABRELPE, 2016).

A estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil é mostrada na Tabela 1, de acordo com um estudo realizado em 2008 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em parceria com o Ministério das Cidades.

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil. Fonte: (IBGE, 2008).

Material	Participação (%)
Material reciclável	31,9
Metais	2,9
Aço	2,3
Alumínio	0,6
Papel, papelão e tetrapak	13,1
Plástico total	13,5
Plástico filme	8,9
Plástico rígido	4,6
Vidro	2,4
Matéria orgânica	51,4
Outros	16,7

O relatório What a Waste - A Global Review of Solid Waste Management, publicado em 2012 pelo The World Bank, apresenta dados relacionados à geração, coleta, composição e o tipo de destinação dos RSU em diferentes regiões do planeta e aborda as diferenças existentes desses valores em função do nível econômico de

cada região. Esses dados serão apresentados, e brevemente discutidos nos tópicos subsequentes.

#### Geração

A Tabela 2 mostra a média de geração de resíduos da população de diferentes regiões e a Tabela 3 mostra a média de geração de resíduos da população em função do nível econômico da região.

Tabela 2 - Geração de Resíduos por habitante por região. Fonte: (Adaptado de THE WORLD BANK, 2012).

Região	Média de Resíduo Gerado per capita (kg/hab/dia)
África sub-sahariana	0,65
Leste Asiático	0,95
Europa e Ásia Central	1,1
América Latina e Caribe	1,1
Oriente Médio e Norte da África	1,1
Países da OCDE <sup>1</sup>	2,2
Sul Asiático	0,45

Tabela 3 - Geração de Resíduos por habitante por nível econômico.

Fonte: (Adaptado de THE WORLD BANK, 2012).

Nível Econômico	Média de Resíduo Gerado per capita (kg/hab/dia)
Renda Alta	2,1
Renda Média-Alta	1,2
Renda Média-Baixa	0,79
Renda Baixa	0,6

A quantidade de resíduos gerados por determinada população está diretamente relacionada ao nível de urbanização e ao poder de compra dos habitantes. Por outro lado, é justamente nos países de maior nível econômico que existem as melhores práticas e políticas de incentivo à redução ou reaproveitamento dos resíduos.

.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Organização internacional formada por 35 países com objetivo de promover políticas que melhorem o bem-estar econômico e social das pessoas em todo o mundo. Dos países-membros, 27 são europeus, além de Austrália, Canadá, Chile, Coréia do Sul, Estados Unidos, Japão, México e Nova Zelândia. Fonte: (OECD, 2017).

#### Coleta

As Figuras 4 e 5 mostram dados referentes à coleta de resíduos por região e por nível econômico.

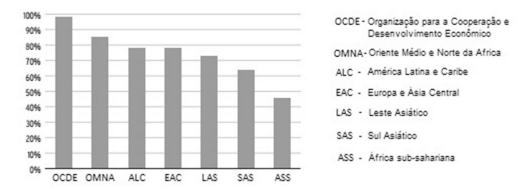


Figura 4 - Porcentagem de coleta de resíduos por região. Fonte: (Adaptado de THE WORLD BANK, 2012).

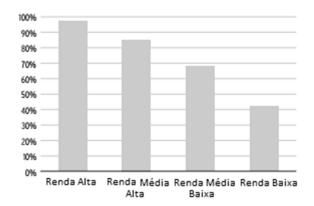


Figura 5 - Porcentagem de coleta de resíduos por nível econômico.

Fonte: (Traduzido de THE WORLD BANK, 2012).

Percebe-se claramente a variação do porcentual coletado em função do nível econômico de cada região, indo de 41% nos países de baixa renda para 98% nos países mais ricos. O correto recolhimento e disposição dos resíduos é de fundamental importância, uma vez que se não tratados adequadamente podem representar uma grave ameaça à saúde pública e ao meio ambiente.

#### Composição

A Figura 6 mostra a composição média dos resíduos sólidos gerados em função da renda de cada região.

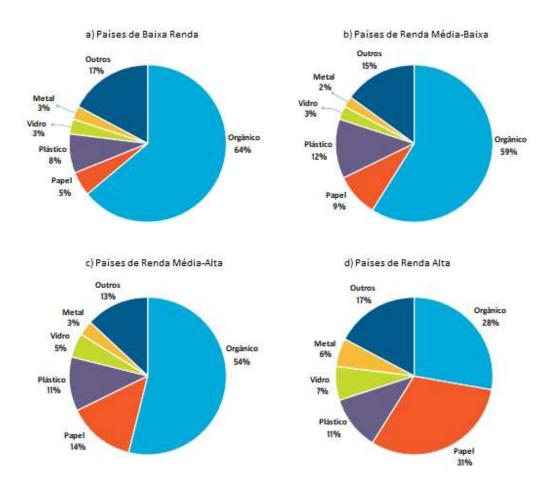


Figura 6 - Composição dos resíduos em função do nível econômico da região.

Fonte: (Traduzido de THE WORLD BANK, 2012).

A composição dos resíduos, assim como a geração e o nível de coleta, é fortemente influenciada pelo nível econômico da região. Além disso, também influi na composição fatores como cultura, clima e nível de industrialização (THE WORLD BANK, 2012). Percebe-se que os países de baixa renda possuem a maior proporção de resíduos orgânicos. Nos países de maior renda aumenta a proporção dos recicláveis (papéis, plásticos, vidros e metais). A composição dos resíduos é um parâmetro bastante importante para tomada de decisões no âmbito de políticas públicas e gerenciamento do RSU pelos municípios.

#### Destinação

A Tabela 4 mostra um contraste de como o tipo de destinação dos resíduos varia em função do nível econômico de cada região.

Tabela 4 - Distribuição da disposição dos resíduos (em termos gravimétricos) em função do nível econômico da região. Fonte: (Adaptado de THE WORLD BANK, 2012).

Destino	Renda Baixa	Renda Alta
Lixões	12,50%	0,01%
Aterros Sanitários	58,51%	42,51%
Compostagem	1,33%	11,22%
Reciclagem	0,53%	21,94%
Incineração	1,33%	20,75%
Outros	25,80%	3,57%

De acordo com o *The World Bank*, muito dos dados dos países mais pobres estavam incompletos ou indisponíveis, o que levou ao alto valor de "outros destinos", mas que provavelmente deveriam ser classificados como lixões ou aterros controlados.

Analisando os dados do Brasil apresentados nessa seção em relação ao restante do mundo, percebe-se que nos quesitos coleta e composição, nosso país encontra-se em uma posição intermediária entre países de renda média alta e renda alta. No quesito geração, situa-se entre os países de renda média baixa e média alta (1,04 kg/hab/dia no Brasil contra 1,2 nos países de renda média alta e 0,79 nos países de renda média baixa). Porém, o dado mais preocupante é em relação ao quesito destinação. Conforme observa-se na Figura 3, no Brasil, do total de RSU coletado, cerca de 58% foram destinados a aterros sanitários, enquanto cerca de 42% tiveram como destino lixões e aterros controlados. Esses números colocam o Brasil em posição muito semelhante aos dos países classificados como de baixa renda, conforme observa-se na Tabela 4, mostrando que ainda há muito a se fazer nesse aspecto em nosso país.

Apesar da PNRS estar em vigor há mais de sete anos, vê-se que ainda carece de fiscalização e aplicação prática na maioria de seus itens. Conforme discutido anteriormente, no Brasil a geração de resíduos se mantém em patamares elevados, a coleta de resíduos não abrange toda a população e mais de 40% dos RSU coletados não tem a destinação ambientalmente adequada, prevista na Lei. Este último dado torna-se ainda mais alarmante se observados os números dos anos anteriores. A

Figura 7, mostra a relação da destinação dos RSU coletados no Brasil em 2011 e 2012 (ABRELPE, 2012).

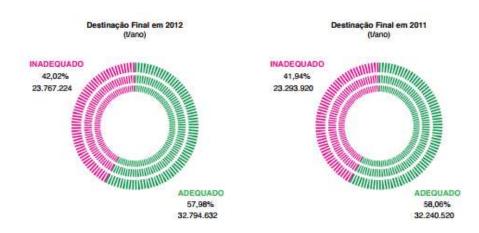


Figura 7 - Destinação Final dos RSU Coletados no Brasil em 2011 e 2012. Fonte: (ABRELPE, 2012).

Comparando com os dados mostrados na Figura 3, percebe-se que o porcentual de RSU com destinos inadequados praticamente não se alterou nos últimos anos, após a implementação da PNRS: 41,94% em 2011; 42,02% em 2012; 41,3% em 2015 e 41,6% em 2016. A Figura 8 reforça essa constatação.

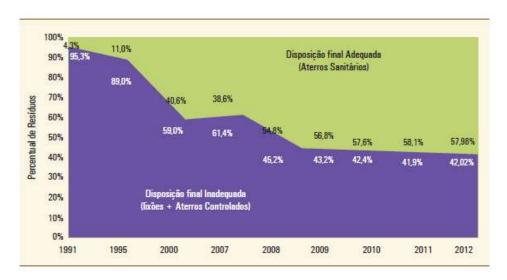


Figura 8 - Situação da disposição final dos RSU no Brasil, de 1991 a 2011. Fonte: (FADE, 2014).

Observa-se uma satisfatória redução da destinação de RSU em aterros controlados e lixões de 1991 até 2009, mas de 2009 até hoje pouca mudança. Além disso, o porcentual de reciclagem atingido ainda é muito baixo e os mecanismos de logística reversa pouco eficientes.

Ao analisar os dados reportados, percebe-se que ainda há muito a se fazer para se garantir a efetividade da PNRS. As principais mudanças demandadas requerem investimentos concretos, planejamentos a longo prazo, continuidade das políticas implementadas, além da consciência, sensibilização e apoio por parte da população. Desde sua implementação, o Brasil está evoluindo a passos bastante lentos no estabelecimento de uma gestão integrada e sustentável de resíduos sólidos e no cumprimento das determinações da PNRS.

#### 3.1.3 Classificação dos Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados utilizando-se diferentes critérios. De acordo com a PNRS, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação, em relação à sua origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
  - c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais:
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS:
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Outra classificação bastante utilizada, e de extrema relevância para o presente trabalho, é quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente. Esta classificação, definida com base na norma ABNT NBR 10004/2004, envolve a identificação do processo ou atividade que originou o resíduo, a identificação de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Os constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve levar em conta as matérias primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

Dado o exposto acima, a norma estabelece que os resíduos sólidos são classificados em dois grupos, de acordo com as suas características, sendo eles:

- Resíduos perigosos (classe I)
- Resíduos não perigosos (classe II). Sendo esses subdivididos ainda em IIA (não inertes) e IIB (inertes).

Os resíduos perigosos são aqueles que devido às suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas podem apresentar algum risco à saúde pública ou ao meio ambiente. Entre as características que podem conferir periculosidade aos resíduos sólidos, pode-se destacar: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ABNT, 2004).

Os resíduos não perigosos são aqueles que não apresentam as características descritas acima, e são subdivididos em inertes e não inertes.

Os resíduos não inertes podem possuir as propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, enquanto os resíduos inertes correspondem àqueles que, quando submetidos ao contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, exceto aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004).

Os resíduos que podem ser destinados ao aterro sanitário são os classificados como não perigosos (classe II) (ABNT, 1992).

A Figura 9 mostra um fluxograma das etapas de classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente, de acordo com a norma ABNT NBR 10004/2004.

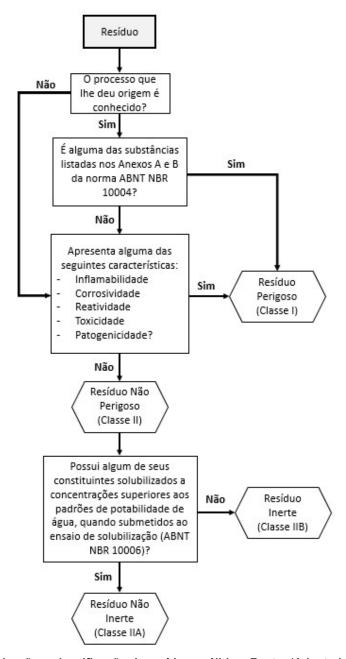


Figura 9 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos. Fonte: (Adaptado de ABNT, 2004).

### 3.2 ATERRO SANITÁRIO

Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos, de acordo com a norma ABNT NBR 8419/1992, compreende-se como a "técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à segurança e minimizando os impactos ambientais". Isso inclui confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra após sua disposição.

Cabe aqui ressaltar, que apesar da PNRS ter instituído o aterro sanitário como disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, sabe-se que no Brasil não é somente os rejeitos que são encaminhados para referido fim, mas também diversos tipos de resíduos. Dessa forma, ao longo do texto, e em diversas publicações é utilizado o termo resíduo para se referir ao que é destinado aos aterros sanitários.

Além de ser o local de disposição final de resíduos, o aterro pode ser considerado também como uma forma de tratamento devido à ocorrência de uma série de processos físicos, químicos e microbiológicos, sob a forma de um reator anaeróbio, que gera uma massa de resíduos, química e biologicamente, mais estável (FADE, 2014). Essa série de reações que ocorrem no aterro irão provocar a degradação dos resíduos causada, principalmente, pela bioconversão da matéria orgânica em formas solúveis e gasosas. Essas formas darão origem aos principais vetores de poluição em aterros: o biogás e o lixiviado.

Devido a todos esses fatores, o aterro sanitário deve conter diversos elementos, com base em critérios de engenharia, para garantir a integridade do sistema, tais como: sistemas de impermeabilização do solo, sistema de drenagem de águas superficiais, drenagem de líquidos e gases gerados na decomposição dos resíduos, sistema de cobertura dos resíduos e coleta de lixiviado (ABNT, 1992).

Esse conjunto de elementos visa garantir a segurança do aterro bem como reduzir possíveis riscos à saúde pública e ao meio ambiente. A forma de construção e a concepção de cada um desses elementos irá depender de diversos fatores como as características do terreno, o tipo de aterro, o tipo de resíduo a ser disposto, entre outros.

A Figura 10 mostra um esquema de aterro sanitário ilustrando alguns de seus principais componentes.

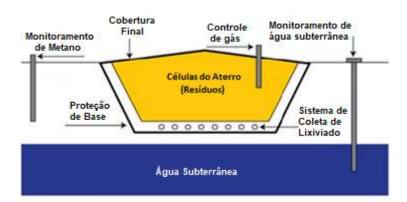


Figura 10 -Esquema de um Aterro Sanitário Fonte: (REVISTA TAE, 2011).

Em regiões com populações menores, onde a geração diária de resíduos é menor do que vinte toneladas, o sistema de aterro pode assumir uma estrutura mais simplificada, desde que essa simplificação não cause dano algum ao meio ambiente (ABNT, 2010). Essa condição foi normalizada pela ABNT NBR 15849/2010 e permite a adoção de soluções adequadas à realidade geográfica de cada município, facilitando a construção dos aterros e evitando a proliferação dos lixões.

Além disso, podem ser empregados aterros com ou sem geração de energia. Aterros com geração de energia são aqueles em que os gases gerados em decorrência da decomposição anaeróbica dos resíduos são drenados e encaminhados para uma unidade geradora de energia. Os gases gerados nesse processo são compostos basicamente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e o aproveitamento energético desses, além de gerar uma forma de energia útil, reduz o potencial de agravamento do efeito estufa. Entre as formas de aproveitamento energético do biogás estão eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

No Brasil, a disposição final dos resíduos sólidos em aterros sanitários é vista como uma das formas mais rápidas, econômicas e viáveis de tratamento por parte dos geradores e prefeituras municipais (FADE, 2014). Essa forma de disposição ganhou ainda mais força após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que classifica os aterros sanitários como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos e ordena a substituição de todos os lixões por aterros sanitários regulamentados.

Apesar disso, conforme citado no item 3.1.2, no Brasil, cerca de 42% dos RSU coletados (ou aproximadamente 30 milhões de toneladas por ano) ainda possuem destinação inadequada como lixões ou aterros controlados, os quais não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente e da saúde pública. A Figura 11 mostra a distribuição da destinação de RSU coletados no Brasil no ano de 2016.

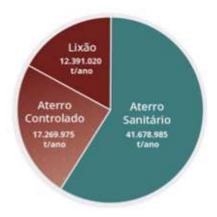


Figura 11 - Disposição Final do RSU Coletados no Brasil em 2016. Fonte: (ABRELPE, 2016).

Mais de três mil municípios brasileiros ainda possuem destinação inadequada para os RSU, apesar da proibição existente desde 1981 e do prazo estabelecido pela PNRS ter-se encerrado em 2014 (ABRELPE, 2016). Conforme já discutido no item 3.1.2, o Brasil caminha a passos lentos em relação às políticas públicas de gerenciamento de resíduos sólidos e ainda há muito a se fazer para se garantir uma destinação correta e ambientalmente adequada para os rejeitos gerados.

A disposição em aterros sanitários é a tecnologia de disposição final de rejeitos mais utilizada em todo o mundo e é imprescindível mesmo em países mais desenvolvidos, que possuem outras tecnologias de tratamento, como incineração, compostagem e reciclagem (FADE, 2014).

A Figura 12 mostra um esquema de aterro sanitário, exemplificando suas diversas fases de existência e os diversos dispositivos de engenharia necessários para sua instalação e operação.



Figura 12 - Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos. Fonte: (IPT, 2000).

A Tabela 5 lista as principais vantagens e desvantagens da tecnologia de disposição de RSU em aterros sanitários.

Tabela 5 - Vantagens e Desvantagens do aterro sanitário. Fonte: (Adaptado de FADE, 2014).

#### **Vantagens Desvantagens** Possibilidade de se utilizar áreas Necessidade de grandes áreas já degradadas por outras para aterro, muitas vezes, longe atividades (ex: área utilizada da área urbana, acarretando como pedreira, etc.); despesas adicionais com transporte; Possibilidade de receber e acomodar rapidamente Possibilidade de desenvolvimento quantidades variáveis de de maus odores; resíduos, sendo bastante flexível; Recebimento, se licenciado, de Possibilidade de deslocamento de resíduos de diversas naturezas poeiras; (classe IIA e IIB); Adaptável a comunidades Alteração da estética da grandes ou pequenas; paisagem; Menores custos de investimento e Diminuição do valor comercial da operação que outras tecnologias; terra; Utilização de equipamentos e Geração de lixiviados e gases que máquinas usadas em serviços de requisitam tratamento adequado; terraplanagem; Período pós-fechamento Simples operacionalização, não relativamente longo para a requerendo pessoal altamente estabilização do aterro, incluindo especializado; efluentes líquidos e gasosos; Possibilidade de aproveitamento Controle dos riscos de impactos energético do biogás; ambientais de longo prazo. Não causa danos ao meio ambiente se corretamente projetado e executado.

## 3.2.1 Fases de Degradação dos Resíduos em um Aterro Sanitário

Kjeldsen e colaboradores (2002) afirmam que existem pelo menos quatro fases de degradação, após o resíduo ser disposto em um aterro e começar a se decompor: Inicialmente ocorre uma fase aeróbica, depois ocorre uma fase ácida anaeróbica, continuando com uma fase metanogênica inicial, e, finalmente, uma fase

metanogênica estável. Cada uma das fases é resumida abaixo, de acordo com Kjeldsen e colaboradores (2002):

- Fase Aeróbica: Durante essa fase, o oxigênio existente nos espaços vazios do resíduo é rapidamente consumido, gerando-se CO<sub>2</sub> e aumentando a temperatura dos resíduos. Essa etapa dura apenas alguns dias dado que o oxigênio não e reabastecido uma vez que o lixo é coberto. O lixiviado produzido resulta da liberação da umidade durante o processo de compactação.
- Fase ácida anaeróbica: Após o esgotamento das fontes de oxigênio, o ambiente torna-se anaeróbio suportando as reações de fermentação e, portanto, gerando um processo de acidificação. Nessa fase, a celulose e a hemicelulose, que compreendem grande parte do peso seco de RSU, são os principais constituintes biodegradáveis. A decomposição desses compostos sob condições anaeróbicas produz metano e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Essa biodegradação é realizada por três grupos de bactérias: (1) a bactérias hidrolíticas e fermentativas que hidrolisam polímeros e fermentam os monossacarídeos resultando ácidos carboxílicos e álcoois; (2) as bactérias acetogênicas que convertem esses ácidos e álcoois em acetatos, hidrogênio e dióxido de carbono; e (3) as metanogênicas que convertem os produtos finais das reações anteriores em metano e dióxido de carbono. Esses processos prosseguem eficientemente em uma gama de pH relativamente em torno de neutro. Posteriormente as bactérias hidrolíticas, fermentativas e acetogênicas dominantes, originam uma acumulação de ácidos carboxílicos, e, por conseguinte, acontece uma diminuição de pH. As maiores concentrações de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio) no lixiviado estarão presentes durante esta fase. A relação entre DBO/DQO na fase ácida tem sido observada acima de 0,4 ou 0,7. Na medida em que o pH se mantém bem ácido, os lixiviados são quimicamente agressivos e vão aumentar a solubilidade de muitos compostos.
- Fase metanogênica inicial: Ocorre quando quantidades mensuráveis de metano (CH<sub>4</sub>) são produzidas. Nessa fase é provável que o pH do resíduo fique suficientemente neutralizado por pelo menos um crescimento limitado dos

microrganismos metanogênicos. Os ácidos que se acumularam na fase anterior são convertidos em metano e CO<sub>2</sub> e a taxa de produção de metano irá aumentar. Concentrações de DQO e DBO começam a diminuir e o pH começa a aumentar à medida que os ácidos são consumidos. A razão DBO/DQO também irá diminuir à medida que os ácidos carboxílicos são consumidos.

• Fase metanogênica estável: A taxa de produção de metano irá atingir o seu nível máximo e diminuir posteriormente, dado que os ácidos carboxílicos decrescem. A taxa de produção do CH4 é dependente da taxa de hidrólise da hemicelulose e celulose. O pH continua a aumentar para as concentrações mais estáveis do aterro. Estão presentes alguns compostos recalcitrantes, tais como ácidos húmicos e fúlvicos, no lixiviado, e a relação DBO/DQO geralmente vai cair abaixo de 0,1, pois os ácidos carboxílicos são consumidos rapidamente

#### 3.2.2 Aterro Sanitário de Seropédica

O Aterro Sanitário de Seropédica (RJ) está em funcionamento desde Abril de 2011 e foi criado para substituir o antigo aterro controlado de Gramacho. O aterro, denominado Centro de Tratamento de Resíduos (CTR Rio), é uma concessão da Companhia de Limpeza Urbana (Comlurb) à empresa Ciclus e, além dos resíduos do Rio de Janeiro, recebe os RSU dos municípios de Itaguaí, Seropédica, Nilópolis, Queimados, São João de Meriti e Duque de Caxias (COMLURB, 2017a).

Em um terreno com mais de um milhão de metros quadrados, o CTR, diariamente, recebe cerca de 10.000 toneladas de RSU (COMLURB, 2017a) e produz cerca de 800 m³ de lixiviado (ELIAS, 2018). Esse lixiviado é captado e enviado para tratamento na Estação de Tratamento de Chorume (ETC) localizado dentro da própria central (CICLUS, 2017). O lodo gerado no tratamento do lixiviado, após a desidratação em geobags, retorna para o aterro como rejeito (CICLUS, 2018).

O CTR Rio foi projetado para uma vida útil de 25 anos e conta com tecnologia para garantir que o solo e o ar não sejam contaminados (REVISTA RADIS, 2017). Para isso, o solo do aterro recebeu tripla impermeabilização, utilizando argila, mantas de polietileno de alta densidade (PEAD), mantas bentoníticas (CGL), além da instalação de sensores eletrônicos que podem detectar qualquer tipo de anomalia no

sistema de impermeabilização. Desta forma, evita-se que o lixiviado entre em contato com o solo (CICLUS, 2017).

Para o tratamento dos gases foi projetado um sistema no qual o metano, gás liberado através da decomposição dos resíduos no aterro, é drenado até os flares, onde é queimado. Essa queima transforma o metano em dióxido de carbono, 25 vezes menos poluente. A central conta ainda com uma rede de poços de monitoramento que permite avaliar as propriedades das águas subterrâneas, verificando se há algum tipo de contaminação (CICLUS, 2017).

A Figura 13 mostra um esquema das camadas de proteção instaladas no aterro de Seropédica.

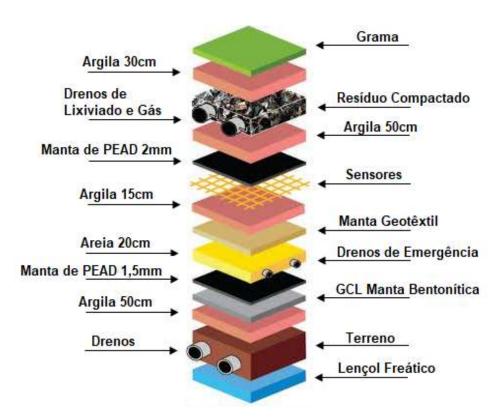


Figura 13 - Camadas de Proteção do Solo no CTR Rio. Fonte: (CICLUS, 2017).

As Figuras 14 e 15 mostram a vista aérea do CTR Rio e da Estação de Tratamento de Chorume.

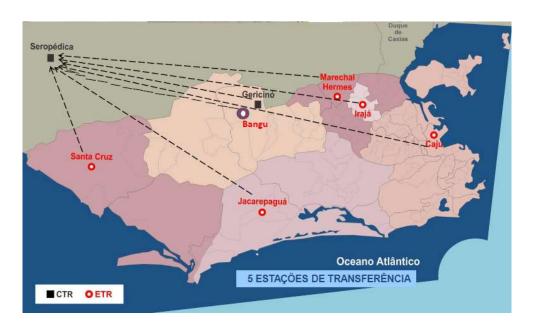


Figura 14 - Foto aérea do CTR Rio (Setembro/2017). Fonte: (CICLUS, 2017).



Figura 15 - Estação de Tratamento de Chorume da CTR Rio (Setembro/2017). Fonte: (CICLUS, 2017).

Antes de chegar no Aterro de Seropédica, os RSU coletados no município do Rio de Janeiro são levados para as Estações de Transferência de Resíduos (ETR). São 5 ETR, que consistem em pólos localizados em regiões estratégicas, de recebimento e transferência de resíduos. Nesses pólos os resíduos são colocados em veículos com maior capacidade de transporte, melhorando assim as condições de tráfego nas vias públicas e minimizando impactos ambientais e sociais na cidade (CICLUS, 2017; REVISTA RADIS, 2017).



A Figura 16 mostra um esquema do fluxo de resíduos até o CTR Rio.

Figura 16 - Fluxo de Resíduos no município do Rio de Janeiro. Fonte: (COMLURB, 2017b)

Ao chegar no aterro, o caminhão é pesado, identificado e descarregado. Os resíduos são colocados nas células do aterro, compactados com o uso de tratores e cobertos por terra. Esse procedimento é realizado cerca de quatrocentas vezes por dia (REVISTA RADIS, 2017). A massa total de RSU depositada no aterro, até Maio de 2018, é de 20.049.717,73 toneladas (CICLUS, 2018).

#### 3.2.3 Aterro Controlado de Gericinó

O aterro de Gericinó, foi implantado com a finalidade de substituir o antigo lixão, situado no bairro de Bangu, que foi utilizado como depósito de resíduos sólidos urbanos por quase vinte anos, sem qualquer compromisso com a preservação do meio ambiente (COMLURB, 2017a). O aterro encerrou o recebimento de resíduos domiciliares em 2014, atendendo à exigência prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos para fechamento de locais inadequados de disposição final de resíduos (SMAC, 2017).

O aterro ocupa uma área aproximada de 300.000 m² e conta com impermeabilização do solo a base de argila compactada e de manta de PVC, além de um sistema de drenagem de lixiviado (COMLURB, 2017a).

Destino de quase duas mil toneladas diárias de resíduos sólidos domésticos, quando em operação, o aterro de Gericinó recebeu nos últimos cinco anos apenas entulhos provenientes de demolições ou resíduos de construção civil (RCC). Hoje em dia, o aterro praticamente não recebe mais nenhum tipo de resíduo e está em processo de encerramento (COMLURB, 2018).

As Figuras 17 e 18 mostram vistas aéreas do local ocupado pelo aterro de Gericinó.



Figura 17 - Vista aérea do Aterro de Gericinó. Fonte: (COMLURB, 2017a)



Figura 18 - Aterro de Gericinó. Fonte: (COMLURB, 2012).

# 3.3 LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

Apesar das numerosas vantagens da disposição de rejeitos em aterro sanitário, a geração de um lixiviado altamente poluidor constitui como sua principal desvantagem. Dos subprodutos dos aterros, provenientes da degradação dos resíduos, os lixiviados são dos mais importantes em termos de controle e simultaneamente um dos mais difíceis de se tratar, devido às suas características bastante agressivas, bem como à evolução físico-química que estas apresentam ao longo do tempo (RENOU et al., 2008a).

Lange e Amaral (2009) definem o lixiviado como o efluente aquoso gerado pela percolação da água da chuva através das células do aterro, combinada com os processos bioquímicos que ocorrem nos rejeitos nele depositados e o próprio conteúdo inerente de água dos rejeitos. Os lixiviados podem conter uma grande quantidade de matéria orgânica (biodegradáveis e não biodegradáveis – refratários), assim como compostos nitrogenados, metais pesados e sais inorgânicos.

A norma ABNT NBR 8419/1992 define o lixiviado de aterro sanitário (chorume) como sendo o líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO.

Normalmente, as características dos lixiviados podem ser representadas por seus parâmetros básicos, que são: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Carbono Orgânico Total (COT), Razão de Biodegradabilidade (DBO/DQO), Potencial Hidrogeniônico (pH), Sólidos Suspensos (SS), Nitrogênio Amoniacal Total (N-NH3), Nitrogênio Total de Kjeldahl (NTK), macro componentes inorgânicos e metais pesados.

### 3.3.1 Composição dos Lixiviados

Os poluentes dos lixiviados de aterros sanitários de RSU podem ser divididos em cinco principais grupos, segundo Christensen e colaborades (2001):

- Matéria orgânica dissolvida (MOD): expressa pela DQO ou COT, incluindo ácidos graxos voláteis e ácidos fúlvicos e húmicos;
- Macro componentes inorgânicos: Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe<sup>+2</sup>, Mn<sup>+2</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> e
   CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>;

- Metais Pesados: Cd<sup>+2</sup>, Cr<sup>+3</sup>, Cu<sup>+2</sup>, Pb<sup>+2</sup>, Ni<sup>+2</sup>, Zn<sup>+2</sup>;
- Compostos orgânicos xenobióticos (COXs): presentes em baixas concentrações, incluindo hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, e compostos alifáticos clorados, e;
- Outros componentes como boro, arsênio, bário, selênio, mercúrio e cobalto, que são encontrados em baixíssimas concentrações.

Em geral, os lixiviados de aterro podem conter concentrações muito elevadas de matéria orgânica dissolvida e macro componentes inorgânicos. As concentrações desses componentes podem atingir até 5000 vezes as concentrações encontradas nas águas subterrâneas (CHRISTENSEN et al., 2001).

Kjeldsen e colaboradores (2002) fizeram um levantamento das características dos lixiviados reportadas em diversos trabalhos ao redor do mundo. A Tabela 6 mostra a faixa de variação dos parâmetros analisados.

Tabela 6 - Composição de Lixiviados de Aterros (Valores em mg/L, exceto pH, condutividade e DBO/DQO). Fonte: (Adaptado de KJELDSEN et al., 2002).

Parâmetro	Faixa de Variação
pH	4,5 - 9,0
Condutividade Específica (µS/cm)	2500 - 35000
Sólidos Totais	2000 - 60000
COT	30 - 29000
DBO	20 - 57000
DQO	140 - 152000
DBO/DQO	0,02 - 0,8
N-orgânico	14 - 2500
N-amoniacal	50 - 2200
CI-	150 - 4500
P total	0,1 - 23
SO <sub>4</sub> -2	8 - 7750
Na <sup>+</sup>	70 - 7700
K <sup>+</sup>	50 - 3700
Ca <sup>+2</sup>	10 - 7200

Conforme pode ser visto na Tabela 6, a faixa de variação dos parâmetros característicos dos lixiviados é bastante ampla. Isso ocorre devido ao grande número de fatores que influenciam nas características do lixiviado gerado. Dentre esses fatores, destacam-se: a idade do aterro, composição dos resíduos, grau de compactação do aterro, tipo de deposição utilizada, presença de materiais inibidores, velocidade de percolação da água e fatores climáticos (KJELDSEN et al., 2002). Isso provocará diferenças nas características dos lixiviados de aterros diferentes e também variações no lixiviado de um mesmo aterro.

A idade do aterro é um dos principais fatores responsáveis pela variação da composição do lixiviado dentro de um mesmo aterro ao longo do tempo. Isso ocorre porque, conforme discutido no item 3.2.1, os resíduos passam por diferentes fases de decomposição no aterro, o que irá gerar lixiviados com composições variadas.

Durante a fase ácida, o lixiviado pode apresentar baixos valores de pH e elevadas concentrações de muitos compostos, em particular altas concentrações de compostos orgânicos facilmente degradáveis como ácidos graxos voláteis. Também é comum encontrar concentrações maiores das substâncias inorgânicas como ferro, manganês, zinco, cálcio e magnésio (IPT, 2000; KJELDSEN et al., 2002)

Na fase metanogênica estável, o valor do pH aumenta e a relação DBO/DQO, que reflete a biodegradabilidade do carbono orgânico, diminui drasticamente. Normalmente isso é reflexo de baixas concentrações de ácidos graxos voláteis e quantidades relativamente altas de substâncias recalcitrantes, como ácidos húmicos e fúlvicos (KJELDSEN et al., 2002).

A Tabela 7 apresenta características de lixiviados na fase ácida e na fase metanogênica, reportados em diversos trabalhos ao redor do mundo, em termos da média e da faixa de variação dos parâmetros. Para parâmetros que não são significativamente afetados pela fase de decomposição do aterro, apenas valores médios são apresentados.

Tabela 7 - Composição de Lixiviados em Função da Fase de Degradação do Resíduo. (Valores em mg/L, exceto pH e DBO/DQO). Fonte: (Adaptado de KJELDSEN et al., 2002).

Parâmetro		Fase Ácida	Fase	Fase Metanogênica			
	Média	Faixa de Variação	Média	Faixa de Variação			
рН	6,1	4,5 - 7,5	8	7,5 - 9,0			
DBO	13000	4000 - 40000	180	20 - 550			
DQO	22000	6000 - 60000	3000	500 - 4500			
DBO/DQO	0,58		0,06				
SO4 <sup>-2</sup>	500	70 - 1750	80	10 - 420			
Ca <sup>+2</sup>	1200	10 - 2500	60	20 - 600			
Mg <sup>+2</sup>	470	50 - 1150	180	40 - 350			
Fe	780	20 - 2100	15	3 -280			
Mn	25	0,3 - 65	0,7	0,03 - 45			
Zn	5	0,1 - 120	0,6	0,03 - 4,0			
N-amoniacal					740		
CI-					2120		
K⁺					1085		
Na⁺					1340		
P total					6		
Cd					0,005		
Cr					0,28		
Co					0,05		
Cu					0,065		
Pb					0,09		
Ni					0,17		

A Tabela 8, apresenta dados da variação de parâmetros dos lixiviados em função da idade do aterro, porém com dados de aterros brasileiros.

Tabela 8 - Características dos lixiviados brasileiros nas fases ácida e metanogênica. (Valores em mg/L, exceto pH e condutividade). Fonte: (Adaptado de SOUTO, 2009).

Parâmetro	Fase Ácida		Fase Me	etanogênica
-	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
рН	4,4	8,4	5,9	9,2
DBO	1	55000	3	19200
DQO	90	100000	20	35000
Condutividade (µS/cm)	230	45000	100	45000
N-amoniacal	0,07	2000	0,03	3000
NTK	1,7	3000	0,6	5000
ST	400	45000	200	29000
P total	nd	260	nd	80
Fe	nd	1400	0,01	720
Mn	nd	115	nd	30
Zn	nd	27	nd	35
CI <sup>-</sup>	275	4700	20	6900
Cr	nd	1,2	nd	1,0
Cu	nd	0,8	nd	2,9
Pb	nd	1,5	nd	6,7
Ni	nd	6,5	nd	35

nd = abaixo do limite de detecção.

Gotvanjn, Tisler e Zagorc-Koncan (2009) reforçam a ideia da mudança das características do lixiviado em função da idade do aterro e a relação com a biodegradabilidade do lixiviado gerado. Eles afirmam que os lixiviados mais novos, geralmente formados em menos de dois anos após a deposição dos resíduos, contêm uma maior fração orgânica de massa molar relativamente baixa (DBO/DQO > 0,6) em comparação com lixiviados antigos (gerados durante fases de estabilização - mais de dez anos após a deposição). Em lixiviados mais antigos, as substâncias orgânicas predominantes são substâncias húmicas e fúlvicas de massa molar relativamente alta com caráter recalcitrante, resultando em menor biodegradabilidade (DBO/DQO < 0,3).

A Tabela 9 resume a variação das características do lixiviados em função da idade do aterro.

Tabela 9 - Classificação de Lixiviados em Função da Idade do Aterro. Fonte: (Adaptado de YAO, 2013).

	Recente	Intermediário	Antigo
Idade (anos)	< 5	5 - 10	> 10
рН	6,5	6,5 - 7,5	> 7,5
DQO (mg/L)	> 10.000	4.000 - 10.000	< 4.000
DBO/DQO	> 0,5	0,1 - 0,5	< 0,1
Compostos Orgânicos	80% ácidos graxos voláteis (AGV)	5 - 30% AGV + ácidos húmicos e fúlvicos	Ácidos húmicos e fúlvicos
Metais Pesados	Baixo - Médio	Baixo Baixo	
Biodegradabilidade	Alta	Média	Baixa

Essa relação entre a idade do aterro e a composição da matéria orgânica pode fornecer um critério importante e ser bastante útil na escolha do processo de tratamento mais adequado para determinado lixiviado.

Conforme observado, os lixiviados de aterros sanitários são misturas complexas nas quais os tipos e concentrações das substâncias encontradas variam bastante de um aterro para o outro e até mesmo no próprio aterro, ao longo do tempo.

Os principais impactos ambientais potenciais relacionados ao lixiviado de aterro sanitário são a poluição das águas subterrâneas e superficiais. Além disso, podem ainda provocar danos no solo e no ar, através da emissão de gases voláteis, caso não haja a devida coleta e tratamento adequado.

Os principais efeitos do lançamento de lixiviados em corpos hídricos estão associados à diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido, à toxicidade causada pela amônia e à eutrofização provocada pelas elevadas concentrações de nitrogênio (KJELDSEN et al., 2002). Isso pode acarretar, entre outros efeitos, em alteração da fauna e flora do local, bioacumulação da toxicidade nos organismos vivos, redução das taxas de fotossíntese e desequilíbrios na cadeia alimentar.

Portanto, se não forem devidamente coletados e tratados, esse efluentes podem causar severos danos ao meio ambiente e à saúde humana.

# 3.4 TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

O aumento do rigor dos órgãos ambientais em relação ao controle, monitoramento e disposição de diversos tipos de efluentes tem alertado cada vez mais as autoridades competentes em relação aos tratamentos de lixiviados de aterros sanitários. Com o passar dos anos, a averiguação dos impactos do lixiviado de aterros no meio ambiente, forçou autoridades ao redor do mundo a adaptarem e modificarem requisitos e leis, tornando-as mais restritivas e rigorosas (MORAVIA, 2010).

No Brasil, a Resolução nº 430/2011 do CONAMA, que complementa e altera a Resolução nº357/2005, dispõe sobre as condições e padrões de lançamentos de efluentes. O Artigo 16 dessa Resolução estabelece as condições e padrões que os efluentes de qualquer fonte poluidora devem atender antes de serem lançados nos corpos receptores. Nesse artigo fica estabelecido que os efluentes oriundos de sistemas de disposição final de resíduos sólidos de qualquer origem também devem atender às condições e padrões previstos na Resolução (CONAMA, 2011).

Conforme discutido no item 3.3.1, a composição e a quantidade do lixiviado gerado irá depender de uma série de fatores, fazendo com que haja uma imensa variação nos lixiviados, ao longo do tempo, e de um lugar para o outro. Isso demandará tratamentos diferenciados para cada tipo de lixiviado.

A variedade de tratamentos existentes para lixiviados é grande. Dentre eles, podem-se destacar (RENOU et al., 2008a):

- Processos biológicos (sistemas de lagoas, lodos ativados, reatores biológicos aeróbios e anaeróbios);
- Processos físico-químicos (coagulação/floculação, oxidação química, adsorção com carvão ativado, precipitação química);
- Processos de separação e filtração com usos de membranas;
- Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) que operam tratando o lixiviado em conjunto com esgotos sanitários.

A estratégia de tratamento adequada dependerá basicamente da observação de dois critérios principais: qualidade inicial do lixiviado e requisitos finais de lançamentos definidos pela legislação local (KURNIAWAN; LO; CHAN, 2006).

Segundo Gotvanjn, Tisler e Zagorc-Koncan (2009), o método de tratamento utilizado deve ser compatível com as características do lixiviado, pois, para cada tipo de poluente um método pode ser mais apropriado. Porém, na maioria das vezes, somente a utilização de um tratamento isolado não é suficiente devido às características complexas dos lixiviados. Nem o tratamento biológico, nem o físico-químico, isoladamente, conseguem atingir eficiências de tratamento elevadas para todos os componentes.

Os processos biológicos consistem na decomposição da matéria orgânica através da utilização de microrganismos. Normalmente são utilizados quando o lixiviado contém elevada concentração de matéria orgânica biodegradável. Esse tipo de tratamento pode ser subdividido em dois grandes grupos: processos aeróbios e anaeróbios. Podem também ser classificados de acordo com o tipo de crescimento de biomassa (em suspensão ou aderida). O tratamento biológico também mostra efetividade na remoção da matéria nitrogenada, principalmente de lixiviados novos, quando a razão DBO/DQO está acima de 0,5. Em lixiviados antigos, a maior presença de compostos refratários (principalmente ácidos húmicos e fúlvicos) tende a limitar a eficácia do processo (KARGI; PAMUKOGLU, 2003; VILAR et al., 2011).

Os processos físico-químicos incluem a redução de sólidos em suspensão, partículas coloidais, cor e compostos tóxicos através da flotação, coagulação/floculação, adsorção e arraste com ar, por exemplo. Normalmente são utilizados adicionalmente na linha de tratamento de lixiviados (pré-tratamento ou purificação final) ou para tratar um poluente específico, como por exemplo, arraste com ar para remoção de amônia (AMORIM; LEÃO; MOREIRA, 2009).

O tratamento de lixiviado em ETE, juntamente com o esgoto doméstico, consiste na dosagem controlada do lixiviado no afluente da estação de tratamento de esgoto para tratamento combinado. Esse tipo de tratamento é adotado em diversos países principalmente devido ao seu baixo custo operacional e fácil manutenção (GOMES, 2009). Porém, em alguns países principalmente na Europa, esse tipo de tratamento vem sendo cada vez menos utilizado devido à presença no lixiviado de compostos orgânicos de baixa biodegradabilidade que reduzem a eficiência do tratamento e aumentam a concentração do efluente (RENOU et al., 2008a).

Devido à complexidade e à alta carga poluidora dos lixiviados, e do rigor cada vez maior dos órgãos ambientais, novos métodos de tratamento vão sendo desenvolvidos, e alguns outros vão sendo aperfeiçoados. Dentre os métodos mais

recentes pode-se citar: os Processos Oxidativos Avançados (POA) e os Processos de Separação por Membranas (PSM).

A utilização dos PSM para tratamento de lixiviado vem ganhando cada vez mais espaço devido, principalmente, ao menor consumo energético em comparação com os outros processos de separação tradicionais, a flexibilidade operacional pelo fato do sistema ser mais compacto e a obtenção de produtos finais de melhor qualidade (ZHANG et al., 2013).

Normalmente, a solução encontrada para eliminar diferentes grupos de poluentes em um mesmo lixiviado é a adoção de técnicas combinadas de tratamento, observando as especificidades e limitações de cada uma delas. Gotvanjn e colaboradores (2009), sugerem por exemplo: (i) arraste com ar para remover substâncias voláteis e halogênios organicamente adsorvíveis; (ii) adsorção e carvão ativado para remoção de orgânicos e metais; (iii) coagulação/floculação para remover substâncias coloidais e metais; (iv) POA para degradar substâncias recalcitrantes e (v) tratamento biológico para remover substâncias biodegradáveis.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, a Tabela 10, adaptada de Löblich (2014), apresenta algumas técnicas de tratamento de lixiviados e a respectiva eficiência na remoção de diferentes poluentes.

Tabela 10 - Eficiências de Tratamentos para a Remoção de Poluentes. Fonte: (Adaptado de LÖBLICH, 2014).

Tratamento	SST	DBO	DQO	N- Total	N- NH4+ N-NH3	Metais Pesados	Halogênios Organicamente Adsorvíveis	Sais
Tratamento biológico	-	+	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	-
Adsorção/Carvão ativado	-	(-)	+	-	-	(-)	+	-
Coagulação/Floculação	(+)	(-)	(+)	-	-	(+)	(-)	-
Arraste com Ar	-	(-)	(-)	-	+	(-)	(+)	-
Oxidação Química	-	(-)	+	(-)	(+)	-	(+)	-
Microfiltração/Ultrafiltração	+	(-)	(-)	(-)	-	(+)	(-)	-
Osmose Inversa	(+)	+	+	+	(+)	+	+	+

<sup>+</sup> Adequado; (+) Adequado com limitações; (-) Eficiência reduzida e - Não adequado

A Figura 19 sugere um critério de seleção do tipo de tratamento a ser utilizado de acordo com algumas características do lixiviado.

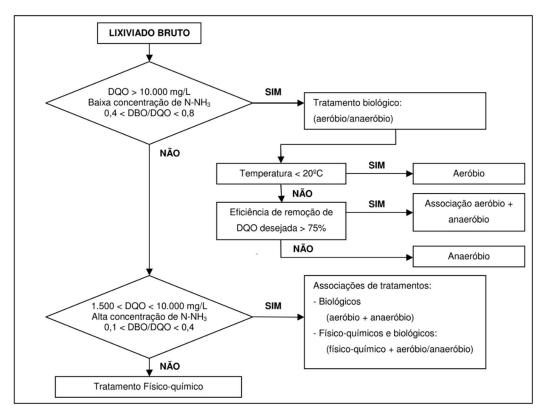


Figura 19 - Parâmetros de decisão para seleção do tipo de tratamento de lixiviado.

Fonte: (MORAVIA, 2010).

A Tabela 11 mostra um resumo da eficiência de diferentes tratamentos de acordo com a idade do aterro. O conhecimento desses parâmetros iniciais, pode ajudar no sentido de selecionar os tratamentos mais adequados.

Tabela 11 - Eficiência do Tratamento em Função da Idade do Aterro.
Fonte: (Adaptado de RENOU et al., 2008).

Tratamento	Característica do Lixiviado				
	Jovem	Médio	Antigo		
Transferência de Lixiviado					
Cotratamento com esgoto doméstico	Bom	Razoável	Ruim		
Recirculação	Bom	Razoável	Ruim		
Físico Químicos					
Coagulação-floculação	Ruim	Razoável	Razoável		
Precipitação Química	Ruim	Razoável	Ruim		
Adsorção	Ruim	Razoável	Bom		
Oxidação Química	Ruim	Razoável	Razoável		
Arraste	Ruim	Razoável	Razoável		
Biológico					
Aeróbios	Bom	Razoável	Ruim		
Anaeróbios	Bom	Razoável	Ruim		
Membranas					
Ultrafiltração	Ruim - Razoável				
Nanofiltração	Bom	Bom	Bom		
Osmose Inversa	Bom	Bom	Bom		

O tratamento a ser utilizado dependerá de diversos fatores como característica, composição e quantidade de lixiviado, o que representa um grande desafio, devido à grande variação destas características. Como já citado anteriormente, as características do lixiviado são específicas do local e do tempo, o que torna difícil a determinação e adoção de uma técnica de tratamento universal e eficaz. De maneira geral, não há tecnologia que consiga remover substâncias poluentes tão diversas e agressivas, como as encontradas no lixiviado, atuando isoladamente. A complexidade das composições de lixiviados torna muito difícil a criação de recomendações gerais, já que a técnica adotada para determinado aterro nem sempre é aplicável a outro. As soluções convencionais normalmente são baseadas em sistemas combinados, cujas preocupações fundamentais estão associadas à eficiência, à viabilidade técnica e ao custo do tratamento (GUIDOLINI et al., 2005; MORAVIA 2010).

## 3.4.1 Coagulação/Floculação

A coagulação seguida de floculação é uma técnica utilizada para a remoção de materiais em suspensão ou coloidais. As partículas coloidais (ou simplesmente coloides), normalmente responsáveis pela cor e turbidez da suspensão, possuem uma faixa de tamanho de 1 nm (10<sup>-7</sup> cm) a 0,1 nm (10<sup>-8</sup> cm) e não podem ser removidas por processos físicos convencionais (ECKENFELDER, 2000).

Uma característica importante das partículas coloidais é que elas não formam soluções (misturas homogêneas) e sim dispersões ou suspensões. Nas soluções, os solutos perdem suas características iniciais, como por exemplo na dissolução de um sal, onde os íons formados são em natureza diferentes do sal antes da dissolução. Já as partículas coloidais retêm sua identidade quando em suspensão, o que faz com que suspensões coloidais sejam sistemas heterogêneos (MASLIYAH; BHATTACHARJEE, 2006). Ainda de acordo com os autores, o sistema coloidal é descrito como um sistema multifásico, em que uma fase discreta (fase dispersa) está suspensa em um meio contínuo chamado de dispersante.

Os coloides possuem propriedades elétricas que criam uma força de repulsão, o que impede a aglomeração e a sedimentação desses. A coagulação neutraliza essas cargas elétricas na superfície das partículas coloidais, desestabilizando-as e formando pequenos flocos. Na floculação, através da agitação mecânica lenta e/ou adição de floculante, os flocos se agregam formando partículas maiores, o que favorece a decantação (ECKENFELDER, 2000).

A coagulação resulta de dois mecanismos básicos: coagulação pericinética (ou eletrocinética), na qual o potencial zeta é reduzido por íons ou coloides de carga contrária a um nível abaixo das forças atrativas de van der Waals, e coagulação ortocinética, na qual as micelas se agregam e formam blocos que aglomeram às partículas coloidais (ECKENFELDER, 2000).

Segundo Cavalcanti (2016), no tratamento de lixiviados de aterros sanitários, a coagulação/floculação é uma técnica muito utilizada como um pré-tratamento (antes de um tratamento biológico ou separação por membranas, por exemplo), ou ainda como um polimento final, afim de remover a matéria orgânica não biodegradável. Ainda segundo os autores, os principais coagulantes utilizados são sulfato de alumínio, sulfato ferroso, cloreto férrico, óxido de cálcio e algumas combinações desses.

A Tabela 12 apresenta os principais agentes coagulantes utilizados para tratamento de efluentes, com suas faixas de utilização e principais aplicações.

Tabela 12 - Principais Coagulantes e Suas Aplicações. Fonte: (ECKENFELDER, 2000).

Coagulante	Faixa de Dosagem (mg/L)	рН	Aplicações
Cal	150 - 500	9,0 - 11,0	Para coagulação de coloides e remoção de fósforo Efluentes com baixa alcalinidade e alta concentração de fósforo Ca(OH)₂(aq) + Ca(HCO₃)₂(aq) → 2CaCO₃(s) + 2H₂O(I)  MgCO₃(aq) + Ca(OH)₂(aq) → Mg(OH)₂(aq) + CaCO₃(s)
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75 - 250	4,5 - 7,0	Para coagulação de coloides e remoção de fósforo Efluente com alta alcalinidade e baixa concentração de fósforo $Al_2(SO_4)_3(aq) + 6H_2O(I) \rightarrow 2AI(OH)_3(s) + 3H_2SO_4(aq)$
FeCl <sub>3</sub> , FeCl <sub>2</sub>	35 - 150	4,0 - 7,0	Para coagulação de coloides e remoção de fósforo
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	70 - 200	4,0 - 7,0	Efluentes com alta alcalinidade e baixa concentração de fósforo FeCl₃(aq) + 3H₂O(l) → Fe(OH)₃(s) + 3HCl(aq)
Polímeros catiônicos	2 - 5	Não Altera	Usado para coagulação de coloides e auxiliar a coagulação com metal
Polímeros aniônicos e não iônicos	0,25 - 1,0	Não Altera	Usado para aumentar a velocidade de sedimentação
Argila	3 - 20	Não Altera	Usado para suspensões coloidais muito diluídas

A Tabela 13 mostra dados de alguns trabalhos que estudaram a otimização do processo de coagulação/floculação com diferentes coagulantes, visando à remoção da DQO inicial do lixiviado.

Coagulante	Faixa de Concentração do Coagulante (g/L)	DQO inicial (mg/L)	DBO/DQO	Remoção DQO (%)
Ca(OH) <sub>2</sub> + Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,5 - 4,0 + 0 - 0,2	4000 - 8810	0,15	39
FeCl <sub>3</sub> ou Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	1,6 - 11,3	4100	0,05	40 - 50
FeCl <sub>3</sub>	0,2 - 1,2	1200 - 1500	0,04	39
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8 - 3,0 + 1,0 - 2,0	5000	<0,01	67
FeCl₃	1,6	7400 - 8800	0,05 - 0,06	40 - 90
$Al_2(SO_4)_3$	0,7	3460	0,04	10 - 25
$FeCl_3 + Al_2(SO_4)_3$	1,0 - 5,0	5350	0,2	75
Ca(OH) <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	1.5 + 1.0	6000 - 8200	0,11 - 0,17	42

Tabela 13 - Principais Coagulantes Utilizados. Fonte: (Renou et al., 2008).

## 3.4.2 Coagulantes Utilizados

Entre os principais fatores que podem influenciar na eficiência do processo de coagulação/floculação estão: a qualidade do efluente a ser tratado, o pH de operação, o tempo de misturas rápida e lenta, a velocidade de agitação, e claro, o tipo e a quantidade de coagulante utilizado (OLIVEIRA, 2008).

A seleção do tipo do coagulante a ser utilizado irá depender de suas características e da sua capacidade de produzir precipitados e espécies hidrolisadas em dissociação no meio aquoso, capazes de desestabilizar ou envolver as partículas suspensas e coloidais presentes no efluente (LIBÂNIO, 2010). Além disso, deve-se levar em conta a tecnologia de tratamento disponível, o custo do coagulante e dos produtos químicos associados a ele e, ainda, a quantidade e característica do lodo gerado (HOWE et al., 2016).

Os coagulantes utilizados no presente trabalho foram: sulfato de alumínio, cloreto férrico e óxido de cálcio, os quais serão brevemente descritos a seguir.

#### Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio possui fórmula química Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.nH<sub>2</sub>O, em que "n" representa o número de moléculas de água de cristalização e é um dos coagulantes mais utilizados no Brasil, devido à sua eficiência aliada ao baixo custo (FRANCO, 2009). Pode ser disponibilizado em pó, granulado ou em soluções concentradas. As

principais reações de coagulação utilizando esse coagulante são observadas entre pH 5 e 8 (CORBITT, 1999).

As equações que caracterizam as possíveis reações de hidrólise do alumínio ocorridas a 25 °C estão descritas abaixo, segundo Pavanelli (2001).

$$AI^{+3}(aq) + H_2O \leftrightarrow AI(OH)^{+2}(aq) + H^{+}(aq)$$
 (1)

$$2AI^{+3}_{(aq)} + 2H_2O \leftrightarrow AI_2(OH)_2^{+4}_{(aq)} + 2H^+_{(aq)}$$
(2)

$$6AI^{+3}_{(aq)} + 15H_2O \leftrightarrow AI_6(OH)_{15}^{+3}_{(aq)} + 15H^+_{(aq)}$$
 (3)

$$8AI^{+3}_{(aq)} + 20H_2O \leftrightarrow AI_8(OH)_{20}^{+5}_{(aq)} + 20H^+_{(aq)}$$
(4)

$$AI(OH)_3^+_{(aq)} \leftrightarrow AI^{+3}_{(aq)} + 3OH^- \tag{5}$$

$$AI^{+3}_{(aq)} + 4H_2O \leftrightarrow AI(OH)_4^{-}_{(aq)} + 4H^{+}_{(aq)}$$
 (6)

O diagrama das espécies hidrolisadas, ou diagrama de solubilidade, em função do pH para o sulfato de alumínio é mostrado na Figura 20.

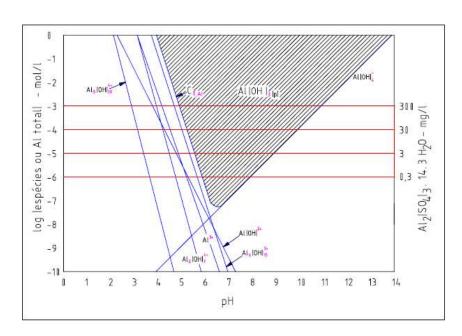


Figura 20 - Diagrama de Equilíbrio Heterogêneo do Al(OH)3. Fonte: (DI BERNARDO, 1993).

O hidróxido do alumínio insolúvel é o Al(OH)<sub>3</sub> e as espécies solúveis são compostos oxi-hidrogenados que apresentam cargas positivas e o Al(OH)<sup>-4</sup>. Como se pode observar na Figura 20, com o aumento do pH há uma diminuição da solubilidade

na medida em que aumenta a estabilidade do Al(OH)<sub>3</sub>, chegando a um mínimo de solubilidade no valor de pH 6,5 (FERREIRA, 2013).

#### Cloreto Férrico

O cloreto férrico, amplamente utilizado no tratamento de esgotos domésticos e industriais, é representado pela fórmula molecular FeCl<sub>3</sub>.nH<sub>2</sub>O e pode ser encontrada tanto na forma líquida quanto sólida (FRANCO, 2009).

A solubilidade de várias espécies do ferro, juntamente com o respectivo mecanismo de coagulação, é ilustrada na Figura 21, no qual a concentração log molar de ferro (mol/L) é plotada em função do pH. O diagrama de solubilidade mostra as regiões de predominância de cada espécie química que o ferro pode formar quando está em solução em função do pH do meio (FERREIRA, 2013).

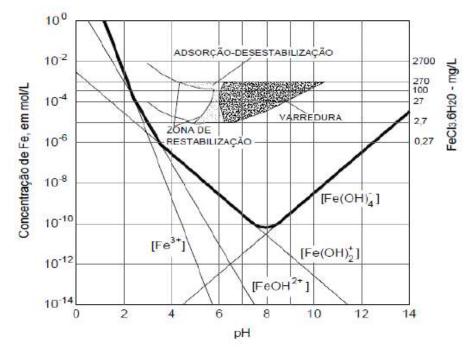


Figura 21 - Diagrama de solubilidade do ferro em um sistema aquoso, representando os mecanismos de coagulação/floculação. Fonte: (JOHNSON; AMIRTHARAJAH, 1983).

Como se pode observar na Figura 21, o comportamento da solubilidade do ferro é similar à do alumínio no sentido de que com um aumento de pH há uma diminuição da solubilidade na medida que aumenta a estabilidade do Fe(OH)<sub>3</sub>, chegando a um mínimo de solubilidade no valor de pH 8,0.

A seguir, são listadas as reações de hidrólise correspondentes ao cloreto férrico em meio aquoso de acordo com (METCALF & EDDY et al., 2002).

$$Fe(OH)_{3(s)} + 3H^{+}_{(aq)} \leftrightarrow Fe^{+3}_{(aq)} + 3H_2O$$
 (7)

$$Fe(OH)_{3(s)} + 2H^{+}_{(aq)} \leftrightarrow Fe(OH)^{+2}_{(aq)} + 2H_{2}O$$
 (8)

$$Fe(OH)_{3(s)} + H^{+}_{(aq)} \leftrightarrow Fe(OH)^{+}_{(aq)} + 2H_2O$$

$$\tag{9}$$

$$Fe(OH)_{3(s)} \leftrightarrow Fe(OH)_{3(aq)}$$
 (10)

$$Fe(OH)_{3(s)} + H_2O \leftrightarrow Fe(OH)^{-4}_{(aq)} + H^{+}_{(aq)}$$
 (11)

#### Óxido de Cálcio

Segundo Renou e colaboradores (2008b), logo após a adição de cal no lixiviado são formados os primeiros cristais de CaCO<sub>3</sub>. Desta forma, o pré-tratamento do lixiviado com óxido de cálcio induz à descarbonatação, que tem um forte efeito sobre a fração inorgânica presente no efluente. O mecanismo de reação é descrito pelas seguintes equações químicas, ainda segundo os autores.

$$Ca(OH)_{2(aq)} + Ca(HCO_3)_{2(aq)} \rightarrow 2CaCO_{3(s)} + 2H_2O$$
 (12)

$$Ca(OH)_{2(aq)} + Mg(HCO3)_{2(aq)} \rightarrow MgCO_{3(s)} + CaCO_{3(s)} + 2H_2O$$
 (13)

$$Ca(OH)_{2(aq)} + MgCO_{3(aq)} \rightarrow CaCO_{3(s)} + Mg(OH)_{2(aq)}$$

$$\tag{14}$$

Durante a adição da cal, os íons carbonatos precipitam, resultando em uma diminuição da condutividade e dureza do lixiviado. Isso ocorre até que a concentração de carbonato se torna limitante, impedindo que o limite de solubilidade do sal seja excedido (RENOU et al., 2008b).

A adição de cal provoca também um aumento do pH do meio, devido à introdução de íons OH- no meio, de acordo com a equação 15.

$$Ca(OH)_{2(aq)} \rightarrow Ca^{+2}_{(aq)} + (OH)_{(aq)}^{-}$$
 (15)

A Tabela 14 traz um resumo de diversos trabalhos que utilizaram os coagulantes supracitados para tratamento de lixiviados, e as condições ótimas de tratamento encontradas.

Tabela 14 - Resumo de estudos de coagulação/floculação em lixiviados utilizando CaO, FeCl<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>(SO4)<sub>3</sub>.

		DQO inicial	Coagulantes	Melhor Resul	ltado	R	emoção (%)	moção (%)		
Referência	Aterro	(mg/L)	Avaliados	Concentração (mg coagulante/L)			сот	Cor		
Cibro (2017)	Coronádico/D L	4005	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	19000	4	48	59,7	59,5		
Silva (2017)	Seropédica/RJ	4235	FeCl <sub>3</sub>	4360	5	17	42,3	60		
Silva (2009)	Gramacho/RJ	3269	FeCl <sub>3</sub>	5800	5	78,4	-	-		
Mávima (2007)	Piguagu/SC	2070	$Al_2(SO_4)_3$	1500	7	28	56	42		
Máximo (2007)	Biguaçu/SC	3079	FeCl <sub>3</sub>	1500	7	35	27	68		
Silva (2002)	Gramacho/RJ	3463	$Al_2(SO_4)_3$	700	4,5	23	15	70		
Amon at al. (2015)	Vila Real/	E700	$Al_2(SO_4)_3$	1027	6	39	-	-		
Amor et al. (2015)	Portugal	5700	FeCl <sub>3</sub>	1200	5	63	-	-		
- · · · (00.40)	Cramanaha/D.I	1973	$Al_2(SO_4)_3$	6340	6	56	-	-		
Ferreira (2013)	Gramacho/RJ		FeCl <sub>3</sub>	1742	5	62,4	-	-		
	Gramacho/RJ	2698		1800	4	79	78	93		
Lima (2017)	Gericinó/RJ	1776	FeCl3	1800	4	80	75	91		
	Seropédica/RJ	3633		1800	5	75	70	88		
Almeida (2016)	Seropédica/RJ	4137	CaO	10000	9,48	37,1	53,8	-		
Silva (2008)	Muribeca/PE	8260	CaO	15000	12,2	10,3	-	-		
T-II (0040)	Nova	0500	FeCl <sub>3</sub>	950	7,5	14	-	-		
Telles (2010)	Iguaçu/RJ	8560	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	500	7,5	15	-	-		
Renou et al. (2008b)	França	1339	CaO	4000	10,8	22,5	-	-		
		2650	FeCl₃	1700	5	73	-	97		
Castrillón et al. (2010)	Asturias/ Espanha	3650	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	3200	6	59,9	-	95,4		
(2010)	Боранна	7624	CaO	18600	12	22,6	-	-		

Existem diversos estudos a respeito da utilização de coagulação/floculação no tratamento de lixiviados e efluentes em geral (SILVA, 2017; LIMA, 2017; FERREIRA, 2013; FRANCO, 2009). A maioria deles visa a otimização do tratamento, como por exemplo, a seleção do coagulante mais adequado, a identificação de condições experimentais ótimas e a avaliação do efeito do pH. Porém, a pesquisa em relação ao resíduo (lodo) que é gerado e sua destinação ainda é muito escassa.

Diante do exposto, é notório que a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos envolvem todo o setor de resíduos e devem ser abordados de uma maneira completa. Isso inclui o tratamento do lixiviado de aterro sanitário, considerado um dos passivos ambientais mais caros e difíceis de tratar. O presente trabalho procurou trazer informações que contribuam no cenário do tratamento primário do lixiviado e a avaliação do rejeito (lodo) gerado através do processo de coagulação/floculação.

# **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo descreve a metodologia experimental e os procedimentos analíticos utilizados neste trabalho. Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Tratamento de Águas e Reúso de Efluentes – Labtare (EQ/UFRJ) entre Maio de 2017 e Março de 2018.

# 4.1 COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste trabalho foram utilizadas amostras de lixiviado provenientes dos Aterros Sanitários de Seropédica e Gericinó, ambos localizados no Estado do Rio de Janeiro. Foram coletadas duas amostras de lixiviado bruto do Aterro de Seropédica, obtidas em Maio e em Dezembro de 2017. As duas amostras oriundas do Aterro de Gericinó foram coletadas em Maio de 2017 e em Fevereiro de 2018. As amostras foram armazenadas em bombonas de polietileno à temperatura ambiente.

# 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO

Os lixiviados foram caracterizados antes da realização dos experimentos para verificação da eficácia dos tratamentos propostos. Os parâmetros monitorados foram: potencial hidrogeniônico (pH), Carbono Orgânico Total (COT), Demanda Química de Oxigênio (DQO), condutividade, cor verdadeira, absorbância a 254 nm (ABS), cujas metodologias estão descritas no item 4.5.

# 4.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Os experimentos de coagulação-floculação foram realizados em teste de jarros ("Jar Test" – Figura 22), que tiveram como objetivo a determinação dos melhores parâmetros dos tratamentos. Foram utilizados como coagulantes o óxido de cálcio (CaO), o cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub>) e o sulfato de alumínio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). O equipamento utilizado, de reatores estáticos (modelo Nova Ética) é composto de 6 reatores, com capacidade para 2 litros em cada reator.

Foram utilizados 500 mL de lixiviado em cada jarro. O tempo de mistura rápida foi de 1 minuto, a 150 rpm e a mistura lenta durante 20 minutos a 30 rpm.



Figura 22 - Aparelho de "Jar-Test" utilizado nos experimentos.

Posteriormente, o lixiviado tratado decantou por 120 minutos em provetas. Ao final do procedimento, o volume de lodo foi medido e o clarificado foi coletado para análise dos parâmetros citados no item anterior. Exceção para a condutividade, que só foi monitorada nos testes com óxido de cálcio. O tempo de sedimentação foi elevado para se garantir uma sedimentação eficiente e evitar possíveis interferências da turbidez nas análises dos demais parâmetros.

O lodo formado foi separado do sobrenadante, e uma pequena amostra foi retirada para análise. O lodo foi coletado em cadinhos e, após serem previamente pesados, foram colocados na estufa a 100 °C até peso constante, para determinação do teor de umidade. Depois, foram colocados na mufla a 550 °C, novamente até peso constante, para determinação do teor de sólidos voláteis.

# 4.3.1 Coagulação/Floculação com Óxido de Cálcio

Foi preparada uma solução de CaO, 200 g/L e analisadas concentrações de coagulante de 6, 8, 10, 12, 16 e 20 g CaO/L para o lixiviado de Gericinó, e 8, 10, 12, 16, 20 e 24 g CaO/L para o lixiviado de Seropédica. Os experimentos analisaram a influência da concentração de coagulante nos parâmetros estudados. A faixa de concentração de coagulante utilizado foi definida baseada em diversos trabalhos anteriores (ALMEIDA, 2016; ECKENFELDER, 2000; SILVA, 2008) e em testes preliminares realizados pelo autor.

## 4.3.2 Coagulação/Floculação com Cloreto Férrico

Foi preparada uma solução de FeCl<sub>3</sub> 200 g/L e estudou-se a influência da concentração de coagulante e do pH no tratamento.

Na 1ª etapa avaliou-se a variação do pH. A concentração inicial de coagulante escolhida foi de 4000 mg FeCl<sub>3</sub>/L baseado na DQO inicial dos lixiviados (CASTILHOS JR.; MÁXIMO, 2007) e em experimentos preliminares realizados pelo autor. Foram feitos testes com valores de pH 4, 5, 6 (BILA, 2000; KANG; HWANG, 2000) e no lixiviado natural, sem a correção do pH. O acidulante utilizado foi ácido sulfúrico 98%.

Na 2ª etapa, fixou-se o pH ótimo obtido na primeira etapa, variando-se então, a concentração de cloreto férrico. As concentrações analisadas foram 3000, 4000, 5000 e 5500 mg FeCl<sub>3</sub>/L.

## 4.3.3 Coagulação/Floculação com Sulfato de Alumínio

Foi preparada uma solução de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 200 g/L e estudou-se a influência da concentração de coagulante e do pH no tratamento.

Na 1ª etapa avaliou-se a variação do pH. A concentração inicial de coagulante escolhida foi de 4000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L baseado na DQO inicial dos lixiviados (MÁXIMO, 2007) e em experimentos preliminares realizados pelo autor. Foram feitos testes com valores de pH 4, 5, 6 (BILA, 2000; KANG; HWANG, 2000) e no lixiviado natural, sem a correção do pH. O acidulante utilizado foi ácido sulfúrico 98%.

Na 2ª etapa, fixou-se o pH ótimo obtido na primeira etapa, variando-se então, a concentração de sulfato de alumínio. As concentrações analisadas foram 3000, 4000, 5000 e 7500 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L.

# 4.4 CLASSIFICAÇÃO DO LODO QUANTO À SUA PERICULOSIDADE

A classificação do lodo resultante após o término da sedimentação foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004/2004, conforme discutido no item 3.1.3.

Para tal classificação, e seguindo os critérios estabelecidos na norma, assumiuse que o lodo gerado não apresentava como característica inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade.

A verificação do potencial para a toxicidade, de acordo com o item 4.2.1.4 da norma, foi realizada através da análise do extrato lixiviado do resíduo sólido obtido conforme o procedimento estabelecido pela norma ABNT NBR 10005/2004. Foram analisados os parâmetros inorgânicos (arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, prata e selênio) conforme o Anexo F da norma ABNT NBR 10004/2004. A análise desses parâmetros foi realizada no laboratório Hidroquímica, do grupo Oceanus, localizado na cidade do Rio de Janeiro.

Esse procedimento possibilitou classificar o resíduo entre perigoso (classe I) e não perigoso (classe II).

Foram analisados os lodos gerados com óxido de cálcio e cloreto férrico em ambos os lixiviados. Para seleção da concentração utilizada, adotou-se como critério o tratamento que removeu no mínimo 40% da DQO e 50% da cor, com a menor utilização de coagulante.

#### 4.5 METODOLOGIAS ANALÍTICAS

As metodologias usadas na determinação dos parâmetros físico-químicos seguiram os procedimentos indicados pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), de acordo com métodos e equipamentos apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Metodologia de análise dos parâmetros físico-químicos.

Parâmetro	Metodologia (APHA, 2012)	Equipamento
рН	4500 - B	pHmetro microprocessador Quimis
COT	5310 - C	TOC Analyzer-Hipertoc 1000
DQO	5220 - D	Espectrofotômetro DR2800 e reactor Hach
Condutividade	2510 - B	Condutivímetro MS Tecnopon
Cor	2120 - C	Espectrofotômetro DR2800
Abs 254 nm	5910 - B	Espectrofotômetro Shimadzu

# **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussão dos experimentos realizados durante a pesquisa.

# 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LIXIVIADOS BRUTOS

Os resultados das caracterizações dos parâmetros físico-químicos das amostras do lixiviado de Seropédica estão apresentados na Tabela 16, juntamente com os resultados obtidos por outros autores.

Tabela 16 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado do aterro de Seropédica.

Parâmetro	Unidade	Amostra 1 (Maio/2017)	Amostra 2 (Dezembro/2017)	Silva (2017)	Almeida (2016)
рН		8,45	8,43	8,04	7,84
Condutividade	mS/cm	32,17	27,02	18,98	17,51
Abs 254 nm		31,88	39,8	24,48	26,65
DQO	mg/L	5043	5203	4235	4137
Cor Verdadeira	mg/L	5952,5	5669	4573	-
СОТ	mg/L	1204,4	1188	732	2154

Os resultados da caracterização demonstram que o valor do pH encontra-se levemente alcalino, característica dos lixiviados na fase metanogênica. Além disso, apresenta características de um lixiviado estabilizado e de elevada concentração de matéria orgânica (elevada concentração de DQO e COT).

Caracterizando o lixiviado de Seropédica, Carvalho (2015) encontrou uma DQO média de 7997 mg/L, Lima (2017) obteve 3633 mg/L e Almeida (2016) 4137 mg/L. Para COT, Silva (2017) obteve 732 mg/L enquanto Almeida (2016) reportou 2154 mg/L. O alto valor obtido para cor verdadeira indica uma grande quantidade de material dissolvido, valor bem próximo ao encontrado por Lima (2017) (5211 mg/L). O valor elevado de absorbância 254 nm indica a presença de matéria orgânica dissolvida, fato também observado por Almeida (2016) (abs 254 = 26,65). O valor de

condutividade encontrado também foi elevado. A condutividade elétrica indica a capacidade do efluente em transmitir a corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions (BRASIL, 2006).

Em geral, os resultados de caracterização são bem parecidos com os encontrados por Silva (2017) (pH = 8,04; DQO = 4235 mg/L; cor = 4573 mg/L) e comprovam a elevada concentração de matéria orgânica e o alto potencial poluidor desse lixiviado.

A Tabela 17 apresenta os resultados das caracterizações das amostras do lixiviado de Gericinó, juntamente com os resultados encontrados por outros autores.

Parâmetro	Unidade	Amostra 1 (Maio/2017)	Amostra 2 (Fevereiro/2018)	Costa (2016)	Lima (2017)	Maia (2012)
рН		8,21	7,91	8,0	8,0	8,36
Condutividade	mS/cm	12,42	10,53	-	-	-
Abs 254 nm		16,58	13,21	10,5	12,75	11,4
DQO	mg/L	2060	1510	1511	1889	1863
Cor Verdadeira	mg/L	3473	2536	-	5319	-
сот	mg/L	726	622	554	727	616,4

Tabela 17 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado do aterro de Gericinó.

Os resultados de caracterização do lixiviado do aterro de Gericinó demonstram valores menores em todos os parâmetros em comparação ao lixiviado do aterro de Seropédica. O pH encontra-se na faixa básica, o que está de acordo com as características do aterro em questão. O teor de matéria orgânica, apesar de menor que o valor encontrado no lixiviado de Seropédica, demonstra valores elevados.

Em geral, os valores obtidos foram muito próximos aos encontrados por Lima (2015) ao caracterizar o lixiviado de Gericinó em sua pesquisa (pH = 8,15; abs 254 nm = 12,44; DQO = 1916 mg/L e COT = 552 mg/L).

Os resultados demonstram um lixiviado com um potencial poluidor menor que o lixiviado de Seropédica, o que está de acordo com o tipo de resíduo que este aterro recebeu nos últimos anos (resíduos de construção civil).

Para ambos os lixiviados, não se observou diferença relevante nos parâmetros avaliados em função da época da coleta do lixiviado.

# 5.2 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COM ÓXIDO DE CÁLCIO

Nos ensaios de coagulação utilizando óxido de cálcio, as concentrações de coagulante utilizadas foram de 6, 8, 10, 12, 16 e 20 g CaO/L para o lixiviado de Gericinó, e 8, 10, 12, 16, 20 e 24 g CaO/L para o lixiviado de Seropédica. As Figuras 23 a 26 mostram os resultados obtidos para DQO, COT, cor verdadeira e ABS.

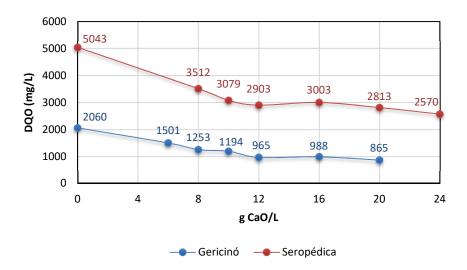


Figura 23 - Resultados de DQO em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

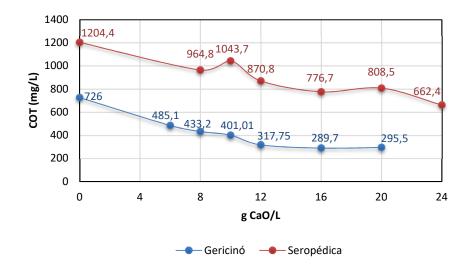


Figura 24 - Resultados de COT em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

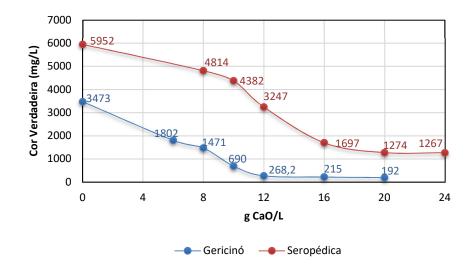


Figura 25 - Resultados de cor verdadeira em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

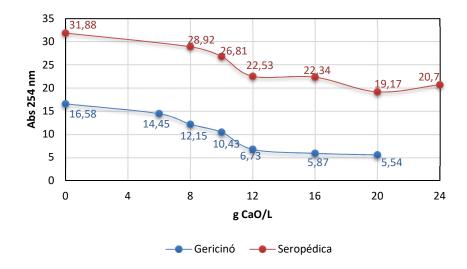


Figura 26 – Resultados de ABS em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

Devido a estarem todos relacionados ao teor de matéria orgânica do meio, observa-se uma semelhança no comportamento dos parâmetros DQO, COT, cor e ABS, à medida que se aumenta a concentração de coagulante. Há uma redução significativa dos parâmetros analisados até determinada concentração de cal. Depois, observa-se uma redução pequena ou até mesmo uma estabilização dos valores, mesmo com o aumento da concentração do coagulante. No lixiviado do aterro de Seropédica esse valor corresponde a 16 g CaO/L e no lixiviado de Gericinó a 12 g CaO/L. Para essas respectivas concentrações, obteve-se uma redução de 40,5% de DQO; 35,5% de COT; 71,5% de cor e 29,9% de ABS para o lixiviado de Seropédica,

e 53,1% de DQO; 56,2% de COT; 92,3% de cor e 59,4% de ABS para o lixiviado de Gericinó.

Renou e colaboradores (2008b) utilizaram a cal como coagulante para um prétratamento de três diferentes lixiviados (DQO inicial na ordem de 1500 mg/L) antes da utilização de osmose inversa. Utilizaram a redução de condutividade obtida como critério para escolha da dosagem de coagulante. Como resultado obtiveram as concentrações ótimas de coagulante iguais a 2; 4 e 6 g CaO/L para cada um dos lixiviados estudados e remoções de DQO de 18; 25,5 e 0,4% respectivamente.

Almeida (2016) ao estudar o processo de coagulação com cal no lixiviado de Seropédica (DQO inicial = 4137 mg/L), avaliou as concentrações de 2 a 10 g CaO/L. Verificou que 10 g CaO/L foi a concentração ótima deste coagulante, tendo sido capaz de remover 33% de DQO, 54% de COT, 32% de condutividade e 29% de ABS.

A Figura 27 mostra os resultados obtidos para o parâmetro de condutividade.

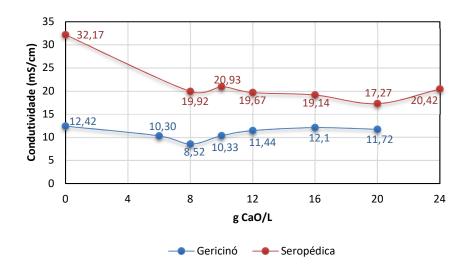
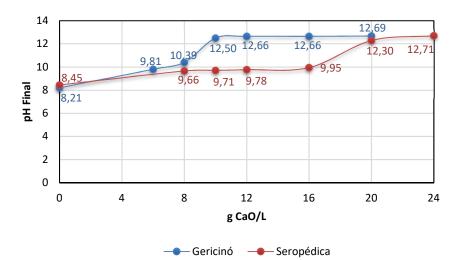


Figura 27 – Resultados de condutividade em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

A diminuição da condutividade do lixiviado com a adição de cal é explicada pela precipitação dos íons carbonatos, até se atingir um valor limite, conforme discutido no item 3.4.2. O menor valor de condutividade observado para o lixiviado de Seropédica foi 17,27 mS/cm (46,3% de diminuição) para a concentração de 20 g CaO/L e para o lixiviado de Gericinó 8,52 mS/cm (31,4% de diminuição) para a concentração de 8 g CaO/L.



A Figura 28 apresenta os resultados do pH do lixiviado ao final do tratamento.

Figura 28 – Resultados de pH em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

Observa-se uma estabilização do pH em torno de 12. No lixiviado de Gericinó, esse patamar é alcançado na concentração de 10 g CaO/L, e para o lixiviado de Seropédica em 20 g CaO/L. Mesmo com o aumento da concentração de coagulante, a partir desses pontos, não se observa a elevação do pH. Esse resultado condiz com o tratamento realizado no aterro de Seropédica. A quantidade de coagulante a ser adicionada no tratamento é determinada pelo monitoramento do valor do pH medido do lixiviado drenado das lagoas de equalização para que se atinja um valor de 12,3, de acordo com os relatórios de monitoramento da ETC gerados pela empresa responsável pelo aterro, a CICLUS ambiental (CICLUS, 2018).

As Figuras 29 a 31 mostram os resultados de volume, umidade e sólidos voláteis dos lodos obtidos após cada tratamento.

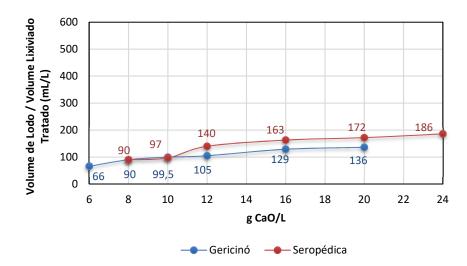


Figura 29 - Resultados do volume de lodo gerado por volume de lixiviado em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

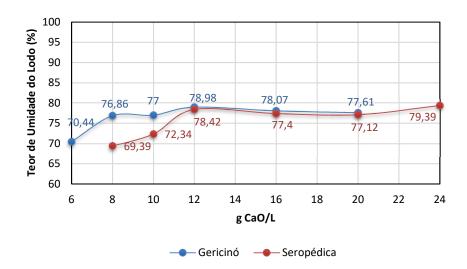


Figura 30 - Resultados do teor de umidade do lodo em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

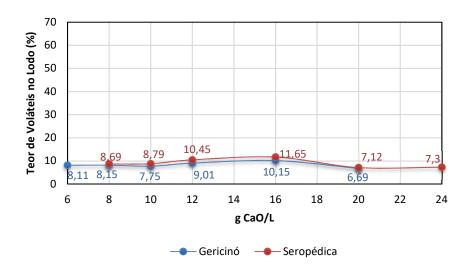


Figura 31 - Resultados do teor de voláteis no lodo em função da concentração de CaO. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min.

Em relação à formação de lodo, observa-se um aumento da quantidade de lodo gerado com o aumento da concentração do coagulante utilizado. Nas máximas concentrações estudadas, obtiveram-se 186 mL de lodo/L de efluente tratado no lixiviado de Seropédica e 136 mL de lodo/L de efluente tratado no lixiviado de Gericinó.

O teor de umidade do lodo ficou na faixa de 70 a 80% em ambos os lixiviados e para as diferentes concentrações. O teor de material volátil no lodo variou na faixa de 7 a 11%. Não se observou uma diferenciação desses teores nos lodos formados nos diferentes lixiviados e nem uma dependência do parâmetro medido com a concentração de coagulante utilizado.

Em seus estudos, Renou e colaboradores (2008b) observaram uma formação de lodo bem menor que a do presente trabalho (entre 8,5 e 15,3 g lodo/L de lixiviado). Porém, além das concentrações de coagulante estudadas pelos pesquisadores franceses serem inferiores (2 a 6 g CaO/L), os lixiviados estudados por eles possuíam uma concentração de matéria orgânica também inferior, o que pode explicar a diferença observada. Ainda na pesquisa francesa, os pesquisadores reportaram um teor de umidade do lodo entre 49 e 53%.

O resultado obtido de volume de lodo gerado está bem próximo do que é observado no aterro de Seropédica. Em média, são produzidos no aterro 24.000 m³ de lixiviado/mês e são gerados 838 m³ de lodo seco/mês (ELIAS, 2018). Com isso, obtém-se uma média de 34,91 mL de lodo seco/L de lixiviado tratado no aterro de Seropédica. Utilizando os dados de geração de lodo obtidos no presente trabalho

(Figura 29) com o porcentual de umidade do lodo (Figura 30), foram obtidos os valores de volume de lodo seco por unidade de volume de lixiviado tratado. Os dados estão retratados na Figura 32 e comprovam a proximidade dos valores obtidos experimentalmente com os valores observados na operação do aterro de Seropédica.

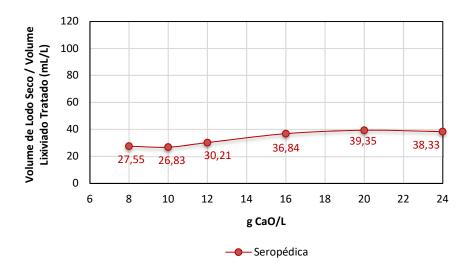


Figura 32 - Volume de lodo seco gerado por volume de lixiviado tratado. Valores obtidos através dos dados de volume de lodo gerado e umidade do lodo.

Considerando a densidade desse lodo igual a 1200 kg/m³ (ELIAS, 2018), podemos obter a relação de massa de lodo seco por volume de lixiviado tratado. Os dados estão apresentados na Figura 33.

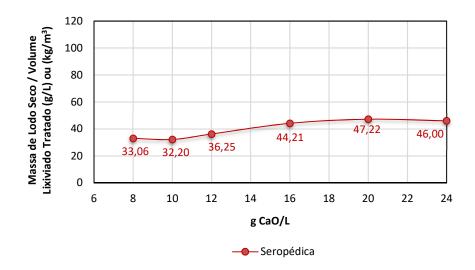


Figura 33 - Massa de lodo seco gerado por volume de lixiviado tratado. Valores obtidos através dos dados de volume de lodo seco gerado e densidade do lodo.

Linearizando o gráfico da Figura 33, obtém-se uma relação matemática (equação 16), pela qual é possível estimar a massa de lodo seco que será gerado por unidade de volume de lixiviado tratado para determinada concentração de cal utilizada. O resultado está representado na Figura 34.

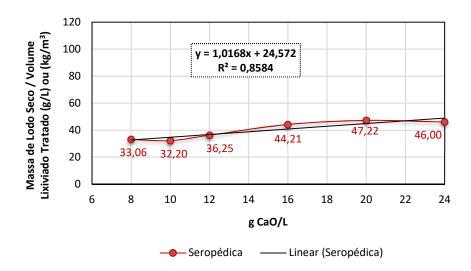


Figura 34 - Linearização da Relação Massa de Iodo seco/Volume de lixiviado tratado em função da concentração de CaO.

$$Y = 1,0168X + 24,572 \tag{16}$$

Conforme já apresentado ao longo deste tópico, no aterro de Seropédica são gerados, em média, 34,91 mL de lodo seco/L de lixiviado tratado, o que corresponde a 41,89 g de lodo seco/L de lixiviado tratado. Como não se sabe a concentração de coagulante utilizada para tratamento no aterro (quantidade de cal adicionada é monitorada somente pelo valor do pH), podemos utilizar a relação de linearização encontrada para estimar a concentração de cal utilizada.

Esse resultado está muito próximo ao encontrado no trabalho como sendo a concentração de cal ideal para tratamento do lixiviado do aterro de Seropédica.

Ainda sobre a geração de lodo no aterro de Seropédica, tem-se que são produzidos em média 800 m³ de lixiviado/dia. Com a relação 41,89 g de lodo seco/L de lixiviado, tem-se uma média de 33.512 kg de lodo seco/dia, os quais são enviados novamente ao aterro. Considerando que o aterro recebe em média 10.000 toneladas de rejeitos/dia (item 3.2.2), o valor de lodo que é enviado ao aterro corresponde a cerca de 0,34% do total de rejeitos. Grande parte desse lodo, cerca de 90%, é composto de material inorgânico (não-volátil), conforme pode se observar nos dados da Figura 31.

## 5.3 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COM CLORETO FÉRRICO

### 5.3.1 Otimização do pH

Os resultados dos ensaios com o coagulante cloreto férrico na primeira etapa, na qual se manteve a concentração de coagulante constante (4000 mg FeCl<sub>3</sub>/L) e variou-se o pH (4, 5, 6 e natural), estão apresentados nas Tabelas 18 e 19, para os lixiviados de Gericinó e Seropédica, respectivamente.

Tabela 18 - Resultados da etapa de otimização do pH com FeCl3, a concentração constante, no lixiviado do aterro de Gericinó.

Conc. (mg/L)	pH Inicial	pH Final	Volume Lodo / Volume de Efluente (mL/L)	Abs 254 nm	DQO (mg/L)	Cor Verdadeira (mg/L)	COT (mg/L)	Umidade (%)	Voláteis (%)
Bruto	8,21	-	-	16,58	2060	3473	726	-	-
4000	4,0	2,23	196	14,8	1087	1740	309	97,49	59,31
4000	5,0	2,25	192	15,1	987	1433	282	97,28	58,10
4000	6,0	2,50	272	13,1	766	1050	228	97,47	50,31
4000	8,21	6,12	242	17,2	1300	471	322	98,14	37,38

Tabela 19 - Resultados da etapa de otimização do pH com FeCl <sub>3</sub> , a concentração constante, no lixiviado
do aterro de Seropédica.

Conc. (mg/L)	pH Inicial	pH Final	Volume Lodo / Volume de Efluente (mL/L)	Abs 254 nm	DQO (mg/L)	Cor Verdadeira (mg/L)	COT (mg/L)	Umidade (%)	Voláteis (%)
Bruto	8,45	-	-	31,88	5043	5953	1204	-	-
4000	4,0	2,19	430	27,2	2115	2335	1012	96,28	47,89
4000	5,0	2,31	480	27	1951	2200	767	96,36	50,53
4000	6,0	2,59	420	22,13	1857	1824	714	94,18	42,24
4000	8,45	8,2	420	20,9	3380	2144	959	98,96	57,53

Em ambos os lixiviados, observa-se em pH 6,0 os melhores resultados para remoção dos parâmetros analisados. No lixiviado de Gericinó, o ensaio com pH 6,0 obteve 62,8% de remoção da DQO; 68,6% de COT; 69,7% de cor; 20,9% de ABS e formação de 272 mL de lodo/L de lixiviado. Para o lixiviado de Seropédica, com pH 6,0, os valores de remoção foram 63,2% de DQO; 40,7% de COT; 69,3% de cor; 30,6% de ABS e formação de 420 mL de lodo/L de lixiviado.

Silva (2017), na otimização do pH no tratamento do lixiviado de Seropédica (DQO inicial 4235 mg/L) utilizando 1453 mg FeCl<sub>3</sub>/L obteve pH ótimo 5,0, com 5,3% de remoção da DQO, 50% de COT, 15% de ABS, e 31 % de cor. Não houve uma redução significativa de DQO com esta concentração, e alguns valores ficaram até mais altos quando comparados ao lixiviado bruto. Castrillón e colaboradores (2010) também obtiveram pH ótimo 5,0 em pesquisa no lixiviado de Asturias, Espanha, alcançando remoções de DQO de até 70%

#### 5.3.2 Ensaios com o pH ótimo

Na segunda etapa, variou-se a concentração do coagulante, mantendo fixo o pH ótimo (pH 6,0) obtido na primeira etapa. Os resultados estão ilustrados nas Figuras 35 a 41. As concentrações de coagulante utilizadas foram 3000, 4000, 5000 e 5500 mg FeCl<sub>3</sub>/L para ambos os lixiviados.

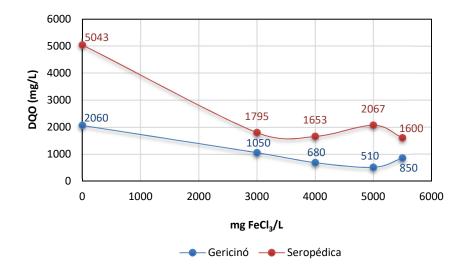


Figura 35- Resultados de DQO em função da concentração de FeCl<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

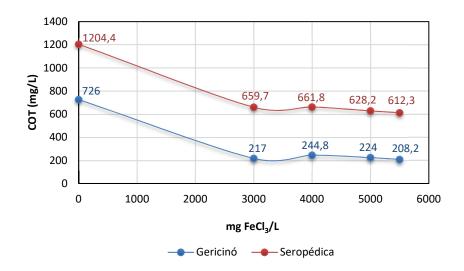


Figura 36 - Resultados de COT em função da concentração de FeCl₃. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

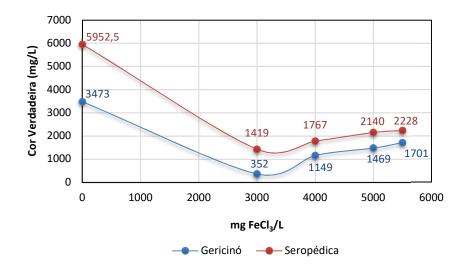


Figura 37 - Resultados de cor verdadeira em função da concentração de FeCl<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

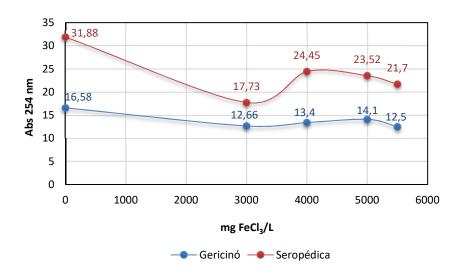


Figura 38 - Resultados de ABS em função da concentração de FeCl<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

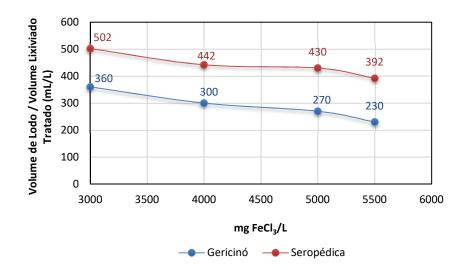


Figura 39 - Resultados do volume de lodo gerado por volume de lixiviado em função da concentração de FeCl<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

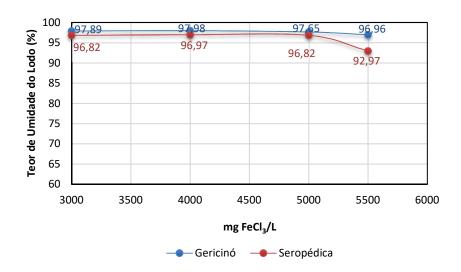


Figura 40 - Resultados do teor de umidade do lodo em função da concentração de FeCl<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

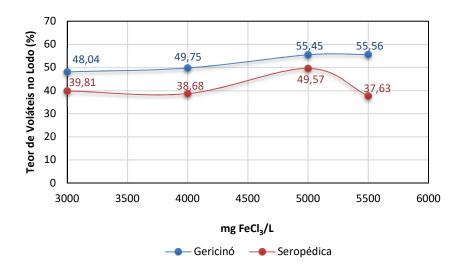


Figura 41 - Resultados do teor de voláteis no lodo em função da concentração de FeCl<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 RPM; Mistura lenta: 20 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0

Observa-se uma redução significativa nos parâmetros DQO, COT, cor e ABS já com a menor concentração de coagulante estudada (3000 mg FeCl<sub>3</sub>/L), em ambos os lixiviados. Com o aumento da concentração de coagulante utilizado, não se percebe uma redução significativa dos parâmetros monitorados, e em parte deles, observa-se até um aumento dos valores. Para a concentração de 3000 mg FeCl<sub>3</sub>/L, no lixiviado de Seropédica as remoções alcançadas foram da ordem de 64% de DQO; 45% de COT; 76% de cor; 44% de ABS e geração de 502 mL lodo/L lixiviado. Para o lixiviado de Gericinó, com 3000 mg FeCl<sub>3</sub>/L, as remoções foram da ordem de 49% de DQO; 70% de COT; 90% de cor; 24% de ABS e geração de 360 mL lodo/L lixiviado.

Nos ensaios de cor e ABS observa-se um aumento dos valores dos parâmetros monitorados a partir do aumento da concentração 3000 mg FeCl<sub>3</sub>/L. A explicação para tal fato pode estar na formação de hidróxidos no meio reacional, devido ao mecanismo de coagulação ocorrido. Segundo Di Bernardo (1993), no mecanismo de varredura, de acordo com a quantidade de coagulante, o pH do efluente e a concentração de íons presentes, poderá ocorrer a formação de precipitado como Al(OH)<sub>3</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub>, ou outros, dependendo do coagulante empregado. Stumm e O'Melia (1968) estudaram a relação entre a dosagem de coagulante (sais de ferro e alumínio) e a turbidez do meio, em pH constante, e reportaram que há uma concentração ótima de coagulante para se promover a remoção da turbidez. A partir desse ponto ideal, o incremento da concentração de coagulante ocasiona um aumento da turbidez do meio. Comportamento semelhante foi observado por Ferreira (2013),

que em seus estudos com o lixiviado de Gericinó, reportou que em alguns ensaios o valor de turbidez após o tratamento ficou acima do valor do lixiviado bruto.

Os lodos gerados nos ensaios com cloreto férrico se apresentaram com umidade elevada, em comparação aos valores obtidos com a cal, (entre 92 e 98%) para ambos os lixiviados. O teor de voláteis variou de 48 a 56% no lixiviado de Gericinó e de 37 a 49% no lixiviado de Seropédica, valores também bem acima dos encontrados nos ensaios com cal. Observou-se uma diminuição no volume de lodo formado com o aumento da concentração de coagulante.

Silva (2009), em estudo com o lixiviado de Gramacho (DQO inicial 3269 mg/L) obteve como condições ótimas, pH 5,0 e concentração de coagulante 5800 mg FeCl<sub>3</sub>/L. Nessas condições alcançou uma remoção de DQO de 78%. Silva (2017), com pH ótimo 5,0 e concentração de 4360 mg FeCl<sub>3</sub>/L, obteve valores de remoção em torno de 17% de DQO; 60% de cor; 37% de ABS e geração de lodo de 132 mL/L. Silva (2017) também observou alguns casos em que o aumento da concentração do coagulante provocou diminuição no volume de lodo gerado.

## 5.4 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COM SULFATO DE ALUMÍNIO

#### 5.4.1 Otimização do pH

Os resultados dos ensaios com o coagulante sulfato de alumínio na primeira etapa, na qual se manteve a concentração de coagulante constante (4000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L) e variou-se o pH (4, 5, 6 e natural), estão apresentados nas Tabela 20 e 21, para os lixiviados de Gericinó e Seropédica, respectivamente.

Tabela 20 - Resultados da etapa de otimização do pH com Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, a concentração constante, no lixiviado do aterro de Gericinó.

Conc. (mg/L)	pH Inicial	pH Final	Volume Lodo / Volume de Efluente (mL/L)	Abs 254 nm	DQO (mg/L)	Cor Verdadeira (mg/L)	COT (mg/L)	Umidade (%)	Voláteis (%)
Bruto	8,21	-	-	16,58	2060	3473	726	-	-
4000	4,0	3,47	176	16,26	1597	1002	326	98,14	40,23
4000	5,0	3,86	194	14,85	1427	759	300	97,83	50,39
4000	6,0	4,29	240	12	1117	401	242	97,94	55,15
4000	8,21	6,7	370	13,14	1237	443	291	98,57	32,86

Tabela 21 - Resultados da etapa de otimização do pH com Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, a concentração constante, no lixiviado do aterro de Seropédica.

Conc. (mg/L)	pH Inicial	pH Final	Volume Lodo / Volume de Efluente (mL/L)	Abs 254 nm	DQO (mg/L)	Cor Verdadeira (mg/L)	COT (mg/L)	Umidade (%)	Voláteis (%)
Bruto	8,45	-	-	31,88	5043	5953	1204	-	-
4000	4,0	3,39	240	23,46	3455	1440	1570	96,74	55,64
4000	5,0	3,8	246	20,73	2963	1018	1141	96,86	56,47
4000	6,0	4,84	360	16,73	2673	676	944	96,95	55,81
4000	8,45	7,19	188	25,59	4120	3120	1234	97,11	66,32

Em ambos os lixiviados, observa-se em pH 6,0 os melhores resultados para remoção dos parâmetros analisados. No lixiviado de Gericinó, o ensaio com pH 6,0 obteve 45,8% de remoção da DQO; 66,7% de COT; 88,4% de cor; 27,6% de ABS e formação de 240 mL de lodo/L de lixiviado. Para o lixiviado de Seropédica, com pH 6,0, os valores de remoção foram 47,0% de DQO; 21,6% de COT; 88,6% de cor; 47,5% de ABS e formação de 360 mL de lodo/L de lixiviado.

Amor e colaboradores (2015), ao utilizarem sulfato de alumínio também reportaram pH ótimo 6,0 e alcançaram uma remoção de DQO da ordem de 40% no tratamento do lixiviado do aterro de Vila Real, em Portugal. Ferreira (2013) e Castrillón e colaboradores (2010) também obtiveram o mesmo pH para otimização de seus tratamentos. O primeiro alcançou remoções de DQO da ordem de 55% no lixiviado do aterro de Gramacho, enquanto os outros obtiveram remoções da ordem de 60% no lixiviado do aterro de Asturias, na Espanha.

#### 5.4.2 Ensaios com o pH ótimo

Na segunda etapa, variou-se a concentração do coagulante, mantendo fixo o pH ótimo (pH 6,0) obtido na primeira etapa. Os resultados estão ilustrados nas Figuras 42 a 48. As concentrações de coagulante utilizadas foram 3000, 4000, 5000 e 7500 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L para ambos os lixiviados.

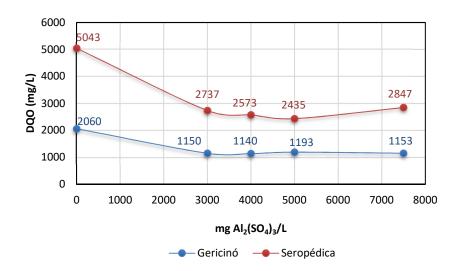


Figura 42 - Resultados de DQO em função da concentração de Al₂(SO₄)₃. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

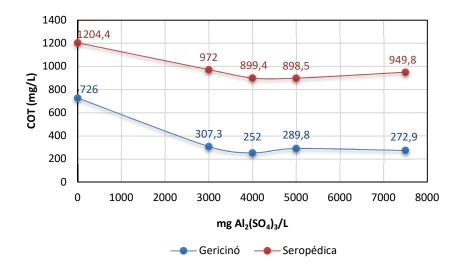


Figura 43 - Resultados de COT em função da concentração de Al₂(SO₄)₃. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

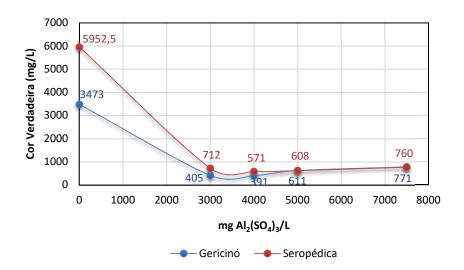


Figura 44 - Resultados de cor verdadeira em função da concentração de Al₂(SO₄)₃. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

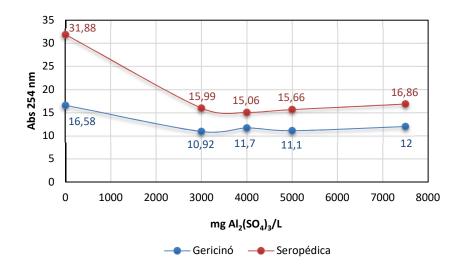


Figura 45 - Resultados de ABS em função da concentração de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

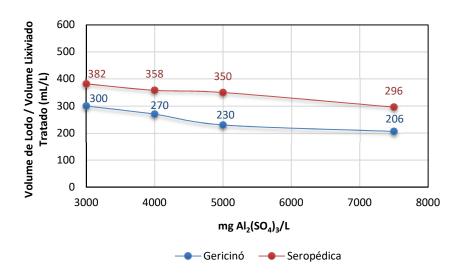


Figura 46 - Resultados do volume de lodo gerado por volume de lixiviado em função da concentração de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

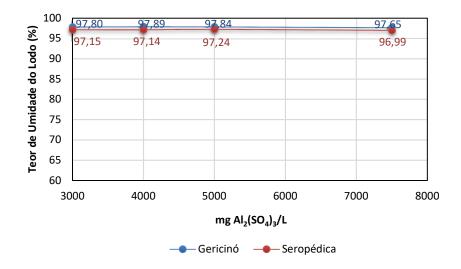


Figura 47 - Resultados do teor de umidade do lodo em função da concentração de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 rpm; Mistura lenta: 20 min, 30 rpm e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0.

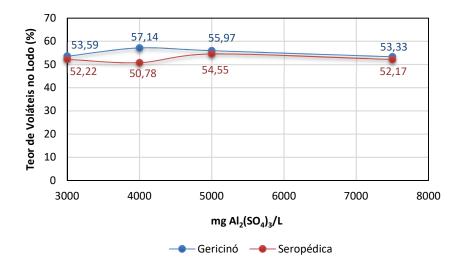


Figura 48 - Resultados do teor de voláteis no lodo em função da concentração de Al₂(SO₄)₃. Condições de ensaio: Mistura rápida: 1 min, 150 RPM; Mistura lenta: 20 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 120 min. pH: 6,0

Comportamento semelhante ao observado nos ensaios com o cloreto férrico foi observado nos testes com sulfato de alumínio. Houve uma redução significativa nos parâmetros DQO, COT, cor e ABS com a menor concentração de coagulante estudada (3000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L), em ambos os lixiviados. Com o aumento da concentração de coagulante utilizado, observa-se uma redução leve, estabilização ou até aumento dos valores dos parâmetros monitorados. Para a concentração de 3000

mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L, no lixiviado de Seropédica as remoções alcançadas foram da ordem de 45% de DQO; 20% de COT; 88% de cor; 50% de ABS e geração de 382 mL lodo/L lixiviado. Para o lixiviado de Gericinó, com 3000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L, as remoções foram da ordem de 44% de DQO; 57% de COT; 88% de cor; 34% de ABS e geração de 300 mL lodo/L lixiviado. À exemplo do que ocorreu nos ensaios com cloreto férrico, nos experimentos com sulfato de alumínio, também se observou um aumento dos valores de cor e ABS à medida que se aumentou a concentração do coagulante utilizado.

Os lodos gerados nos ensaios com sulfato de alumínio apresentaram valores de umidade próximos aos valores obtidos nos ensaios com cloreto férrico, (em torno de 97%) para ambos os lixiviados. O teor de voláteis variou de 53 a 57% no lixiviado de Gericinó e de 50 a 55% no lixiviado de Seropédica, valores levemente acima dos encontrados nos ensaios com cloreto férrico. À exemplo do ocorrido nos ensaios com cloreto férrico, também se observou uma diminuição no volume de lodo formado com o aumento da concentração de coagulante.

Máximo (2007), em estudo com o lixiviado de Biguaçu/SC (DQO inicial 3079 mg/L) obteve como condições ótimas, pH 7,0 e concentração de coagulante 1500 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L. Nessas condições alcançou uma remoção de 28% da DQO; 56% da COT e 42% da cor. Silva (2017), com pH ótimo igual a 4,0 e concentração de 19000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L, obteve valores de remoção em torno de 48% de DQO; 60% de cor; 42% de ABS. Castrillón e colaboradores (2010) reportaram resultados bem próximos ao encontrados no presente trabalho para coagulação com sulfato de alumínio. As condições ótimas para o tratamento do lixiviado espanhol, com características próximas aos lixiviados do presente estudo (pH 8,5 e DQO inicial 3650 mg/L), foram pH 6,0 e concentração de coagulante 3200 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L, alcançando remoções de 60% da DQO e 95% da cor.

## 5.5 RESUMO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este tópico apresenta um resumo e comparação do desempenho dos três coagulantes utilizados no trabalho, para as diferentes concentrações estudadas. Para os coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio, são mostrados os resultados obtidos com pH ótimo.

A Figura 49 mostra o comparativo dos resultados dos três coagulantes na remoção da DQO em função do volume de lodo gerado.

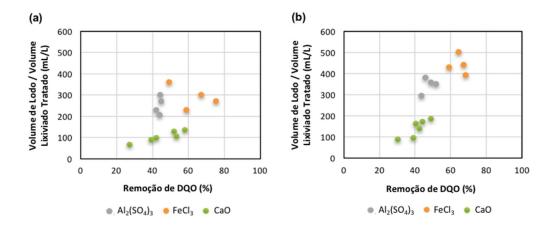


Figura 49 – Remoção de DQO em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e FeCl<sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó (b) Seropédica.

Observa-se uma maior remoção da DQO quando utilizado o cloreto férrico, em ambos os lixiviados. Porém, foi também o coagulante que apresentou a maior geração de lodo, principalmente no lixiviado de Seropédica. No lixiviado de Gericinó, a formação de lodo utilizando FeCl<sub>3</sub> ficou próxima à dos ensaios com Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Para remoções na faixa de 40 a 60% de DQO, a cal se mostrou eficiente e com menor geração de lodo entre os três coagulantes. Somente ensaios com cloreto férrico alcançaram remoções acima de 60%. A maior remoção de DQO reportada no lixiviado de Gericinó foi 75,2%, com formação de 270 mL lodo/L lixiviado para a concentração de 5000 mg FeCl<sub>3</sub>/L. Para o lixiviado de Seropédica, a maior remoção foi de 68,3% para a concentração de 5500 mg FeCl<sub>3</sub>/L e formação de 392 mL lodo/L lixiviado.

A Figura 50 apresenta o comparativo da remoção de COT em função do volume de lodo gerado.

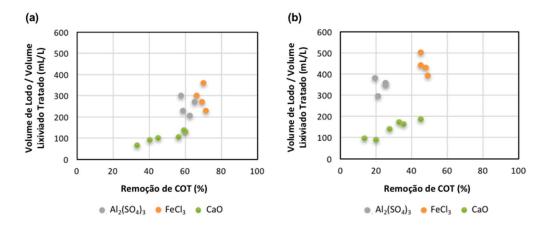


Figura 50 - Remoção de COT em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e FeCl<sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica.

Na avaliação de remoção de COT, situação semelhante à observada nos resultados de DQO. O coagulante cloreto férrico alcançou os maiores porcentuais de remoção, porém com maior formação de lodo. No lixiviado de Gericinó, remoções na faixa de 50 a 60% foram alcançadas com a cal, gerando menor quantidade de lodo que os outros coagulantes. Remoções acima de 70% só foram alcançadas com o FeCl<sub>3</sub>. A maior remoção obtida foi 71,3% para a concentração de 5500 mg FeCl<sub>3</sub>/L e geração de 230 mL lodo/L lixiviado. No lixiviado de Seropédica, os porcentuais de remoção alcançados foram menores. Na faixa de 20 a 40%, a cal se mostrou eficiente e com menor geração de lodo. Remoções acima de 40% foram obtidas em todas as concentrações de ferro estudadas e na maior concentração de cal (24 g CaO/L). A maior remoção reportada com o cloreto férrico foi de 49,2% utilizando 5500 mg FeCl<sub>3</sub>/L e geração de 392 mL lodo/L lixiviado e para a cal foi de 45% gerando 186 mL lodo/L lixiviado.

Segundo Amokrane e colaboradores (1997), geralmente o percentual de remoção de DQO e COT obtidos pela coagulação/floculação está entre 10 e 25% com lixiviados de aterros jovens, mas é maior (50 a 65%) com lixiviados de baixa biodegradabilidade (lixiviados estabilizados ou pré-tratados por processos biológicos).

A Figura 51 apresenta a comparação da remoção da cor verdadeira, em função do volume de lodo gerado.

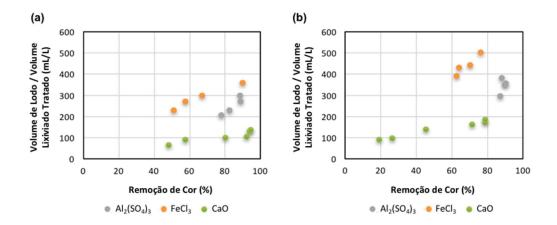


Figura 51 - Remoção de cor em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al₂(SO₄)₃ e FeCl₃ pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica.

Os porcentuais de remoção de cor foram elevados em ambos os lixiviados. No lixiviado de Gericinó, a cal reportou os melhores resultados de remoção e com menor geração de lodo, entre os três coagulantes. O melhor resultado obtido foi de 94,4% de remoção, com geração de 136 mL/L, ao se utilizar 20 g CaO/L. O sulfato de alumínio, em relação ao cloreto férrico, apresentou maiores porcentuais de remoção para a mesma faixa de volume de lodo gerado. Já no lixiviado de Seropédica, o sulfato de alumínio apresentou os maiores porcentuais de remoção de cor, com geração de lodo menor que as dos experimentos com cloreto férrico. A maior remoção obtida foi de 90,4% com geração de 358 mL de lodo/L de lixiviado, utilizando 4000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L. Somente este coagulante alcançou remoções acima de 80%. Na faixa de 60 a 80% de remoção, a cal se mostrou eficiente, com menor geração de lodo.

A Figura 52 apresenta o comparativo da remoção de ABS em função do volume de lodo gerado.

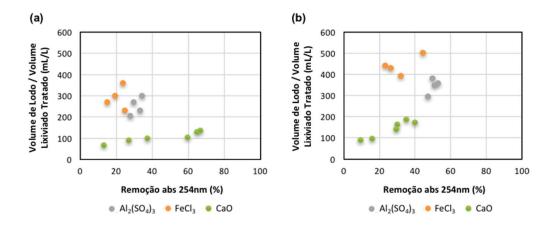


Figura 52 - Remoção de ABS em função do volume de lodo gerado, para as diferentes concentrações de coagulante (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e FeCl<sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica.

Em relação à remoção de ABS, no lixiviado de Gericinó, destaque novamente para os ensaios com a cal, que apresentaram maiores porcentuais de remoção, com os menores volume de lodo gerado. Somente este coagulante alcançou remoções acima de 40%, chegando a 66,5%, e geração de 136 mL de lodo/L lixiviado, na máxima concentração estudada (20 g CaO/L). Já no lixiviado de Seropédica, os ensaios com sulfato de alumínio reportaram os maiores porcentuais de remoção de ABS, porém com maior formação de lodo do que os ensaios com cal. O maior porcentual alcançado foi de 52,8% de remoção, com geração de 358 mL lodo/L de lixiviado com 4000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L. Na faixa de 30 a 40% de remoção, a cal se mostrou eficiente, com menor geração de lodo. Com esse coagulante, obteve-se uma remoção máxima de 39,9%, formação de 172mL de lodo/L lixiviado, ao se utilizar 20 g CaO/L.

Em geral, observa-se uma menor geração de lodo ao se utilizar a cal, para ambos os lixiviados. Observa-se também maior geração de lodo no lixiviado de Seropédica, em comparação ao lixiviado de Gericinó, para os três coagulantes. Fato esse, que pode ser explicada devido à maior concentração de matéria orgânica e poluentes em geral, no lixiviado de Seropédica, comparado ao lixiviado oriundo do aterro de Gericinó.

Nos resultados reportados com a cal percebe-se uma tendência de linearidade na relação entre o volume de lodo gerado e o porcentual de remoção dos poluentes, o que não acontece com os outros coagulantes. Essa relação também é diretamente proporcional à concentração de cal utilizada. Ou seja, para a cal, em geral, observase que à medida que se aumenta a concentração de coagulante utilizado, aumenta a remoção dos parâmetros monitorados e aumenta o volume de lodo gerado. Dessa

forma, a partir dos resultados anteriores (Figuras 49 a 52) fez-se a linearização dos gráficos para se obter as relações matemáticas entre a remoção do poluente e o volume de lodo gerado, para concentrações crescentes de cal. Os resultados estão demonstrados nas Figuras 53 e 54, para os lixiviados de Gericinó e Seropédica, respectivamente.

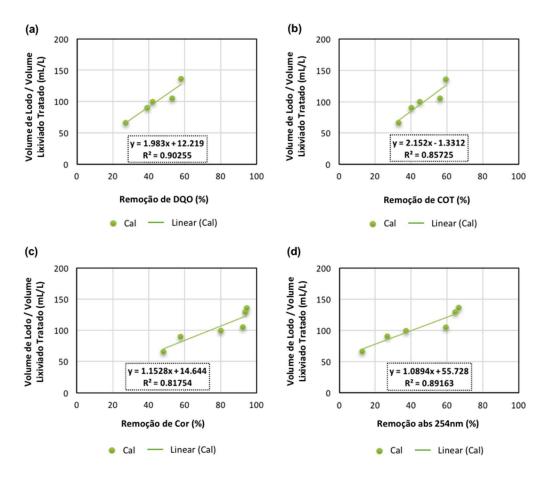


Figura 53 - Relação entre volume de lodo gerado e remoção do poluente, para concentrações crescentes de cal, no lixiviado de Gericinó. (a) DQO; (b) COT; (c) cor verdadeira; (d) ABS.

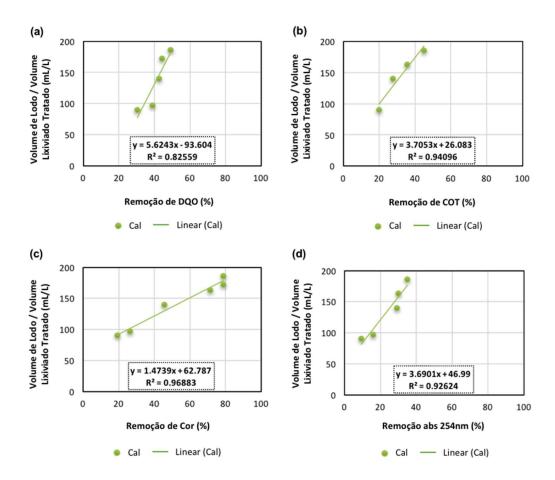


Figura 54 - Relação entre volume de lodo gerado e remoção do poluente, para concentrações crescentes de cal, no lixiviado de Seropédica. (a) DQO; (b) COT; (c) cor verdadeira; (d) ABS.

Com os resultados exibidos na Figura 29 (volume de lodo gerado em função da concentração de cal utilizada) obtém-se a relação matemática entre essas duas variáveis (Figura 55), e, juntamente com as relações exibidas nas Figuras 53 e 54 pode-se então, correlacionar a concentração de cal utilizada, o volume de lodo gerado e a esperada remoção do poluente.

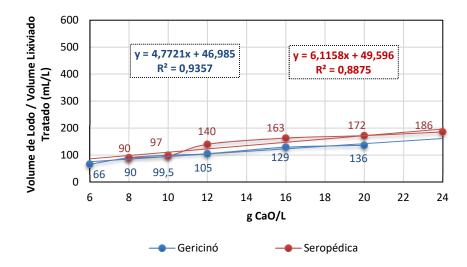


Figura 55 - Relação entre volume de lodo gerado e concentração de cal utilizada, nos lixiviados de Gericinó e Seropédica.

As equações (17) e (18) mostram a relação entre o volume de lodo gerado e a concentração de cal utilizada para os lixiviados de Gericinó e Seropédica, respectivamente.

$$Y (mL/L) = 4,7721X (g CaO/L) + 46,985$$
 (17)

$$Y (mL/L) = 6,1158X (g CaO/L) + 49,596$$
 (18)

Com as relações (17) e (18) juntamente com as relações mostradas nas Figuras 53 e 54 é possível, por exemplo, fazer uma previsão da concentração de cal necessária para se atingir determinada remoção de poluente, e saber a quantidade de lodo que será gerada para esse tratamento.

Em relação ao teor de umidade e de sólidos voláteis nos lodos gerados, as Figuras 56 e 57 mostram a comparação dos resultados obtidos entre os diferentes coagulantes.

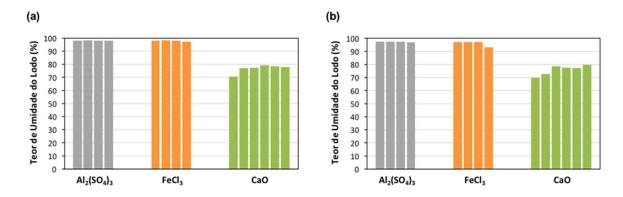


Figura 56 - Teor de umidade no lodo gerado para os diferentes coagulantes, em ordem crescente das concentrações utilizadas (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e FeCl<sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica.

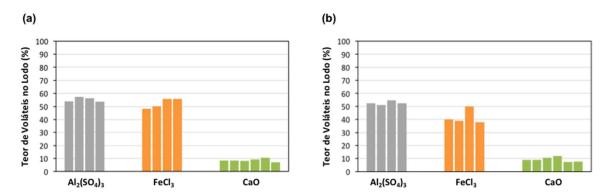


Figura 57 - Teor de sólidos voláteis do lodo gerado para os diferentes coagulantes, em ordem crescente das concentrações utilizadas (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e FeCl<sub>3</sub> pH 6,0). (a) Gericinó. (b) Seropédica.

De acordo com os valores reportados, observa-se que os teores de umidade e de sólidos voláteis nos lodos gerados dependem basicamente do tipo do coagulante utilizado. Os lodos formados com a utilização do cloreto férrico e sulfato de alumínio apresentaram valores de umidade e de sólidos voláteis bem superiores aos encontrados nos lodos formados com a cal. Os lodos gerados pelo mesmo coagulante apresentaram valores praticamente iguais, entre os diferentes lixiviados, tanto para a umidade quanto para o teor de voláteis.

Weiner e Matthews (2003), no livro *Environmental Engineering*, discutem a respeito da geração de lodos em tratamento de efluentes em geral. Segundo os autores, a maioria dos projetos de plantas de tratamento de efluentes não recebem a devida atenção ao tratamento e descarte do lodo gerado. Os autores afirmam que é importante conhecer as características do lodo para saber como tratá-lo e para onde descartá-lo. Para fins ilustrativos, eles fornecem alguns valores típicos de lodos gerados por determinadas fontes, mas alertam que cada caso deve ser estudado

específica e individualmente. A Tabela 22 apresenta esses valores, juntamente com os valores obtidos nos experimentos realizados na presente pesquisa, para efeitos de comparação.

Tabela 22 – Características de lodos gerados em tratamentos de efluentes diversos segundo Weiner e Matthews (2003) e dados obtidos no presente trabalho.

Tipo / Fonte do Lodo	Umidade (%)	Sólidos Voláteis (%)
Alumínio <sup>1</sup>	98	40
Cal <sup>1</sup>	80	18
Alumínio Seropédica <sup>2</sup>	97 - 98%	50 - 55%
Alumínio Gericinó <sup>2</sup>	97 - 98%	53 - 57%
Cal Seropédica²	70 - 80%	7 - 12%
Cal Gericinó <sup>2</sup>	70 - 79%	7 - 10%

<sup>1 -</sup> Valores médios fornecidos por Weiner e Matthews (2003). 2 - Resultados obtidos no presente trabalho.

Pelos valores reportados por Weiner e Matthews (2003), observa-se a tendência de o lodo gerado por tratamentos utilizando coagulantes à base de alumínio apresentaram maior porcentagem de umidade e de sólidos voláteis do que o lodo gerado por tratamentos à base de cal. Esses resultados estão de acordo com os obtidos na pesquisa.

# 5.6 ESCOLHA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO DO LODO

Para determinação das condições operacionais para os ensaios de classificação do lodo, foi estabelecido como critério de seleção para cada coagulante, o tratamento que promoveu a remoção de no mínimo 40% da DQO e 50% da cor, com o mínimo de utilização de coagulante.

A quantidade de coagulante adicionado no processo é um fator muito importante, pois influencia diretamente no custo e na possível toxicidade do efluente

tratado. Dessa forma, o excesso de coagulante pode ser comprometedor ao meio ambiente e à saúde humana (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Diante do critério estabelecido, as condições escolhidas para cada coagulante foram:

- Sulfato de Alumínio pH 6,0 e 3000 mg Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/L, para ambos os lixiviados.
- Cloreto Férrico pH 6,0 e 3000 mg FeCl<sub>3</sub>/L, para ambos os lixiviados.
- Óxido de Cálcio 12 g CaO/L no lixiviado de Gericinó e 16 g CaO/L no lixiviado de Seropédica.

A Tabela 23 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas condições de tratamento escolhidas.

Tabela 23 – Resultado obtidos nas condições operacionais escolhidas para os ensaios de classificação do lodo.

Lixiviado	Coagulante	Volume Lodo / Volume Efluente (mL/L)	Remoção DQO (%)	Remoção Cor (%)	Umidade Lodo (%)	Voláteis Lodo (%)
	Sulfato de Alumínio (3000 mg/L; pH = 6)	300	44,2	88,3	97,80	53,59
Gericinó	Cloreto Férrico (3000 mg/L; pH = 6)	360	49,0	89,9	97,89	48,04
	Óxido de Cálcio (12 g/L)	105	53,1	92,3	78,98	9,01
	Sulfato de Alumínio (3000 mg/L; pH = 6)	382	45,7	88,0	97,15	52,22
Seropédica	Cloreto Férrico (3000 mg/L; pH = 6)	502	64,4	76,2	96,82	39,81
	Óxido de Cálcio (16 g/L)	163	40,5	71,5	77,40	11,65

As Figuras 58 e 59 mostram os resultados obtidos nessas condições em forma gráfica, para os ensaios no lixiviado de Gericinó e Seropédica, respectivamente.

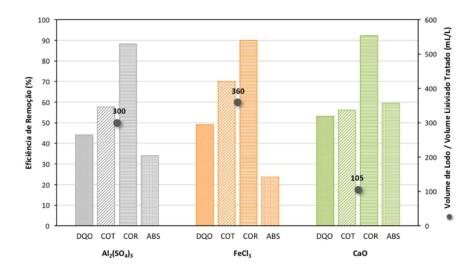


Figura 58 – Resultados obtidos nas condições operacionais escolhidas, no lixiviado de Gericinó. Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L; FeCl<sub>3</sub> pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L; CaO 12 g coagulante/L.

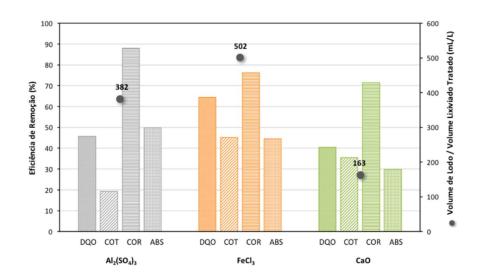


Figura 59 - Resultados obtidos nas condições operacionais escolhidas, no lixiviado de Seropédica. Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L; FeCl<sub>3</sub> pH 6,0 e 3000 mg coagulante/L; CaO 16 g coagulante/L.

Para os ensaios de classificação do lodo, foi selecionado o coagulante CaO (cal), particularmente, por ser o tratamento vigente no lixiviado do aterro de Seropédica. Quanto ao sulfato de alumínio e ao cloreto férrico, que são usados tradicionalmente em tratamento de efluentes em geral, selecionou-se o cloreto férrico, por apresentar desempenho superior e ser relativamente mais barato que o primeiro.

## 5.7 CLASSIFICAÇÃO DOS SÓLIDOS

Os testes de classificação dos sólidos foram realizados com o lodo gerado sob as condições descritas no item 5.6 para os coagulantes óxido de cálcio e cloreto férrico, em ambos os lixiviados.

A Tabela 24 apresenta o resultado das análises dos extratos lixiviados dos lodos gerados, juntamente com a concentração limite permitida pela norma ABNT NBR 10.004/2004.

Os laudos completos das análises, realizadas pelo laboratório Hidroquímica, estão no Anexo I.

Tabela 24 - Resultado da caracterização dos extratos lixiviados dos lodos gerados.

			Limite máximo			
Parâmetros	Unidade	FeCl₃ Gericinó	FeCl₃ Seropédica	CaO Gericinó	CaO Seropédica	ABNT NBR 10004/2004
Arsênio Total	mg/L	0,016588	0,024319	0,000834	0,015796	1,0
Bário Total	mg/L	0,289615	0,178571	0,618365	0,204373	70,0
Cádmio Total	mg/L	<0,000010	<0,000010	<0,000010	<0,000010	0,5
Chumbo Total	mg/L	0,098010	0,018800	0,069295	0,032219	1,0
Cromo Total	mg/L	0,573646	0,080800	0,015004	0,015464	5,0
Mercúrio Total	mg/L	<0,000086	<0,000086	<0,000086	<0,000086	0,1
Prata Total	mg/L	0,004614	<0,000190	0,00236	<0,000190	5,0
Selênio Total	mg/L	0,005223	0,006748	<0,004010	<0,004010	1,0
Ferro Total	mg/L	710,483423	77,5978	-	-	*

<sup>\*</sup> A norma não estabelece limite para Ferro Total.

Segundo critério estabelecido na norma, a amostra que contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores ao limite estabelecido, é considerada como tóxica com base no ensaio de lixiviação, e dessa forma, é classificada como resíduo perigoso.

Conforme observado nos resultados da Tabela 24, nenhum dos contaminantes apresentou concentração acima do limite permitido. Assumindo-se que as amostras não apresentavam as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e

patogenicidade, os lodos gerados foram classificados como resíduos não perigosos (Classe II).

### 6 CONCLUSÕES

Após a realização deste estudo e em função dos resultados encontrados ao longo deste trabalho pode-se concluir que:

Nas condições estudadas, a utilização da cal para o tratamento primário de lixiviado de aterro foi a que apresentou melhor desempenho no que tange à remoção de poluentes e a geração de lodo.

O uso do cloreto férrico promoveu a maior remoção de matéria orgânica (DQO e COT) em ambos os lixiviados. Para o lixiviado de Gericinó, a maior remoção de DQO obtida foi de 75,2% e de COT, 71,3%. No lixiviado de Seropédica, a remoção máxima foi de 68,3% de DQO e 49,2% de COT. Porém, foi o coagulante que gerou maior volume de lodo, chegando a 360 mL lodo/L no lixiviado de Gericinó e 502 mL lodo/L, no lixiviado de Seropédica.

O óxido de cálcio (cal) foi o coagulante que gerou menor quantidade de lodo em ambos os lixiviados. Para todos os parâmetros analisados, há uma faixa de remoção na qual a cal apresenta a melhor relação remoção do poluente/volume de lodo gerado, em ambos os lixiviados. No lixiviado de Gericinó, a coagulação com a cal atingiu remoção máxima de 58% de DQO, com geração de 136 mL de lodo/L lixiviado, e, no lixiviado de Seropédica, alcançou 49%, com geração de 186 mL lodo/L lixiviado.

Os tratamentos no lixiviado de Seropédica geraram uma quantidade maior de lodo do que no lixiviado de Gericinó, para todos os coagulantes analisados.

Em relação ao teor de umidade e a porcentagem de voláteis nos lodos gerados, somente o coagulante utilizado influenciou os resultados. O teor de umidade dos lodos gerados pelo tratamento com cal (entre 70 e 80% de umidade) foi bem menor do que dos lodos gerados pelos tratamentos com cloreto férrico e sulfato de alumínio (média de 96% de umidade).

Da mesma forma, o teor de sólidos voláteis foi bem menor nos lodos gerados pelo tratamento com cal (entre 7 e 10% de voláteis) do que com cloreto férrico e sulfato de alumínio. O teor de voláteis do lodo formado pelo sulfato de alumínio foi um pouco superior (entre 50 e 57%) ao lodo formado pelo cloreto férrico (entre 37 e 55%).

Nas análises de ABS e cor verdadeira percebe-se um aumento dos valores medidos a partir de uma determinada concentração de coagulante para os ensaios cloreto férrico e sulfato de alumínio.

Para os tratamentos com a cal, foi possível estabelecer uma relação entre a remoção desejada de determinado parâmetro e o volume de lodo a ser gerado, dentro da faixa de concentração estudada. Da mesma forma, obteve-se a relação entre a concentração de coagulante utilizado e o volume de lodo formado. Dessa forma, podese relacionar essas três variáveis de acordo com as informações disponíveis (concentração de cal, volume de lodo gerado e remoção do poluente).

O lodo gerado foi classificado como resíduo não perigoso (classe II), em todos os ensaios realizados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <b>NBR 8419:</b> Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7 p.
<b>NBR 10.004:</b> Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
<b>NBR 15.849:</b> Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24 p.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. <b>Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012.</b> São Paulo, 2012.
Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016. São Paulo, 2016.
ALMEIDA, R. <b>Utilização de Nanofiltração e Osmose Inversa no Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário.</b> 2016. 83 f. Projeto de Final de Curso. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de janeiro, 2016.
AMOKRANE, A.; COMEL, C.; VERON, J. Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. <b>Water Research</b> , v. 31, n. 11, p. 2775–2782, nov. 1997.
AMOR, C. et al. Mature landfill leachate treatment by coagulation/flocculation combined with Fenton and solar photo-Fenton processes. <b>Journal of Hazardous Materials</b> , v. 286, p. 261–268, abr. 2015.
AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D.; MOREIRA, R. F. P. M. Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo. <b>Engenharia Sanitaria e Ambiental</b> , v. 14, n. 4, p. 543–550, 2009.
BILA, D. M. <b>Aplicação de Processos Combinados no Tratamento do Lixiviado.</b> 2000. 95 f. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
BRASIL. Ministério da Saúde. <b>Vigilância E Controle Da Qualidade Da Água Para Consumo Humano.</b> Brasília: Secretaria de Vigilância em saúde, 2006. 211 p.
<b>Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS.</b> Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010.

CARVALHO, J. X. Caracterização fisico-química do lixiviado de central de tratamento de resíduos e possíveis aplicações agrícolas. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015.

CASTILHOS JR., A. B.; MÁXIMO, V. A. Estudo do tratamento por coagulação-floculação de lixiviados gerados em Aterro Sanitário da Região Metropolitana de Florianópolis. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte/MG, 2007.

CASTRILLÓN, L. et al. Physico-chemical and biological treatment of MSW landfill leachate. **Waste Management**, v. 30, n. 2, p. 228–235, 2010.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais.** 3. ed. Engenho, 2016. 453 p.

CHRISTENSEN, T. H. et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry**, v. 16, n. 7–8, p. 659–718, 2001.

CICLUS AMBIENTAL. 2017. Disponível em: <a href="http://www.ciclusambiental.com.br/ciclus\_ctr.php">http://www.ciclusambiental.com.br/ciclus\_ctr.php</a>. Acesso em: 26 nov. 2017.
\_\_\_\_. 2018. Comunicação pessoal. Empresa Ciclus Ambiental, Divisão de Laboratório. Rio de Janeiro, 2018.

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA – COMLURB. **Legado de gramacho à CTR Rio. 2012**. Disponível em: <a href="http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6165511/4162007/legado\_de\_gramacho\_actr\_rio\_junho2012.pdf">http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6165511/4162007/legado\_de\_gramacho\_actr\_rio\_junho2012.pdf</a>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

\_\_\_\_\_. **Destino final dos resíduos removidos no Rio de Janeiro.** 2017a. Disponível em: <a href="http://www.rio.rj.gov.br/web/comlurb/exibeconteudo?id=4194245">http://www.rio.rj.gov.br/web/comlurb/exibeconteudo?id=4194245</a>. Acesso em: 4 dez. 2017.

\_\_\_\_. Sistema de limpeza e serviços urbanos e gestão de resíduos sólidos. 2017b. Disponível em: <a href="http://www.rio.rj.gov.br/documents/91370/3648679b-caf3-4f70-bcac-92c849916220">http://www.rio.rj.gov.br/documents/91370/3648679b-caf3-4f70-bcac-92c849916220</a>. Acesso em: 11 dez. 2017.

\_\_\_\_. 2018. Comunicação pessoal. Gerência de Aterros. Diretoria Técnica e de Engenharia. Rio de Janeiro, 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução N° 430, de 13 de Maio de 2011. 2011.

CORBITT, R. A. **Standard handbook of environmental engineering.** 2. ed. New York: Mcgraw Hill, 1999. 1216 p.

COSTA, F. M. Estudo da biodegradabilidade e toxicidade de lixiviados com diferente características após processos oxidativos avançados. 2016. 146 f. Tese de doutorado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** Vol 2. Rio de Janeiro: ABES, 1993. 481 p.

- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Vol 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Rima, 2005. 1566 p.
- ECKENFELDER, W. W. **Industrial Water Pollution Control**. 3. ed. New York: Mcgraw Hill, 2000.
- ELIAS, M. DE L. Codisposição de rejeitos de tratamento de lixiviado de aterro com resíduo sólido domiciliar. 2018. 117 f. Dissertação de mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- FERREIRA, D. S. **Estudo comparativo da coagulação/floculação e eletrocoagulação no tratamento de lixiviado de aterro.** 2013. 126 f. Dissertação de mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- FRANCO, E. S. Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água. 2009. 207 f. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- FUNDAÇÃO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO FADE/UFPE. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** Jaboatão dos Guararapes: UFPE, 2014.
- GOMES, L. P. PROSAB. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Edital 5. Resíduos sólidos: Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 358 p.
- GOTVAJN, A. Ž.; TIŠLER, T.; ZAGORC-KONČAN, J. Comparison of different treatment strategies for industrial landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 162, n. 2–3, p. 1446–1456, 2009.
- GUIDOLINI, J. et al. Arranjos alternativos para o pré-tratamento do chorume do depósito municipal de Aracrus. **Revista Educação e Tecnologia**, v. 1, p. 1–11, 2005.
- HOWE, K. J. et al. **Princípios de Tratamento de Água.** 3 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 624 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. Gestão Municipal do Saneamento Básico. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, **2008**. Disponível em:
- <a href="https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000105.pdf">https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000105.pdf</a>. Acesso em: 24 set. 2017.
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA IPT. Manual de Gerenciamento Integrado. Lixo Municipal. 2. ed. São Paulo, 2000. 29 p.

- JOHNSON, P. N.; AMIRTHARAJAH, A. Ferric chloride and alum as single and dual coagulants. **Journal of the American Water Works Association**, v. 75, p. 232–239, 1983.
- KANG, Y. W.; HWANG, K.-Y. Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process. **Water Research**, v. 34, n. 10, p. 2786–2790, jul. 2000.
- KARGI, F.; PAMUKOGLU, M. Y. Aerobic biological treatment of pre-treated landfill leachate by fed-batch operation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 33, n. 5, p. 588–595, out. 2003.
- KJELDSEN, P. et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297–336, 2002.
- KURNIAWAN, T. A.; LO, W. H.; CHAN, G. Y. S. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1–3, p. 80–100, 2006.
- LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Geração e Características do Lixiviado. In: **Gomes, L.P.** (coord.). Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.
- LIMA, L. S. M. S. Quantificação E Remoção De Substâncias Húmicas Em Lixiviados Provenientes De Aterros De Resíduos Sólidos Urbanos. 2017. 170 f. Tese de doutorado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- LÖBLICH, D. S. **Tratamento de chorume. Com tecnologias de alta performance e custos compatíveis com o mercado brasileiro.** 2014. In: Palestra na sede do CREA, Rio de Janeiro. 06 ago. 2014.
- MASLIYAH, J. H.; BHATTACHARJEE, S. **Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena**. New Jersey: Wiley, 2006. 707 p.
- MÁXIMO, V. A. **Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados do aterro sanitário da região metropolitana de Florianópolis**. 2007. 187 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- METCALF & EDDY et al. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. Mcgraw Hill Higher Education, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário**. 2017. Disponível em: <a href="http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario">http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario</a>. Acesso em: 4 dez. 2017.

MORAVIA, W. G. Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas. 2010. 237 f. Tese de Doutorado. Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

OLIVEIRA, D. S. Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de floculadores tubulares helicoidais. 2008. 116 f. Dissertação de mestrado. Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **OECD**. 2017. Disponível em: <a href="http://www.oecd.org/">http://www.oecd.org/</a>>. Acesso em: 16 out. 2017.

PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. 2001. 216 f. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RENOU, S. et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, n. 3, p. 468–493, fev. 2008a.

\_\_\_\_\_. Treatment process adapted to stabilized leachates: Lime precipitation—prefiltration—reverse osmosis. **Journal of Membrane Science**, v. 313, n. 1–2, p. 9–22, abr. 2008b.

**REVISTA RADIS.** Ciclus Ambiental. 2017. De Gramacho a Seropédica. Disponível em: <a href="http://ciclusambiental.com.br/arquivos/revistaradis.pdf">http://ciclusambiental.com.br/arquivos/revistaradis.pdf</a>>. Acesso em: 03 out. 2017.

**REVISTA TAE.** 2011. Disponível em: <a href="http://www.revistatae.com.br/3356-noticias">http://www.revistatae.com.br/3356-noticias</a>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

Rio de Janeiro. Secretaria Municipal de Meio Ambiente – SMAC. **Resíduos Sólidos.** 2017. Disponível em: <a href="http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/residuos-solidos">http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/residuos-solidos</a>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

SILVA, A. C. **Tratamento do percolado de aterro sanitário e avaliação da toxicidade do efluente bruto e tratado**. 2002. 111 f. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, F. B. **Tratamento combinado de lixiviados de aterros sanitários**. 2009. 117 f. Dissertação de mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

- SILVA, F. M. S. Avaliação do método de precipitação química associados do stripping de amônia no tratamento do lixiviado do Aterro Muribeca-PE. 2008. 117 f. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- SILVA, P. N. Avaliação do processo de coagulação/floculação aplicado ao lixiviado, com ênfase na redução da ecotoxicidade. 2017. 90 f. Dissertação de mestrado. Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- SOUTO, G. D. B. Lixiviado de aterros sanitários brasileiros estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping"). 2009. 367 f. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- STUMM, W.; O'MELIA, C. R. Stoichiometry of Coagulation. **Journal American Water Works Association**, v. 60, n. 5, p. 514–539, maio 1968.
- TELLES, C. A. S. **Processos combinados para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 2010. 130 f. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- THE WORLD BANK. What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management. Washington: Urban Development & Local Government Unit, 2012. 98 p.
- VILAR, V. J. P. et al. Treatment of a sanitary landfill leachate using combined solar photo-Fenton and biological immobilized biomass reactor at a pilot scale. **Water Research**, v. 45, n. 8, p. 2647–2658, abr. 2011.
- WEINER, R. F.; MATTHEWS, R. **Environmental Engineering**. 4. ed. Burlington: Butterworth Heinemann, 2003. 484 p.
- YAO, P. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. S2567–S2574, 2013.
- ZHANG, Q. Q. et al. Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants. **Waste Management**, v. 33, n. 11, p. 2277–2286, 2013.

# ANEXO I – LAUDOS ANALÍTICOS DOS EXTRATOS LIXIVIADOS DAS AMOSTRAS DE LODO



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## **RELATÓRIO DE ENSAIO: 34248/2018-1.0**

	DADOS REFERENTES AO CLIENTE							
Empresa Solicitante:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO							
Endereço:	Avenida Horácio Macedo, 2030							
Bairro:	Cidade Universitária							
Cidade:	Rio de Janeiro							
UF:	Rio de Janeiro							
CEP:	21.941-914							
Nome do Solicitante:	Luan Moreira Novaes							
Dados para contato:	31 98782-3681 luannovaes@hotmail.com							
Processo Comercial:	901/2018-1							

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA								
Referência Hidroquímica:	739875							
Referência do cliente:	Lodo Ferro Gericinó							
Dados Adicionais:								

DADOS REFERENTES À AMOSTRA										
Data de Coleta:	27/03/2018	Data de Recebimento:	09/04/2018							
Temperatura de recebimento (°C)	5,0	Tipo de Amostra	Lixiviado							
Coletor	Cliente	Informações Relevantes								
Tipo de Coleta	Simples	Observações								

RESULTADOS ANALÍTICOS DA A	MOSTRA
Legislação ou Norma: Sem Comparativo	

#### METAIS

Início dos Ensaios: 09/04/2018

Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	Sem Comparativo
Arsênio Total	mg/L	0,016588	0,000015	
Bário Total	mg/L	0,289615	0,000203	
Cádmio Total	mg/L	<0,000010	0,000010	
Chumbo Total	mg/L	0,098010	0,000207	
Cromo Total	mg/L	0,573646	0,000062	
Ferro Total	mg/L	710,483423	0,003551	
Mercúrio Total	mg/L	<0,000086	0,000086	
Prata Total	mg/L	0,004614	0,000190	
Selênio Total	mg/L	0,005223	0,004010	

#### CONTROLE DE QUALIDADE ANALÍTICO DA AMOSTRA

	LCS	Metais ICP - MS										
Parâmetro	netro Unidade Resultados Faixa Aceitável de ID da co Recuperação analío											
Alumínio (Al)	%	98	80 - 120	2858/2018								
Antimônio (Sb)	%	102	80 - 120	2858/2018								
Arsênio (AS)	%	102	80 - 120	2858/2018								
Bário (Ba)	%	102	80 - 120	2858/2018								
Berílio (Be)	%	99	80 - 120	2858/2018								
Boro (B)	%	99	80 - 120	2858/2018								
Cádmio (Cd)	%	107	80 - 120	2858/2018								
Cálcio (Ca)	%	95	80 - 120	2858/2018								



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

Parâmetro	Unidade	Resultados	Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica
Chumbo (Pb)	%	100	80 - 120	2858/2018
Cobalto(Co)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cobre (Cu)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cromo (Cr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Enxofre (S)	%	98	80 - 120	2858/2018
Estanho (Sn)	%	85	80 - 120	2858/2018
Estrôncio (Sr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Ferro (Fe)	%	98	80 - 120	2858/2018
Fósforo (P)	%	94	80 - 120	2858/2018
Magnésio (Mg)	%	96	80 - 120	2858/2018
Manganês (Mn)	%	101	80 - 120	2858/2018
Molibdênio (Mo)	%	91	80 - 120	2858/2018
Níquel (Ni)	%	105	80 - 120	2858/2018
Potássio (K)	%	99	80 - 120	2858/2018
Prata (Ag)	%	95	80 - 120	2858/2018
Selênio (Se)	%	103	80 - 120	2858/2018
Silício (Si)	%	97	80 - 120	2858/2018
Sódio (Na)	%	102	80 - 120	2858/2018
Tálio (TI)	%	103	80 - 120	2858/2018
Titânio (Ti)	%	96	80 - 120	2858/2018
Urânio (U)	%	85	80 - 120	2858/2018
Vanádio (V)	%	103	80 - 120	2858/2018
Zinco (Zn)	%	100	80 - 120	2858/2018

LCS Metais ICP MS - Mercúrio										
Parâmetro	Parâmetro Unidade Resultados Faixa Aceitável de ID da corrida Recuperação analítica									
Mercúrio (Hg)	%	105	80 - 120	2735/2018						

#### REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /METHOD 3050B

Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /USEPA 6020A-INDUCTIVELY COUPLED PLASMA-MASS



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

#### **OBSERVAÇÕES GERAIS**

Este Relatório	de Ensaio	só pode ser	reproduzido por	inteiro e sem	nenhuma	alteração e com	a aprovação	por escrito	da
nus - Hidroquím						•			

As amostras são coletadas e preservadas seguindo as normas padronizadas SMEWW 22 nd - e USEPA.

\* Serviço Terceirizado no Laboratório Oceanus.

Os resultados referem-se somente à amostra analisada.

☐ Abreviações:

Ausência = Menor Que o Limite de Quantificação

USEPA = United States Environment Protection Agency

ID = Identificação

LCS = Laboratory Control Sample

LD = Limite de Detecção

LQ = Limite de Quantificação

NA = Não Aplicável

ND = Não Detectável

NMP = Número Mais Provável

NO = Não Objetável

PCB = Polychlorinated Biphenyls

SMEWW = Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater -22 nd Edition - 2012

TPH = Total Petroleun Hydrocarbons

UFC = Unidades Formadoras de Colônia

VMP = Valor Máximo Permitido

Os dados da amostra fornecidos são de responsabilidade do solicitante.

#### **RESPONSÁVEIS**

Relatório emitido por: Shirley Bello Relatório revisado por: Larissa Alves

Responsável técnico:

Robson Vieira de Figueiredo, M.Sc.

Gerente Técnico

CRQ n°03314742 – 3ª Região CREA RJ200668502-3

Data de emissão do laudo: Rio de Janeiro, 27 de abril de 2018



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## LISTA DE VERIFICAÇÃO DE RECEBIMENTO DE AMOSTRAS

N° da Amostra: 34248/2018-1.0

Cliente: ESCOLA DE QUIMICA - UFRJ	
Data de recebimento: 09/04/2018	
Código: 739875   Identificação da Amostra: Lodo Ferro Gericinó	
Amostra acondicionada adequadamente?	Sim
Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?	Sim
Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?	Sim
Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?	Sim
A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?	Sim
Termômetro utilizado	TI-004
Amostra está dentro da validade para todos os parâmetros?	Sim
Há quantidade de amostra suficiente para todas as análises?	Sim
Os frascos eram apropriados para o tipo de análise?	Sim
As irregularidades de recebimento foram notificadas?	
Notificação enviada para: Data:	
Comentários:	
Responsável pelo recebimento: Thais Poubel	



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

Deta: 1		Nome (Le	Coleta Composta?	Chuva na		1		Γ								4	ω	2	_	Amostro		Coleta tra	Coletare	Cittade: 1		Endereço	Cliente: L		
Deta: 1 Hora: Tel: Tel: Tel:		Name (Legivel): Luan Moreire Novees	Total de	oras? ( ):	PREENCHIMENTO OBRIGATÓRIO											Lodo Cal Seropédica 1 1 1 134884 -34853	Lodo Ferro Seropédica 2 434144 -34251	Lodo Cal Gericinó SE 1 1 959215 - 34444	Lodo Ferro Gericinó 1 139885 - 34847	IDENTIFICAÇÃO DA ANOSTRA	INFORMAÇÕES DO LOGIN	Coleta transportada por: Mariana Mattos	Coleta realizada por: Mariana Mattos	Citade: Nio de Laneiro	E to	Endereço: Cidade Universitária - Centro do Tecnologia - Bloco E - Ilha do Fundão	Cliente: Luan Moreira Novaes	Rua Anstides Lobo nº30 Nio Comprido - Rui CEP, 20.250 450 Tel: (21) 3293-7000 / 2567-0819 / 2567-3871 Visite: www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br	Filial - Hidroquimica Engenharia e Laboratórios
					Tollow The Park											7	7	7	7	Tipo da K Arruaira Fra	INFORMAÇ	8-Agua de Reuso	S-Augus Subtrations	a due same	2-Água de Rin	t-Mgca	TIPO DI	50	NUS
Temperatura de Recebimento: Autorização do Cliente:	Ass. Contract	Recebido por	g				4								0.0000000000000000000000000000000000000	2 06/3	2 //3/3	2 20/3	2 27/3	Nº 00 Date & Horse Proposes	INFORMAÇÕES DE CAMPO	8	10-Outres:		8-Sedimento	7-Effuente	TIPO DE AMOSTRA:		CADEIA DE CUSTODIA
de Rece do Client			Extrato lixiviado de amostra sólida			-												-		рН								0. 10	EW DE COS SULL
bimento:	Compy C	USO EXC	viado o		OBSERVAC															Clor	ю						SINGGIN	- 1	7 7
	000	EXCLUS	e amo		ACOES	1	L			-										Terr	np °	С				C	(KSS)		
	Da	DO DO	stra só			+	-		4	1	-	-		4			_			OD				_		CAMPO	-	P	M
1 )(	pi: 09	GRUPO	da		1	+			+	+	-		-			,				ORE	25/04	501					PARÁMETROS	Victoria	in production
Conforme	Data: 09 Jo4 1/18	LUSIVO DO GRUPO OCEANUS		1	9	+		3.		-			-					70.		Con	440		ade	100	-		808	Windson opposite and the second	IIMICA
( ) Não-Conforme	Hora	3			OUTROS PARAMETROS							ሕ													22	LABORATÓRIO		901/18	Proposta No



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## **RELATÓRIO DE ENSAIO: 34251/2018-1.0**

DADOS REFERENTES AO CLIENTE						
Empresa Solicitante:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO					
Endereço:	Avenida Horácio Macedo, 2030					
Bairro:	Cidade Universitária					
Cidade:	Rio de Janeiro					
UF:	Rio de Janeiro					
CEP:	21.941-914					
Nome do Solicitante:	Luan Moreira Novaes					
Dados para contato:	31 98782-3681 luannovaes@hotmail.com					
Processo Comercial:	901/2018-1					

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA		
Referência Hidroquímica:	739876	
Referência do cliente:	Lodo Ferro Seropédica	
Dados Adicionais:		

DADOS REFERENTES À AMOSTRA					
Data de Coleta:	13/03/2018	Data de Recebimento:	09/04/2018		
Temperatura de recebimento (°C)	5,0	Tipo de Amostra	Lixiviado		
Coletor	Cliente	Informações Relevantes			
Tipo de Coleta	Simples	Observações			

	RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA
Ī	Legislação ou Norma: Sem Comparativo

#### METAIS

Início dos Ensaios: 09/04/2018

Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	Sem Comparativo
Arsênio Total	mg/L	0,024319	0,000015	
Bário Total	mg/L	0,178571	0,000203	
Cádmio Total	mg/L	<0,000010	0,000010	
Chumbo Total	mg/L	0,018800	0,000207	
Cromo Total	mg/L	0,080800	0,000062	
Ferro Total	mg/L	77,597800	0,003551	
Mercúrio Total	mg/L	<0,000086	0,000086	
Prata Total	mg/L	<0,000190	0,000190	
Selênio Total	mg/L	0,006748	0,004010	

#### CONTROLE DE QUALIDADE ANALÍTICO DA AMOSTRA

LCS Metais ICP - MS					
Parâmetro	Unidade	Resultados	Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica	
Alumínio (Al)	%	98	80 - 120	2858/2018	
Antimônio (Sb)	%	102	80 - 120	2858/2018	
Arsênio (AS)	%	102	80 - 120	2858/2018	
Bário (Ba)	%	102	80 - 120	2858/2018	
Berílio (Be)	%	99	80 - 120	2858/2018	
Boro (B)	%	99	80 - 120	2858/2018	
Cádmio (Cd)	%	107	80 - 120	2858/2018	
Cálcio (Ca)	%	95	80 - 120	2858/2018	



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

Parâmetro	Unidade	Resultados	Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica
Chumbo (Pb)	%	100	80 - 120	2858/2018
Cobalto(Co)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cobre (Cu)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cromo (Cr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Enxofre (S)	%	98	80 - 120	2858/2018
Estanho (Sn)	%	85	80 - 120	2858/2018
Estrôncio (Sr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Ferro (Fe)	%	98	80 - 120	2858/2018
Fósforo (P)	%	94	80 - 120	2858/2018
Magnésio (Mg)	%	96	80 - 120	2858/2018
Manganês (Mn)	%	101	80 - 120	2858/2018
Molibdênio (Mo)	%	91	80 - 120	2858/2018
Níquel (Ni)	%	105	80 - 120	2858/2018
Potássio (K)	%	99	80 - 120	2858/2018
Prata (Ag)	%	95	80 - 120	2858/2018
Selênio (Se)	%	103	80 - 120	2858/2018
Silício (Si)	%	97	80 - 120	2858/2018
Sódio (Na)	%	102	80 - 120	2858/2018
Tálio (TI)	%	103	80 - 120	2858/2018
Titânio (Ti)	%	96	80 - 120	2858/2018
Urânio (U)	%	85	80 - 120	2858/2018
Vanádio (V)	%	103	80 - 120	2858/2018
Zinco (Zn)	%	100	80 - 120	2858/2018

LCS Metais ICP MS - Mercúrio					
Parâmetro Unidade Resultados Faixa Aceitável de ID da corrida Recuperação analítica					
Mercúrio (Hg)	%	105	80 - 120	2735/2018	

#### REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /METHOD 3050B Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /USEPA 6020A-INDUCTIVELY COUPLED PLASMA-MASS



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

#### **OBSERVAÇÕES GERAIS**

os resultad	los referem	-se somente	à amostra	analisada.

□ Este Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração e com a aprovação por escrito da Oceanus - Hidroquímica.

As amostras são coletadas e preservadas seguindo as normas padronizadas SMEWW 22 nd- e USEPA.

\* Serviço Terceirizado no Laboratório Oceanus.

Abreviações:

Ausência = Menor Que o Limite de Quantificação

USEPA = United States Environment Protection Agency

ID = Identificação

LCS = Laboratory Control Sample

LD = Limite de Detecção

LQ = Limite de Quantificação

NA = Não Aplicável

ND = Não Detectável

NMP = Número Mais Provável

NO = Não Objetável

PCB = Polychlorinated Biphenyls

SMEWW = Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater -22 nd Edition - 2012

TPH = Total Petroleun Hydrocarbons

UFC = Unidades Formadoras de Colônia

VMP = Valor Máximo Permitido

Os dados da amostra fornecidos são de responsabilidade do solicitante.

#### **RESPONSÁVEIS**

Relatório emitido por: Shirley Bello Relatório revisado por: Larissa Alves

Responsável técnico:

Robson Vieira de Figueiredo, M.Sc.

Gerente Técnico

CRQ n°03314742 – 3ª Região

CREA RJ200668502-3

Data de emissão do laudo: Rio de Janeiro, 27 de abril de 2018



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## LISTA DE VERIFICAÇÃO DE RECEBIMENTO DE AMOSTRAS

N° da Amostra: 34251/2018-1.0

Cliente: ESCOLA DE QUIMICA - UFRJ  Data de recebimento: 09/04/2018  Código: 739876   Identificação da Amostra: Lodo Ferro Seropédica  Amostra acondicionada adequadamente?   Sin Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?   Sin Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?   Sin Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?   Sin A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?   Sin Termômetro utilizado   TI-ou Amostra está dentro da validade para todos os parâmetros?   Sin
Código: 739876       Identificação da Amostra: Lodo Ferro Seropédica         Amostra acondicionada adequadamente?       Sin         Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?       Sin         Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?       Sin         Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?       Sin         A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?       Sin         Termômetro utilizado       TI-00
Amostra acondicionada adequadamente?  Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?  Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?  Sin Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?  A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?  Termômetro utilizado  Sin Ti-ot
Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?  Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?  Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?  A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?  Termômetro utilizado  Sin  Ti-0t
Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?  Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?  Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?  A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?  Termômetro utilizado  Sin  Ti-0t
Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?  Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?  Sin A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?  Termômetro utilizado  TI-00
Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?  A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?  Termômetro utilizado  Sin TI-00
A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?  Termômetro utilizado  Sin TI-00
Termômetro utilizado TI-00
Amostra está dentre da validade para todos os parâmetros?
Amostra esta dentro da validade para todos os parametros:
Há quantidade de amostra suficiente para todas as análises?
Os frascos eram apropriados para o tipo de análise?
As irregularidades de recebimente foram netificades?
As irregularidades de recebimento foram notificadas?  Notificação enviada para:  Data:
Notificação enviada para: Data:
Comentários:
Responsável pelo recebimento: Thais Poubel



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## **RELATÓRIO DE ENSAIO: 34249/2018-1.0**

DADOS REFERENTES AO CLIENTE			
Empresa Solicitante:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO		
Endereço:	Avenida Horácio Macedo, 2030		
Bairro:	Cidade Universitária		
Cidade:	Rio de Janeiro		
UF:	Rio de Janeiro		
CEP:	21.941-914		
Nome do Solicitante:	Luan Moreira Novaes		
Dados para contato:	31 98782-3681 luannovaes@hotmail.com		
Processo Comercial:	901/2018-1		

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA		
Referência Hidroquímica:	739873	
Referência do cliente:	Lodo Cal Gericinó	
Dados Adicionais:		

DADOS REFERENTES À AMOSTRA					
Data de Coleta:	20/03/2018	Data de Recebimento:	09/04/2018		
Temperatura de recebimento (°C)	5,0	Tipo de Amostra	Lixiviado		
Coletor	Cliente	Informações Relevantes			
Tipo de Coleta	Simples	Observações			

RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTI	RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA			
Legislação ou Norma: Sem Comparativo				

#### METAIS

Início dos Ensaios: 09/04/2018

Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	Sem Comparativo
Arsênio Total	mg/L	0,000834	0,000015	
Bário Total	mg/L	0,618365	0,000203	
Cádmio Total	mg/L	<0,000010	0,000010	
Chumbo Total	mg/L	0,069295	0,000207	
Cromo Total	mg/L	0,015004	0,000062	
Mercúrio Total	mg/L	<0,000086	0,000086	
Prata Total	mg/L	0,002360	0,000190	
Selênio Total	mg/L	< 0.004010	0.004010	

#### CONTROLE DE QUALIDADE ANALÍTICO DA AMOSTRA

LCS Metais ICP - MS				
Parâmetro	Unidade	Resultados	Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica
Alumínio (AI)	%	98	80 - 120	2858/2018
Antimônio (Sb)	%	102	80 - 120	2858/2018
Arsênio (AS)	%	102	80 - 120	2858/2018
Bário (Ba)	%	102	80 - 120	2858/2018
Berílio (Be)	%	99	80 - 120	2858/2018
Boro (B)	%	99	80 - 120	2858/2018
Cádmio (Cd)	%	107	80 - 120	2858/2018
Cálcio (Ca)	%	95	80 - 120	2858/2018
Chumbo (Pb)	%	100	80 - 120	2858/2018

Página 1 de 4



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

Parâmetro	Unidade	Resultados	Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica
Cobalto(Co)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cobre (Cu)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cromo (Cr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Enxofre (S)	%	98	80 - 120	2858/2018
Estanho (Sn)	%	85	80 - 120	2858/2018
Estrôncio (Sr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Ferro (Fe)	%	98	80 - 120	2858/2018
Fósforo (P)	%	94	80 - 120	2858/2018
Magnésio (Mg)	%	96	80 - 120	2858/2018
Manganês (Mn)	%	101	80 - 120	2858/2018
Molibdênio (Mo)	%	91	80 - 120	2858/2018
Níquel (Ni)	%	105	80 - 120	2858/2018
Potássio (K)	%	99	80 - 120	2858/2018
Prata (Ag)	%	95	80 - 120	2858/2018
Selênio (Se)	%	103	80 - 120	2858/2018
Silício (Si)	%	97	80 - 120	2858/2018
Sódio (Na)	%	102	80 - 120	2858/2018
Tálio (TI)	%	103	80 - 120	2858/2018
Titânio (Ti)	%	96	80 - 120	2858/2018
Urânio (U)	%	85	80 - 120	2858/2018
Vanádio (V)	%	103	80 - 120	2858/2018
Zinco (Zn)	%	100	80 - 120	2858/2018

LCS Metais ICP MS - Mercúrio				
Parâmetro Unidade Resultados Faixa Aceitável de Recuperação analítica				
Mercúrio (Hg)	%	105	80 - 120	2735/2018

#### REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /METHOD 3050B Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /USEPA 6020A-INDUCTIVELY COUPLED PLASMA-MASS



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

#### **OBSERVAÇÕES GERAIS**

Os resultados	referem-se	somente à	amostra	analisada.

□ Este Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração e com a aprovação por escrito da Oceanus - Hidroquímica.

As amostras são coletadas e preservadas seguindo as normas padronizadas SMEWW 22 nd- e USEPA.

\* Serviço Terceirizado no Laboratório Oceanus.

Abreviações:

Ausência = Menor Que o Limite de Quantificação

USEPA = United States Environment Protection Agency

ID = Identificação

LCS = Laboratory Control Sample

LD = Limite de Detecção

LQ = Limite de Quantificação

NA = Não Aplicável

ND = Não Detectável

NMP = Número Mais Provável

NO = Não Objetável

PCB = Polychlorinated Biphenyls

SMEWW = Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater -22 nd Edition - 2012

TPH = Total Petroleun Hydrocarbons

UFC = Unidades Formadoras de Colônia

VMP = Valor Máximo Permitido

Os dados da amostra fornecidos são de responsabilidade do solicitante.

#### **RESPONSÁVEIS**

Relatório emitido por: Shirley Bello Relatório revisado por: Larissa Alves

Responsável técnico:

Robson Vieira de Figueiredo, M.Sc.

Gerente Técnico

CRQ n°03314742 – 3ª Região

CREA RJ200668502-3

Data de emissão do laudo: Rio de Janeiro, 27 de abril de 2018



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## LISTA DE VERIFICAÇÃO DE RECEBIMENTO DE AMOSTRAS

N° da Amostra: 34249/2018-1.0

Cliente: ESCOLA DE QUIMICA - UFRJ	
Data de recebimento: 09/04/2018	
Código: 739873   Identificação da Amostra: Lodo Cal Gericinó	
Amostra acondicionada adequadamente?	Sim
Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?	Sim
Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?	Sim
Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?	Sim
A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?	Sim
Termômetro utilizado	TI-004
Amostra está dentro da validade para todos os parâmetros?	Sim
Há quantidade de amostra suficiente para todas as análises?	Sim
Os frascos eram apropriados para o tipo de análise?	Sim
As irregularidades de recebimento foram notificadas?	
Notificação enviada para: Data:	
Comentários:	
Responsável pelo recebimento: Thais Poubel	



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

#### **RELATÓRIO DE ENSAIO: 34253/2018-1.0**

	DADOS REFERENTES AO CLIENTE			
Empresa Solicitante:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO			
Endereço:	Avenida Horácio Macedo, 2030			
Bairro:	Cidade Universitária			
Cidade:	Rio de Janeiro			
UF:	Rio de Janeiro			
CEP:	21.941-914			
Nome do Solicitante:	Luan Moreira Novaes			
Dados para contato:	31 98782-3681 luannovaes@hotmail.com			
Processo Comercial:	901/2018-1			

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA				
Referência Hidroquímica: 739874				
Referência do cliente:	Lodo Cal Seropédica			
Dados Adicionais:	Dados Adicionais:			

DADOS REFERENTES À AMOSTRA					
Data de Coleta:	06/03/2018 Data de Recebimento: 09/04/2018				
Temperatura de recebimento (°C)	5,0	Tipo de Amostra	Lixiviado		
Coletor	Cliente	Informações Relevantes			
Tipo de Coleta	Simples	Observações			

RESULTADOS ANALÍTICOS DA A	MOSTRA
Legislação ou Norma: Sem Comparativo	

#### METAIS

Início dos Ensaios: 09/04/2018

Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	Sem Comparativo	
Arsênio Total	mg/L	0,015796	0,000015		
Bário Total	mg/L	0,204373	0,000203		
Cádmio Total	mg/L	<0,000010	0,000010		
Chumbo Total	mg/L	0,032219	0,000207		
Cromo Total	mg/L	0,015464	0,000062		
Mercúrio Total	mg/L	<0,000086	0,000086		
Prata Total	mg/L	<0,000190	0,000190		
Selênio Total	mg/L	<0,004010	0,004010		

#### CONTROLE DE QUALIDADE ANALÍTICO DA AMOSTRA

LCS Metais ICP - MS					
Parâmetro	Unidade	de Resultados Faixa Aceitável de Recuperação		ID da corrida analítica	
Alumínio (Al)	%	98	80 - 120	2858/2018	
Antimônio (Sb)	%	102	80 - 120	2858/2018	
Arsênio (AS)	%	102	80 - 120	2858/2018	
Bário (Ba)	%	102	80 - 120	2858/2018	
Berílio (Be)	%	99	80 - 120	2858/2018	
Boro (B)	%	99	80 - 120	2858/2018	
Cádmio (Cd)	%	107	80 - 120	2858/2018	
Cálcio (Ca)	%	95	80 - 120	2858/2018	
Chumbo (Pb)	%	100	80 - 120	2858/2018	

Página 1 de 4



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

Parâmetro	Unidade	Resultados	Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica
Cobalto(Co)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cobre (Cu)	%	103	80 - 120	2858/2018
Cromo (Cr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Enxofre (S)	%	98	80 - 120	2858/2018
Estanho (Sn)	%	85	80 - 120	2858/2018
Estrôncio (Sr)	%	102	80 - 120	2858/2018
Ferro (Fe)	%	98	80 - 120	2858/2018
Fósforo (P)	%	94	80 - 120	2858/2018
Magnésio (Mg)	%	96	80 - 120	2858/2018
Manganês (Mn)	%	101	80 - 120	2858/2018
Molibdênio (Mo)	%	91	80 - 120	2858/2018
Níquel (Ni)	%	105	80 - 120	2858/2018
Potássio (K)	%	99	80 - 120	2858/2018
Prata (Ag)	%	95	80 - 120	2858/2018
Selênio (Se)	%	103	80 - 120	2858/2018
Silício (Si)	%	97	80 - 120	2858/2018
Sódio (Na)	%	102	80 - 120	2858/2018
Tálio (TI)	%	103	80 - 120	2858/2018
Titânio (Ti)	%	96	80 - 120	2858/2018
Urânio (U)	%	85	80 - 120	2858/2018
Vanádio (V)	%	103	80 - 120	2858/2018
Zinco (Zn)	%	100	80 - 120	2858/2018

LCS Metais ICP MS - Mercúrio					
Parâmetro	Unidade Resultados		Faixa Aceitável de Recuperação	ID da corrida analítica	
Mercúrio (Hg)	%	105	80 - 120	2735/2018	

#### REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /METHOD 3050B Metais Totais e Fósforo - ICP-MS: USEPA 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY /USEPA 6020A-INDUCTIVELY COUPLED PLASMA-MASS



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

#### **OBSERVAÇÕES GERAIS**

	s resultac	los referei	m-se som	ente à a	amostra	analisada.
--	------------	-------------	----------	----------	---------	------------

□ Este Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração e com a aprovação por escrito da Oceanus - Hidroquímica.

As amostras são coletadas e preservadas seguindo as normas padronizadas SMEWW 22 nd - e USEPA.

\* Serviço Terceirizado no Laboratório Oceanus.

Abreviações:

Ausência = Menor Que o Limite de Quantificação

USEPA = United States Environment Protection Agency

ID = Identificação

LCS = Laboratory Control Sample

LD = Limite de Detecção

LQ = Limite de Quantificação

NA = Não Aplicável

ND = Não Detectável

NMP = Número Mais Provável

NO = Não Objetável

PCB = Polychlorinated Biphenyls

SMEWW = Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater -22 nd Edition - 2012

TPH = Total Petroleun Hydrocarbons

UFC = Unidades Formadoras de Colônia

VMP = Valor Máximo Permitido

Os dados da amostra fornecidos são de responsabilidade do solicitante.

#### **RESPONSÁVEIS**

Relatório emitido por: Shirley Bello Relatório revisado por: Larissa Alves

Responsável técnico:

Robson Vieira de Figueiredo, M.Sc.

Gerente Técnico

CRQ n°03314742 – 3ª Região

CREA RJ200668502-3

Data de emissão do laudo: Rio de Janeiro, 27 de abril de 2018



REG.INEA:UN015590/55.11.10 / REG.INEA:UN016133/55.11.10 www.oceanus.bio.br / www.hidroquimicabr.com.br

## LISTA DE VERIFICAÇÃO DE RECEBIMENTO DE AMOSTRAS

N° da Amostra: 34253/2018-1.0

Cliente: ESCOLA DE QUIMICA - UFRJ				
Data de recebimento: 09/04/2018				
Código: 739874 Identificação da Amostra: Lodo Cal Seropédica				
Amostra acondicionada adequadamente?	Sim			
Caixa ou embalagem das amostras está fechada e não apresenta sinais de violação?				
Os frascos ou embalagens contendo diretamente as amostras estão íntegros?				
Os rótulos e cadeia de custódia identificam as amostras?	Sim			
A cadeia de custódia coincide com a proposta comercial?	Sim			
Termômetro utilizado				
Amostra está dentro da validade para todos os parâmetros?				
Há quantidade de amostra suficiente para todas as análises?				
Os frascos eram apropriados para o tipo de análise?				
As irregularidades de recebimento foram notificadas?				
Notificação enviada para: Data:				
Comentários:				
Responsável pelo recebimento: Thais Poubel				