

Gestão de Lamas Fecais em Países de Baixo e Médio PIB

João Miguel Campos Ângelo

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia do Ambiente

Orientador:

Professora Filipa Maria Santos Ferreira

Júri

Presidente: Helena Maria Rodrigues Vasconcelos Pinheiro

Orientador: Professora Filipa Maria Santos Ferreira

Vogal: Professor José Manuel de Saldanha Gonçalves Matos

Janeiro 2022

Agradecimentos

À Professora Filipa, orientadora da dissertação, pela forma positiva como contribuiu para o desenvolvimento das minhas competências técnicas. Também lhe quero agradecer por toda a disponibilidade, dedicação e motivação que me conferiu durante a realização da dissertação.

À minha Família por ser o meu porto seguro durante toda a minha vida. Aos presentes, à minha mãe Cristina Ângelo, ao meu pai Carlos Ângelo, à minha avó Lurdes Campos e à minha tia Teresa Moura muito obrigado pela vossa dedicação e amor incondicional. Aos ausentes, ao meu avô José Ângelo, ao meu avô Jorge Campos, à minha avó Alice Ângelo e ao meu tio Rui Moura, muito obrigado por tudo o que fizeram por mim, guardo-vos sempre comigo e dedico-vos esta dissertação.

Às pessoas próximas, especialmente à minha namorada Mafalda Pestana, que me acompanharam e me motivaram a realizar esta etapa, obrigado por estimularem a minha melhor versão durante os meus momentos mais difíceis, pela vossa amizade e pelo vosso amor.

Por fim, quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a minha formação académica, especialmente os docentes que acompanharam e dedicaram tempo ao meu percurso.

Resumo

A gestão de Lamas Fecais (LF) e de lamas de ETAR, em países de baixo/médio PIB, apresentam falhas em diversos planos, entre os quais institucionais, faltas de conhecimento técnico e inviabilidade económica, que se traduzem na inexistência de infraestruturas e/ou de redes de gestão planeadas que visam ao tratamento e/ou deposição segura das lamas, implicando ameaças à saúde pública e impactes negativos no meio ambiente. Estas deficiências são especialmente evidentes nos sistemas de Saneamento “*On Site*”, que apesar de serem dominantes nestes países e existir uma tendência crescente na sua aplicação, são encarados como soluções temporárias até que sistemas de Saneamento Convencional sejam aplicados.

Apesar das lamas serem tradicionalmente encaradas como um resíduo sem valor, algumas das suas características e constituintes podem permitir a sua valorização, principalmente no setor energético e na aplicação no solo. Estas práticas podem contribuir para a viabilidade económica da gestão de lamas, através da comercialização de produtos derivados e/ou da atração de financiamentos externos/subsídios aos atores envolvidos, atendendo aos possíveis impactes positivos adicionais nas dimensões ambiental e socio-económica.

Serão revistos, na presente dissertação, os principais métodos de tratamento e deposição de lamas, adequados para o contexto de países de baixo/médio PIB, e abordados alguns dos aspetos relevantes a ter em conta na tomada de decisão, em fases iniciais do planeamento, de uma intervenção na área de saneamento. Adicionalmente, será elaborada uma árvore-de-decisão com o intuito de auxílio nesta temática.

Palavras-Chave

Lamas, Saneamento, Países de baixo/médio PIB, Gestão de Lamas, Tratamento, Deposição Final, Valorização.

Abstract

Faecal Sludge (FS) and Sewage Sludge Management in low to middle income countries are linked with flaws in several areas, such as institutional, gaps in knowledge, and economic unviability, which are reflected in the absence of infrastructures and planned management systems that ensure the treatment and/or safe disposal of sludge and consequently, generate negative impacts in human health and on environment. These deficiencies are especially evident on On-Site Sanitation systems, which although are predominant in these countries with an expected tendency to grow, are perceived as temporary solutions until sewers are built.

Despite FS and Sewage Sludge are often viewed as valueless residues, both have characteristics and constituents that allow valorization routes, mainly energetic and agricultural, that can enhance the economic viability of sludge management, due to revenues generated through the commercialization of sludge-based products and attraction of external financing and subsidies regarding the additional positive environmental and socio-economic impacts generated.

The present dissertation has the objective to review the most relevant treatment and disposal methods, regarding the low to middle income countries context, and discuss some of the important aspects that should be considered in the early planning stages of a sanitation intervention. Additionally, it will be presented a diagram with the objective of assisting the decision-making process.

Key Words

Sludge, Sanitation, Developing Countries, Sludge Management, Treatment, Final Disposal, Valorization.

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Relevância do Tema	1
1.2	Gestão de Lamas Fecais em Países de Baixo/Médio PIB	3
1.3	Objetivos da Tese	5
1.4	Estrutura da Tese.....	6
2.	Lamas Fecais e Lamas de ETAR	7
2.1	O que são Lamas Fecais?	7
2.2	O que são Lamas de ETAR?	8
2.3	Características Físico-Químicas das Lamas	8
2.3.1	Sólidos e Teor de Humidade.....	8
2.3.2	Carência Química e Bioquímica de Oxigénio.....	9
2.3.3	Nutrientes.....	10
2.3.4	pH.....	11
2.3.5	Metais	12
2.3.6	Propriedades Mecânicas	12
2.3.7	Propriedades Térmicas.....	12
2.3.8	Patogénicos	13
2.3.9	Poluentes Industriais.....	13
2.4	Variabilidade das Lamas Fecais	14
2.5	Tipos de Lamas Fecais.....	14
3.	Tratamento de Lamas	16
3.1	Metodologia e Objetivos	16
3.2	Principais Objetivos de Tratamento	16
3.3	Pré-Tratamento	17
3.3.1	Princípios.....	17
3.3.2	Sólidos.....	18
3.3.3	Outros Processos	18
3.4	Redução do Teor de Humidade.....	19
3.4.1	Princípios.....	19
3.4.2	Espessamento.....	19
3.4.3	Desidratação.....	23
3.4.4	Condicionamento de Lamas	29
3.5	Estabilização de Lamas	30
3.5.1	Digestão Anaeróbia.....	30
3.5.2	Estabilização Alcalina	32

3.6	Compostagem	33
3.7	Higienização das Lamas	36
3.7.1	Armazenamento Prolongado	36
3.7.2	Pasteurização.....	37
3.8	Processos de Alta Temperatura	38
3.8.1	Pirolise lenta / Carbonização.....	38
3.8.2	Incineração	39
3.9	Compactação.....	40
3.10	Tratamento de Escorrências	41
3.11	Co-Tratamento em ETAR	42
4.	Valorização e Deposição Final	44
4.1	Metodologia e Objetivos	44
4.2	Contexto Legal e Regulações Existentes.....	44
4.3	Valorização.....	45
4.3.1	Princípios.....	45
4.3.2	Aplicação de Lamas no Solo	46
4.3.3	Valorização Energética.....	51
4.4	Aterro Sanitário	55
4.4.1	Descrição	55
4.4.2	Deposição de Lamas em Aterro Sanitário	56
4.5	Aplicabilidade dos métodos	57
4.5.1	Princípios.....	57
4.5.2	Aplicabilidade de métodos que pressupõem a comercialização de produtos derivados	58
4.5.3	Aplicabilidade da deposição no solo (valorização sem comercialização)	59
4.5.4	Aplicabilidade da deposição em Aterro Sanitário.....	60
5.	Sistema de Apoio à Decisão para a Seleção de Soluções de Tratamento e Deposição de Lamas .	61
5.1	Objetivos	61
5.2	Metodologia e Critérios	61
5.3	Caracterização do Contexto de Aplicação	62
5.4	Estudo da Viabilidade e Aplicação dos Métodos de Comercialização.....	64
5.4.1	Diagrama Geral de Decisão	64
5.4.2	Diagramas dos Processos a Considerar.....	66
5.5	Estudo da Viabilidade e Aplicação de Deposição no Solo.....	68
5.5.1	Diagrama Geral de Decisão	68
5.5.2	Métodos de Tratamentos a Considerar	69

5.6	Estudo da Viabilidade e Aplicação da Deposição em Aterro Sanitário.....	69
5.6.1	Diagrama Geral de Decisão	69
5.6.2	Métodos de Tratamento a Considerar.....	70
5.7	Diagramas Complementares.....	70
5.7.1	Avaliação da Necessidade da Construção de Novas Infraestruturas.....	70
5.7.2	Seleção de Métodos de Redução do Teor de Humidade	71
5.7.3	Estudo da Aplicação de Métodos de Higienização	73
6.	Aplicação do Método a Casos Práticos	74
6.1	Objetivos e Metodologia	74
6.2	Caso 1 – Cidade de Tete, Moçambique	74
6.2.1	Caracterização do contexto de Aplicação	74
6.2.2	Estudo da Viabilidade dos Métodos de Comercialização.....	75
6.2.3	Estudo da Viabilidade de Métodos de Deposição no Solo	76
6.2.4	Estudo da Viabilidade de Aplicação de Deposição em Aterro Sanitário	76
6.3	Caso Prático 2 – Tarrafal, Cabo Verde	77
6.3.1	Caracterização do Contexto de Aplicação.....	77
6.3.2	Estudo da Viabilidade dos Métodos de Comercialização.....	77
7.	Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro.....	79
	Anexo I – Tipos de Interface de Utilização (Compartimentos).....	89
	Anexo II – Principais falhas na Gestão de Lamas Fecais.....	90
	Anexo III – Exemplos de Patogénicos nas Lamas e respetivas Doenças/Sintomas	91
	Anexo IV - Variabilidade das Características de Lamas Fecais a Macro Escala	92
	Anexo V – Desidratação Até 90% ST em Leitões de Secagem.....	93
	Anexo VI - Métodos de Desidratação Mecânica.....	94
	Anexo VII – Digestão Anaeróbica (Estágios e Condições)	95
	Anexo VIII – Compostagem	96
	Anexo IX - Resíduos Municipais Sólidos	98
	Anexo X – Decantador Primário + Lamas Ativadas (ETAR).....	98
	Anexo XI – Lagoas de Estabilização.....	100
	Anexo XII – Legislação Africa do Sul.....	101
	Anexo XIII – Centralização versus Descentralização	105
	Anexo XIV - Caso Prático: Tarrafal, Cabo Verde	106

Índice de Figuras

Figura 1-1: Visão geral dos métodos de saneamento praticado em várias partes do Mundo [adaptado de 5].	2
Figura 1-2: Etapas na Gestão de Lamas Fecais [adaptado de 51].	3
Figura 1-3: Descarga ilegal de LF nas periferias da cidade de Ouagadougou, Burkina Faso [46].	3
Figura 2-1: Sólidos removidos de tecnologias de Saneamento "On Site", na África do Sul. 1 – Papeis. 2 – Plásticos, Fraldas, Produtos Menstruais, entre outros.	7
Figura 2-2: Tipos de Sólidos nas Lamas.	8
Figura 2-3: Rio eutrofizado derivado da descarga de LF e águas residuais, em Yaoundé, Camarões [5].	11
Figura 3-1: Variação do volume total das Lamas em função do seu teor de humidade [adaptado de EAWAG].	16
Figura 3-2: Tanque de Espessamento, adaptado de [5].	20
Figura 3-3: Possível configuração de uma lagoa de espessamento/anaeróbica, adaptado de [90].	21
Figura 3-4: Leito de Secagem.	23
Figura 3-5: Leitões de Secagem Plantados, adaptado de [90].	25
Figura 3-6: Reator de biogás "fix-dome", adaptado de [44].	31
Figura 3-7: Representação da Co-Compostagem de lamas com resíduos orgânicos, adaptado de [90].	34
Figura 3-8: Composição dos Resíduos Orgânicos Municipais países de alto, médio e baixo PIB, adaptado de [12].	35
Figura 3-9: Reator de Duplo Barril (esquerda) [32] e pellets de LF carbonizadas (direita) [28].	39
Figura 3-10: Exemplos de compactadores, de funcionamento manual, à esquerda, e automática, à direita. [28].	41
Figura 4-1: Custo de Deposição em Aterro em Comparação com Valorização Agrícola, no Gana e na Índia (incluindo transporte).	45
Figura 4-2: Representação do método "Valas de Entrincheiramento" [90].	49
Figura 4-3: Comparação do poder calorífico de LF (de 3 cidades distintas) com outros tipos de biomassa.	52
Figura 4-4: Poder calorífico em função da percentagem de mistura de Lamas Fecais com Carvão Vegetal, adaptado de [28].	53
Figura 4-5: Parte da linha de tratamento de uma unidade de produção de briquetes (esquerda) e secagem solar dos briquetes (Direita) [18].	55
Figura 4-6: Lixeira a "céu aberto" na zona Sul de África (imagem retirada do site das Nações Unidas em janeiro de 2022).	57
Figura 5-1: Diagrama a) - Método de Deposição a Aplicar.	62
Figura 5-2: Diagrama b) - Estudo da Viabilidade dos Métodos de Comercialização.	64
Figura 5-3: Diagrama c) - Métodos de Tratamento a considerar na comercialização de condicionador de solo.	67
Figura 5-4: Diagrama d) - Métodos de tratamento a considerar na comercialização de lamas como combustíveis sólidos.	67
Figura 5-5: Diagrama e) - Métodos de Tratamento a considerar na comercialização de biogás e/ou fertilizante orgânico.	68
Figura 5-6: Diagrama f) - Estudo da Viabilidade dos Métodos de deposição no Solo.	68
Figura 5-7: Diagrama g) - Métodos de tratamento a considerar na deposição de lamas no solo.	69
Figura 5-8: Diagrama h) - Diagrama Geral de decisão da deposição em Aterro Sanitário.	70

Figura 5-9: Diagrama i) - Métodos de tratamento a considerar na deposição de lamas em Aterro Sanitário.	70
Figura 5-10: Diagrama j) - Avaliação da necessidade de construção de uma ETLF e/ou tratamento em infraestruturas existentes.	71
Figura 5-11: Diagrama k) – Seleção de processos de redução de teor de humidade.....	72
Figura 5-12: Diagrama l) - Processos de higienização a serem considerados.	73

Índice de Tabelas

Tabela 2-1: ST e SVT em Lamas Fecais (várias origens) e em Lamas de ETAR.....	9
Tabela 2-2: Valores Típicos de CQO, CBO e CQO/CBO para Lamas Fecais (várias Origens) e Lamas de ETAR.....	10
Tabela 2-3: Valores Típicos para as concentrações de TKN, Amónia e Fosfora em Lamas Fecais (várias origens) e Lamas de ETAR.	11
Tabela 2-4: Valores Típicos para as concentrações de Ovos Helmintos nas Lamas Fecais (várias origens) e Lamas de ETAR.	13
Tabela 2-5: Valores típicos das concentrações de CQO, N total e ST consoante a carga e o grau de estabilização de Lamas Fecais. (adaptado de [38]).	15
Tabela 3-1: Valores Típicos das características de escoamentos em comparação com águas residuais, adaptado de [9].	41
Tabela 4-1: Quantidade de composto de LF e de composto de LF enriquecido a ser aplicado para diferentes espécies de plantas, para um certo tipo de solo [36].	48
Tabela 4-2: Comparação do poder calorífico, tempo de combustão e emissões, entre carvão, madeira e briquetes da Sanivation.....	55
Tabela 6-1: Evolução populacional da cidade de Tete, para o horizonte de projeto.	74
Tabela 6-2: Projeção para os fluxos de lamas a ser processados, no horizonte de projeto.	75

Abreviaturas

OMS - Organização Mundial de Saúde

PIB – Produto Interno Bruto

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ETAR - Estação de Tratamento de Efluentes Residuais

LF – Lamas Fecais

ETLF - Estações de Tratamento de Lamas Fecais

ST – Sólidos Totais

SVT – Sólidos Voláteis Totais

SFT – Sólidos Fixos Totais

SST – Sólidos Suspensos Totais

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

LSU – Latrina com Separação de Urina

TRH – Tempo de Retenção Hidráulico

N – Nitrogénio

P - Fósforo

K – Potássio

S - Enxofre

Ca - Cálcio

Mg - Magnésio

Al - Alumínio

Zn - Zinco

Fe - Ferro

CO_2 – Dióxido de Carbono

NH_3 - Amoníaco

USD – *United States Dollar*

1. Introdução

1.1 Enquadramento e Relevância do Tema

O saneamento está entre as invenções mais importantes, em termos de saúde pública, na civilização Humana. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a falta de saneamento ou a prática de saneamento não-melhorado é responsável pela transmissão de doenças como Cólera, Diarreia, Hepatite A, Tifoide e Poliomielite.

Entende-se por saneamento não-melhorado práticas que não envolvam a separação higiénica entre a excreta e o contacto humano e/ou a utilização de casas de banho partilhadas. Exemplos são latrinas sem laje/plataforma, defecação para baldes ou defecação “a céu aberto” [6].

Em 2015, estimativas das Nações Unidas apontam que 946 milhões de pessoas praticavam defecação a “céu aberto” e 2,4 biliões não tinham acesso a saneamento melhorado. Adicionalmente, dados da OMS estimam que em 2019 morreram 432 000 pessoas devido a doenças diarreicas, associadas a mau saneamento. Crianças com menos de 5 anos são faixa etária mais afetada, sendo esta, segundo a UNICEF, apontada como a segunda maior causa de morte infantil.

Em resposta a estes eventos, o objetivo 6.2 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propõe-se a erradicar a prática da defecação a “céu aberto” e servir todas as pessoas com saneamento melhorado.

Existem, atualmente, dois tipos de saneamento a ser praticados mundialmente, o Saneamento Convencional e o Saneamento “*On Site*” (ver Figura 1.1).

O Saneamento Convencional é caracterizado pela utilização de uma rede de coletores, que transporta os efluentes (águas residuais domésticas e industriais) para uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Existe uma vasta pesquisa feita sobre estas soluções centralizadas, em que a tecnologia aplicada está bem estabelecida [12]. Contudo, este tipo de saneamento é muito dispendioso, tanto pela construção da rede de coletores, como pela energia consumida e pelos elevados volumes de água residual gerados que necessitam de tratamento. Como tal, é predominante em países de alto PIB (definidos por um *GNI* per capita superior a 12 475 USD, segundo *World Bank*).

O Saneamento “*On Site*” é caracterizado por soluções descentralizadas em que os resíduos, maioritariamente excreta humana, são armazenados em compartimentos junto ao local onde foram gerados. Dá-se o nome de “interface” às tecnologias de armazenamento, como por exemplo fossas sépticas e latrinas. É importante referir que este tipo de saneamento pode ser realizado “a seco” (em interfaces como latrinas com pouca ou nenhuma entrada de água) ou “com água” (em interfaces como fossas sépticas, descritas no Anexo I). Idealmente, quando os compartimentos ficam cheios, as Lamas Fecais (LF) devem ser recolhidas e transportadas para Estações de Tratamento de Lamas Fecais (ETLF). Devido ao facto da implementação e operação de estruturas de Saneamento “*On Site*” ser mais económica quando comparado ao Saneamento Convencional, são predominantes em países de baixo e médio-baixo PIB (definidos por um *GNI* per capita inferior a 1 026 e 3 996 USD, respetivamente, segundo *World Bank*). O autor de [5] relata zonas no globo onde o custo do Saneamento Convencional é 5 vezes superior ao Saneamento “*On Site*”!

Apesar da percepção comum de que este tipo de sistemas apenas servem zonas rurais, é relatado por [5] que mais de 1 bilhão de pessoas em zonas urbanas são servidas por estas tecnologias. Em países de baixo/médio PIB, existem muitas cidades onde a maior parte da população é servida por tecnologias de Saneamento “On Site”, como por exemplo na Africa subsariana, onde 65-100% das pessoas em cidades são servidas por estes sistemas [5]. É importante referir que nem todas as interfaces de Saneamento “On Site” garantem o saneamento melhorado (como latrinas sem laje e defecação para baldes) e como tal, quando implementado, devem ser escolhidas tecnologias que o garantam.

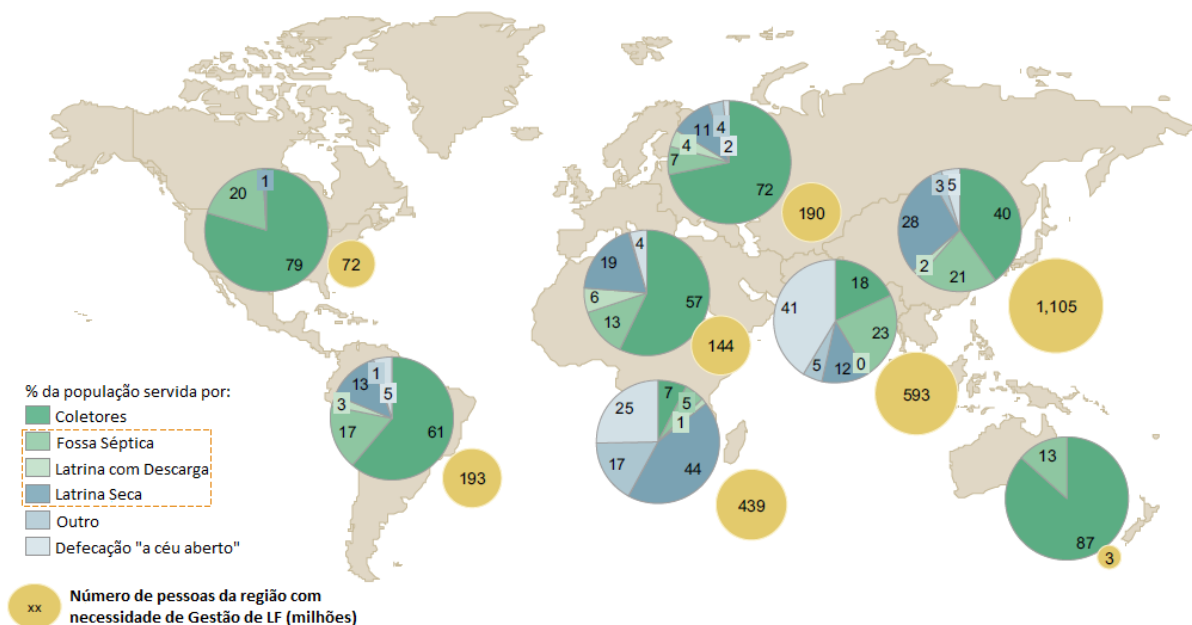


Figura 1-1: Visão geral dos métodos de saneamento praticado em várias partes do Mundo [adaptado de 5].

Tradicionalmente, o Saneamento Convencional é encarado como uma prioridade em termos de gestão e investimento sobre o Saneamento “On Site”, que é visto como uma solução temporária até que os coletores sejam construídos [48]. No entanto, a construção destes sistemas continua a ser tecnicamente e economicamente de muito difícil aplicação e, nos casos já aplicados, verifica-se que a maior parte das ETAR, em países de baixo/médio PIB, não apresentam funcionamento adequado [5]. Como resultado, os núcleos urbanos continuam a ser servidos por sistemas de Saneamento “On Site”, que, devido à falta de investimento, exibem inúmeras falhas nas suas redes de recolha, tratamento e deposição de LF. Adicionalmente, existem duas agravantes que preveem que estes sistemas sejam mais sobrecarregados no futuro:

- É relatada, de forma geral, uma rápida expansão destes núcleos urbanos;
- As práticas de defecação a “céu aberto” são predominantes em países de baixo/médio PIB (ver Figura 1-1) e como tal, para cumprir os pontos propostos pelos ODS e fornecer saneamento melhorado a essas comunidades, é previsível a aplicação de Saneamento “On Site”.

Em 2015 existiam 2,7 biliões de pessoas servidas por este tipo de saneamento e esse número é esperado crescer para 5 biliões em 2030 [5]. Torna-se, assim, evidente a necessidade de assumir o Saneamento “On Site” como uma prática recorrente e torná-lo uma prioridade em termos de investigação e investimento.

1.2 Gestão de Lamas Fecais em Países de Baixo/Médio PIB

Para o Saneamento “On Site” ser comparado ao Saneamento Convencional, não basta a implementação de interfaces que garantam o armazenamento das LF. Isto deve-se ao facto de não existir uma rede de coletores que encaminhe as lamas para uma estação de tratamento, quando os compartimentos ficam cheios. Como tal, torna-se necessária a implementação de uma cadeia de serviços associada ao Saneamento “On Site”.

Entende-se por Gestão de LF o armazenamento, transporte (incluindo recolha), tratamento e deposição final (com ou sem valorização) das lamas, como ilustrado na Figura 1-2.



Figura 1-2: Etapas na Gestão de Lamas Fecais [adaptado de 51].

Para cumprir os requisitos definidos pelo ponto 6 dos ODS e a rede de saneamento ser considerada segura, devem ser implementados os estágios exibidos na Figura 1.2. No entanto, estas práticas não são recorrentes nos países onde o Saneamento “On Site” é predominante.

Um estudo realizado em 39 cidades de países de baixo/médio PIB, revela que mais de 50% das LF geradas são descarregadas ilegalmente (Figura 1-3), por exemplo para canais abertos de água, zonas peri-urbanas e até mesmo em meios urbanos [14]. Outros estudos, como o relatado pelo autor de [47], estimam que, em alguns casos, este valor pode ser superior a 90%.



Figura 1-3: Descarga ilegal de LF nas periferias da cidade de Ouagadougou, Burkina Faso [46].

Enquanto existirem estas práticas, uma comunidade não deverá ser considerada servida de saneamento melhorado e livre de defecação “a céu aberto” [37]. Isto deve-se ao facto da descarga direta e não planeada no meio ambiente “trazer de volta” parte dos impactes inicialmente mitigados pela implementação das interfaces com tecnologias de saneamento melhorado.

A necessidade de intervenção é urgente, especialmente em núcleos urbanos onde a rápida expansão não é/foi devidamente acompanhada pela implementação de serviços e infraestruturas dedicadas à gestão de LF. Nestes casos, são geradas elevadas quantidades LF e o risco de exposição a patogénicos é muito alta.

Apesar dos autores de [5, 29, 35 e 48] relatarem falhas em diversas áreas que culminam numa Gestão de LF deficiente, nesta secção apenas são abordadas as Económicas e Institucionais/ Técnicas, visto serem as mais relevantes tendo em conta os objetivos da presente dissertação (definidos na secção 1.3). As restantes, encontram-se descritas no Anexo II.

Institucionais e Técnicas

Falhas nestas estruturas impedem a implementação de métodos sistemáticos e planeados que estimulem uma Gestão de LF segura. Geralmente, são relatadas duas situações: 1) inexistência de locais apropriados para o tratamento de LF; 2) são aplicados estágios de tratamento às LF, no entanto não existe um plano de deposição de LF.

Fatores Económicos

Apesar dos custos capitais destas redes serem, geralmente, cobertos pelo município ou governo central e encarados como “fundo perdido”, para a gestão de LF ser economicamente viável, é necessário cobrir os custos de toda a operação (recolha, transporte, tratamento, deposição, entre outros).

A cadeia de Gestão de LF tem quatro principais formas de entrada de capital: 1) tarifas de serviço (geralmente pagas pelos utilizadores); 2) impostos cobrados pelo governo; 3) subsídios ou financiamentos externos recebidos por instituições, fundos internacionais, entre outros; 4) receitas geradas pela comercialização dos produtos derivados de LF (no caso de valorização do resíduo) [37]. No entanto, são relatadas falhas em todos os quatro pontos:

- 1- Geralmente, os utilizadores não têm poder económico para pagar a tarifa de serviço imposta e por isso, optam por descargas ilegais [37].
- 2- Nos poucos casos em que o governo central cobra um imposto sobre o saneamento, na sua maioria, o dinheiro não é reinvestido. Segundo [37], são relatados casos que mesmo os custos capitais do Saneamento “*On Site*” não são cobertos pelo governo central, mas repartidos entre os utilizadores, companhias privadas de recolha e autoridades locais.
- 3- De forma geral, existem poucos subsídios e financiamentos atribuídos às redes de Saneamento “*On Site*”.
- 4- Na grande maioria dos casos, em países de baixo/médio PIB, não é realizada a valorização de LF e, por isso, não existe um retorno económico direto da comercialização dos produtos derivados.

Apesar de tradicionalmente serem encaradas como um resíduo sem valor, as LF exibem várias características que permitem a sua valorização que, a partir da aplicação de certos níveis de tratamento, é possível a sua “transformação” em produtos que tenham um valor de mercado

considerável. Neste contexto, a valorização de lamas pode assumir um papel relevante na mitigação das falhas descritas. O autor de [22] aponta que a comercialização de produtos derivados de LF possa estimular a implementação de cadeias de gestão de LF economicamente viáveis, através de fatores diretos e indiretos:

- **Diretos:** O retorno económico gerado através da venda dos produtos cobre parte dos custos de toda a operação.
- **Indiretos:** A existência de uma cadeia de gestão de LF planeada que culmine na comercialização de produtos com valor de mercado, estimule uma economia circular e mitigue impactos ambientais, pode atrair subsídios aos atores intervenientes e financiamentos externos, tanto no setor público como privado, e até mesmo de ONG [38].

Considerando que várias falhas na gestão de LF são atribuídas a fatores económicos, a valorização das lamas pode assumir um papel fulcral na implementação de sistemas seguros e planeados. Adicionalmente, a viabilidade económica da operação pode representar um estímulo para colmatar as restantes falhas (descritas no Anexo II) e introduzir o Saneamento “*On Site*” num foco de atenção e investimento de recursos.

Segundo [29], na grande maioria dos países de baixo/médio PIB, o potencial mercado da valorização das LF é inexplorado devido a praticas de descargas ilegais, deposição em aterros sanitários ou venda das lamas abaixo do seu valor. Por isso, é relevante a prática de um planeamento sistemático em que são considerados, de forma realística e consciente, os vários métodos possíveis de valorização.

1.3 Objetivos da Tese

O objetivo da tese é apresentar uma visão contemporânea da tecnologia de processamento de LF e Lamas de ETAR, com especial ênfase para as aplicáveis a países de baixo/médio PIB, em termos de tratamento e deposição final. Adicionalmente, é proposta uma árvore-de-decisão, tipificada em diversos fluxogramas em que é sugerido um ou mais esquemas de processamento, consoante o contexto de aplicação.

A presente dissertação propõe-se a explorar o seguinte problema: em fases iniciais do planeamento de uma intervenção nas etapas de tratamento e/ou deposição final de lamas, quais os métodos que devem ser considerados?

Existem duas principais situações abordadas: 1) inexistência de qualquer infraestrutura encarregue pelo seu processamento (tratamento e deposição); 2) existe uma infraestrutura encarregue pelo seu processamento, no entanto o tratamento e/ou deposição final é deficiente.

Neste contexto, é pretendido averiguar a aplicabilidade dos métodos que valorizem as lamas e ajudem a colmatar as falhas descritas na sua gestão, através de uma revisão da literatura.

É importante perceber que a construção dos fluxogramas tem como intuito servir de guia ao planeador, em fases iniciais do projeto, na seleção dos métodos a aplicar, com foco nas etapas de tratamento e deposição. As etapas de armazenamento e transporte são mencionadas quando existe uma ligação direta com a área de trabalho, contudo não são abordadas em detalhe.

Foi considerado pertinente a inclusão das lamas de ETAR nos objetivos do trabalho, dado que também existem sistemas de Saneamento Convencional em países de baixo/médio PIB (ainda que, geralmente,

representem uma minoria), em que também são relatadas falhas de processamento [5] e atendendo que é discutido o co-tratamento com LF.

Por outro lado, tendo em conta a elevada complexidade do tema, os seguintes pontos estão excluídos da área de trabalho, apesar de serem relevantes no contexto de tratamento e deposição final de lamas:

- **Decision-Makers:** estratégias para o envolvimento dos *decision-makers*, estrutura organizacional e licenciamento de produtos.
- **Modelos de Negócio:** estabelecimento de esquemas de negócio para a venda dos produtos derivados de LF. Apesar de serem mencionados em alguns casos de estudo, a descrição e análise destes esquemas em detalhe não é abordada.
- **Instrução da Equipa Técnica:** Na análise dos vários métodos de tratamento possíveis, é tido em conta o nível de especialização da equipa. Contudo, as estratégias para o seu treinamento e instrução é excluída da presente dissertação.
- **Educação do Consumidor:** o sucesso da comercialização de produtos derivados de LF, depende da aceitabilidade do produto por parte dos consumidores. Este é um fator tido em conta na dissertação, porém as estratégias de educação dos consumidores são excluídas da área de trabalho.
- **Seleção do local de Implementação:** o local de implementação da ETLF é determinante na otimização dos custos de transporte e na aplicabilidade de certos esquemas de tratamento, atentando à área disponível. Esta temática foi, no entanto, excluída dos objetivos.
- **Detalhes Técnicos e Logísticos:** o sucesso da operação das ETLF é dependente de um dimensionamento adequado dos seus elementos (órgãos de tratamento, tubagens entre outros). Adicionalmente, do ponto de vista económico, é importante a otimização de sistemas, tais como: disposição dos órgãos dentro da planta, distribuição do produto a ser comercializado, tirar partido da topografia da zona de implementação da ETLF para privilegiar o escoamento gravítico (quando existe escoamento de lamas dentro da planta), entre outros. Considerando que é pretendida uma visão mais geral do problema, estas temáticas são excluídas dos objetivos da dissertação.

1.4 Estrutura da Tese

A presente dissertação encontra-se organizada na seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Descrição e caracterização de LF e Lamas de ETAR;
- **Capítulo 3:** Revisão dos métodos de tratamento indicados para países de baixo/médio PIB. É apresentada uma breve descrição de cada método, a qualidade do produto final e os fatores relevantes para a sua aplicabilidade.
- **Capítulo 4:** Revisão dos métodos de deposição final indicados para países de baixo/médio PIB. É apresentada uma breve descrição de cada método, que tipo de tratamentos devem ser aplicados às lamas, fatores relevantes para a sua aplicabilidade e o impacte dos mesmos no contexto ambiental e socio-económico local.
- **Capítulo 5:** Apresentação dos fluxogramas que constituem a árvore-de-decisão proposta.
- **Capítulo 6:** Aplicação dos fluxogramas a dois casos de estudo.
- **Capítulo 7:** Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.

2. Lamas Fecais e Lamas de ETAR

2.1 O que são Lamas Fecais?

As LF são definidas pela matéria que é acumulada nos compartimentos de Saneamento “*On Site*”. São uma mistura de excreta humana (urina e fezes) e outras matérias, dependendo das práticas dos utilizadores, tais como:

- **Águas Pretas e Cinzentas:** Quando é utilizada água para efeitos de autoclismo, forma-se uma mistura com a excreta humana (Águas Pretas). Adicionalmente, existem casos em que águas provenientes de banhos, lavagem de loiça ou de outras atividades domésticas são encaminhadas para os compartimentos (Águas Cinzentas).
- **Sólidos usados para limpeza anal:** Dependendo dos costumes da população, sólidos usados para limpeza anal podem ser encaminhados para as fossas e latrinas. Exemplos são papéis, jornais, folhas, entre outros (Figura 2-1).
- **Outros sólidos e efluentes:** É recorrente a entrada de outros sólidos nos compartimentos, tais como sacos de plástico, fraldas, vidro, areias, resíduos alimentares, serradura, cinza, entre outros (Figura 2-1). Por outro lado, também podem ser descarregados efluentes potencialmente tóxicos, como produtos de limpeza agressivos. O autor de [14] relata que existem casos em que estes produtos foram descarregados nos compartimentos, com a crença inicial de reduzir os odores gerados, contudo, acabam por piorar a qualidade das LF e até mesmo na acumulação de odores. Práticas de encaminhamento de sólidos e efluentes (especialmente inorgânicos) para os compartimentos deve ser evitada pois, para além afetar negativamente a qualidade das LF (redução de biodegradabilidade, contaminação, entre outros), resultam numa taxa de enchimento superior dos mesmos.

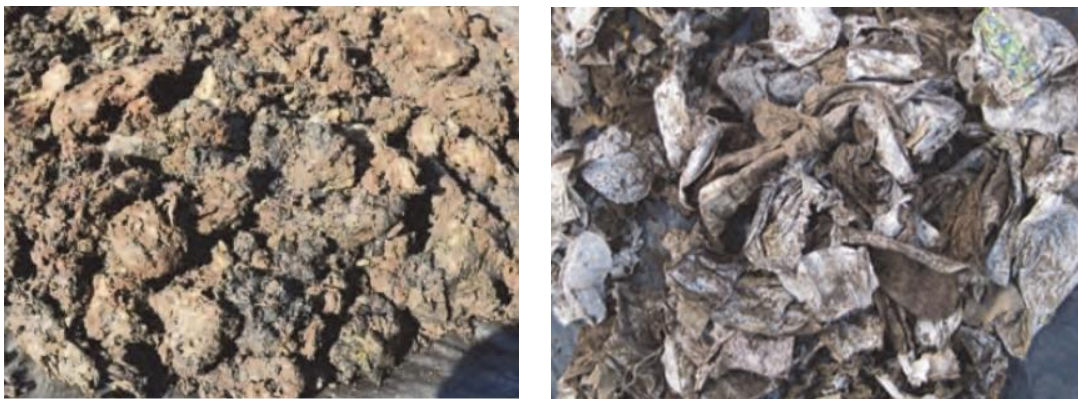


Figura 2-1: Sólidos removidos de tecnologias de Saneamento “*On Site*”, na África do Sul. 1 – Papeis. 2 – Plásticos, Fraldas, Produtos Menstruais, entre outros.

É importante mencionar que os compartimentos de Saneamento “*On Site*” podem ser usados para atividades comerciais ou industriais. As lamas geradas nestas atividades podem ter constituintes tóxicos (como metais pesados) e no caso da mistura com LF provenientes de habitações residenciais, pode resultar em contaminações. *Strndle et al* 2018 relata que na Estação de Tratamento de Lamas Fecais (ETLF) de Kampala, Uganda, 50% das lamas tratadas são provenientes de origens não residenciais. Como tal, em situações em que não é possível analisar as características das lamas em laboratório, é relevante apurar quais as suas origens.

2.2 O que são Lamas de ETAR?

As Lamas de ETAR resultam do processo de purificação dos efluentes residuais, apresentando constituintes similares às LF, porém com uma variabilidade das suas concentrações inferior. Adicionalmente, são, normalmente, livres de sólidos grosseiros, atendendo que os efluentes residuais são submetidos a processos de pré-tratamento, como gradagem, em fases preliminares do tratamento em ETAR.

Existem dois principais tipos de Lamas de ETAR, resultantes de dois estágios tradicionais do tratamento:

- **Tratamento Primário:** Decantação Primária do efluente residual onde se geram as Lamas Primárias (fase sólida que permanece no decantador).
- **Tratamento Secundário:** Conversão da matéria orgânica dissolvida no efluente (CBO) em sólidos sedimentáveis e posterior decantação dos mesmos. Neste processo são geradas as Lamas Secundárias ou Biológicas (fase sólida que permanece no decantador).

Uma configuração usual do tratamento em ETAR é a decantação primária + lamas ativadas, que é sumariamente descrita no Anexo X.

2.3 Características Físico-Químicas das Lamas

2.3.1 Sólidos e Teor de Humidade

Os Sólidos Totais (ST) presentes nas lamas podem ser agrupados em Sólidos Fixos Totais (SFT) e Sólidos Voláteis Totais (SVT) ou Sólidos Suspensos Totais (SST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Figura 2-2.

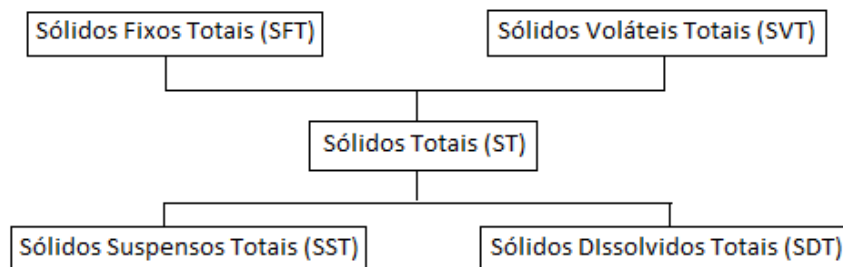


Figura 2-2: Tipos de Sólidos nas Lamas.

Os SFT e SVT podem ser distinguidos pelas suas propriedades químicas. Após a sua ignição a temperaturas a rondar os 500-550°C [6] existe uma fração que volatiliza (componente SVT) e um material que se transforma em cinzas após a combustão (componente SFT). Geralmente, os SFT representam a matéria inorgânica (estável), como minerais, metais, entre outros. Contrariamente, a componente SVT é volatilizada durante a ignição e representa a matéria orgânica (instável) presente. O rácio SVT/ST é muitas vezes utilizado para indicar a matéria orgânica presente nas lamas e o seu cariz biodegradável [5].

Os SST e SDT podem ser distinguidos pelas suas propriedades físicas, mais especificamente por filtração dos mesmos com uma abertura de malha de 0,45-2 µm [5]. Os SST são os sólidos que ficam retidos na malha e, por outro lado, os SDT são os sólidos que passam a malha, como matéria dissolvida ou partículas de dimensões coloidais [6]. Quando as características das lamas não permitem o escoamento por uma malha (geralmente alto teor de ST), estes indicadores não são reportados [5].

Valores Típicos

A Tabela 2-1 agrupa alguns valores encontrados na literatura para os teores de ST e rácio SVT/ST de LF e Lamas de ETAR. Dado que as LF podem ter origem em diversos tipos de interface, é relevante fazer uma distinção entre as mesmas, atendendo que se traduzem em lamas com características diferentes. Assim, na Tabela 2-1 são contempladas as interfaces, geralmente, consideradas mais relevantes na literatura - fossas sépticas e latrinas, devido a serem as mais comuns, e interfaces de WC públicos por terem uma taxa de enchimento consideravelmente superior às outras.

Tabela 2-1: ST e SVT em Lamas Fecais (várias origens) e em Lamas de ETAR.

Parâmetro	Unidade	Valor				Ref
		Fossa Séptica	WC Públicos	Latrina	ETAR	
ST	%	< 3	> 3,5	-		5
		< 3	> 3,5	3 - 20	1 - 9	10, 47
45-73		65-68	-		5	
45-73		70	45-60	60 - 80	10, 47	

É importante referir que na Tabela 2-1 não são contemplados todos os valores que as lamas podem assumir, especialmente no caso das LF, pelo que tem um intuito apenas comparativo. Um bom exemplo, é uma latrina com separação de urina (LSU), em que não exista entrada de águas pretas ou cinzentas, sendo expectável teor de ST das lamas seja superior a 20%. Segundo [14, 36] o teor de ST nas LF pode variar entre 0,5-40%, no entanto não é discriminado o tipo de interface.

Água nas LF

De forma quase inversamente proporcional aos ST, as lamas contêm água na sua constituição. Esta, é um dos seus principais constituintes e é normalmente apresentada sob a forma de percentagem de teor de humidade. Contudo, é importante perceber que a água se pode encontrar de formas diferentes nas lamas:

- **Água livre:** Água presente em superfície livre, sendo facilmente removível em processos de separação sólido-líquido. Geralmente, representa a maior fração da água em lamas não-tratadas [5].
- **Água intersticial:** Água presente dentro dos poros das lamas, porém ligada por forças capilares. A sua remoção é mais difícil quando comparada à água-livre, contudo mais fácil quando comparada à água ligada. A sua extração pode ser realizada através de mecanismos de evaporação ou por aplicação de forças mecânicas fortes (como prensas) [47].
- **Água de Superfície e Água Intracelular:** Água ligada à superfície de partículas (por adsorção) e água presente dentro dos microrganismos, respetivamente. Estes tipos de água estão associados a uma maior dificuldade na remoção, pelo que são, normalmente, removidos apenas por fenómenos de evaporação [22].

Os teores de ST e de Humidade são muito relevantes pois podem determinar a aplicação de certos métodos de tratamento, condicionamento, custos de transporte, bem como se a lamas se comportam como um líquido, semi-sólido ou sólido. Esta caracterização é feita com mais detalhe na secção 2.5.

2.3.2 Carência Química e Bioquímica de Oxigénio

A Carência Química de Oxigénio (CQO) expressa a quantidade de oxigénio necessária para oxidar um certo volume de matéria. Este, é um indicador importante pois no caso de uma descarga num corpo

de água, as substâncias oxidáveis entram em “competição” por oxigênio com a vida presente no ecossistema e em situações extremas, podem gerar condições anóxicas. À exceção de descargas ilegais, é incomum a descarga de lamas em corpos de água. No entanto, as escorrências (descritas na secção 3.10) resultantes do seu tratamento são, com alguma frequência, conduzidas a meios recetores líquidos, tornando este indicador relevante nessa matéria.

A Carência Bioquímica de Oxigênio (CBO) é a componente biológica da CQO e está geralmente associada à matéria orgânica presente nas lamas. Muitas vezes este indicador aparece sob a forma de CBO_5 , em mg/l, que representa a necessidade de oxigênio necessária para bio degradar um certo volume de matéria orgânica, durante 5 dias, no escuro, a 20 °C.

Com a relação destes dois indicadores, é possível estudar o grau de estabilização das lamas. Rácios de CQO/CBO baixos indicam elevadas concentrações de matéria orgânica e, de forma análoga, valores altos indicam concentrações reduzidas de matéria orgânica e consequente ocorrência de fenómenos de estabilização. Considerando que estes são potenciados pela idade das lamas, elevadas frequências de recolha (por exemplo WC públicos) traduzem-se em teores de CBO, CQO superiores e rácios CQO/CBO inferiores. Estes fenómenos são explicados em mais detalhe nas secções 3.2 e 3.5.1.

Valores Típicos

A Tabela 2-2 agrupa alguns valores encontrados na literatura de CQO, CBO e rácio CQO/CBO para LF de diferentes origens e Lamas de ETAR. À semelhança da tabela da secção anterior, esta apenas assume um valor comparativo pois nem todos os valores reais são contemplados.

Tabela 2-2: Valores Típicos de CQO, CBO e CQO/CBO para Lamas Fecais (várias Origens) e Lamas de ETAR.

Parâmetro	Unidade	Valor				Ref
		Fossa Séptica	WC Públicos	Latrina	ETAR	
CQO	mg/l	<1000	20 000 – 50 000	-	-	5
		7 800 - 13 500	49 000	-	-	41
		10 000	20 000-50 000	30 000-225 000	500 - 2500	47
CBO	mg/l	840 – 2 600	7 600	-	200 - 1000	5, 47
CQO/CBO	-	7,14	5	6 - 7	2,5	47
		5 – 10	2 - 5	-	-	74

2.3.3 Nutrientes

A concentração de nutrientes (Nitrogénio, Fósforo e Potássio) presente nas LF é, geralmente, superior quando comparada a Lamas de ETAR [47].

Por outro lado, considerando que 80-90% do nitrogénio, 50-65% do fósforo e 50-80% do potássio consumidos estão presentes na urina [5], LF provenientes de tecnologias em que exista separação de fezes e urina têm concentrações de nutrientes mais baixas quando comparadas a lamas provenientes de interfaces em que não exista separação.

O nitrogénio nas lamas pode tomar várias formas: Amônio, Amónia, Nitrato, Nitrito e formas orgânicas [5]. O Azoto *Kjeldahl* (TKN) é um indicador usado na literatura que engloba a soma das concentrações de nitrogénio sob a forma orgânica, amônio e amónia [5].

O fósforo pode encontrar-se nas lamas sob a forma de fosfato ou de ácido ortofosfórico, que, sendo formas inorgânicas, está imediatamente disponível para as plantas [5].

Os nutrientes são importantes para processos biológicos e como tal, a sua presença nas lamas pode representar uma mais-valia para uma possível valorização na aplicação no solo. Contudo, no caso de descarga para corpos de água (por exemplo, das escorrências resultantes de tratamentos), é importante a sua monitorização para prevenir fenómenos de eutrofização (Figura 2-3).



Figura 2-3: Rio eutrofizado derivado da descarga de LF e águas residuais, em Yaondé, Camarões [5].

Valores Típicos

A Tabela 2-3 exhibe valores para o TKN, Amónia e Fósforo encontrados na literatura para diferentes interfaces, para LF e lamas de ETAR.

Tabela 2-3: Valores Típicos para as concentrações de TKN, Amónia e Fosfora em Lamas Fecais (várias origens) e Lamas de ETAR.

Parâmetro	Unidade	Valor				Ref
		Fossa Séptica	WC Públicos	Latrina Simples	ETAR	
Amónia	mg/L	150-1 200	2 000 – 5 000	-	2 - 168	5
		120-1 200	2 000 – 5 000	2 000 - 9 000	30 - 70	47
		< 1 000	<5 000	-	-	33
TKN		1 000	3 400 -3 750	3 400 - 5000	-	47
Fósforo		150	400	450 - 500	9 - 63	5, 47

2.3.4 pH

O pH é um indicador importante que influencia várias reações químicas e processos biológicos [14]. As LF têm, geralmente, valores entre 6-9 (a 25°C), contudo podem apresentar valores entre 1.5-12.6. Valores fora do intervalo 6 a 9 podem ser prejudiciais para certos processos biológicos como co-compostagem, digestão anaeróbica e produção de metano [5]. Estes casos podem indicar contaminações, presença de efluentes/ lamas industriais ou a presença de substâncias tóxicas [5]. As Lamas de ETAR, segundo [10], apresentam valores de, geralmente, entre 5-8.

Adicionalmente, no caso de valorização em aplicação no solo, é importante que o pH das lamas seja adequado ao pH dos solos.

2.3.5 Metais

As LF contêm, geralmente, metais pesados na sua composição que importa quantificar devido ao facto de serem substâncias conservativas e poderem ter impactos negativos nos métodos de tratamento e/ou deposição (especialmente no caso de aplicação de lamas no solo).

Apesar de alguns metais, como o ferro, zinco e cromo serem importantes para o crescimento de microrganismos, presentes em certos tratamentos, e até mesmo para o crescimento vegetal e animal, concentrações elevadas podem revelar-se tóxicas [14]. Por outro lado, existem metais que mesmo em baixas concentrações são altamente prejudiciais tais como o cádmio mercúrios, entre outros.

Vários autores na literatura relatam concentrações reduzidas de metais pesados em LF em comparação a lamas de ETAR, no entanto, no caso de possíveis contaminações industriais, ou mistura de lamas, é recomendável um maior nível de monitorização [3, 47].

2.3.6 Propriedades Mecânicas

Propriedades como densidade e diâmetro médio das partículas são importantes para caracterizar a capacidade de escoamento das lamas e consequente aplicabilidade de métodos de tratamento.

Adicionalmente, é relevante caracterizar a capacidade de separação sólido-líquido das lamas, que pode ser quantificado através de ensaios de decantação em laboratório - *jar-tests*. Lamas com um certo grau de estabilização (menores concentrações de SVT) tendem a ter uma maior capacidade quando comparadas a lamas frescas ou não estabilizadas. Esta distinção é discutida em mais detalhe na secção 3.4.1.

2.3.7 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas, como calor específico, condutividade, difusividade térmica e o poder calorífico, são especialmente importantes para métodos de altas temperaturas e para valorização energética [14].

No âmbito da presente dissertação, é relevante destacar o poder calorífico, visto estar diretamente associado à possível valorização energética das lamas. Este parâmetro quantifica a energia que, teoricamente, pode ser libertada por massa de ST secos, geralmente, expressa em MJ/Kg.

É importante perceber que a energia presente nas lamas está maioritariamente “armazenada” sob a forma de matéria volátil e carbono fixo (fração carbónica dos SFT) [22]. A restante matéria (inorgânica) forma cinzas e como tal, não contribui para o poder calorífico. Segundo [72], o poder calorífico das lamas está fortemente ligado à sua concentração de sólidos voláteis, visto a sua concentração de carbono fixo (entre 8-9%) ser, por norma, baixa quando comparado a outros tipos de biomassa (por exemplo madeira que tem entre 40-45%) [70].

Neste contexto, o grau de estabilização das lamas (associado a reduções dos sólidos voláteis), é um fator que tem um impacto considerável no seu poder calorífico e consequentemente, deve ser tido em conta na valorização energética. Segundo [15] e [64], o grau de estabilização pode resultar em reduções do poder calorífico das lamas na ordem dos 25-40% e 50%, respetivamente, face ao seu valor inicial. Os fenómenos de estabilização são descritos em detalhe nas secções 3.2 e 3.5.1. Adicionalmente, qualquer adição de matéria inorgânica às lamas (como areias) resulta numa diminuição do seu poder calorífico.

Um estudo realizado pelos autores de [20], compilou vários valores do poder calorífico de LF e concluiu que este, geralmente, toma valores de entre 8,3-19,1 MJ/kg. Por outro lado, em [15] foi estudado o poder calorífico de LF frescas (pouco grau de estabilização) de 3 origens diferentes, Gana, Senegal e Uganda, em que os resultados obtidos foram 19,1, 16,6 e 16,2 MJ/kg, respetivamente. Os mesmos autores sugerem que este parâmetro em LF frescas é pouco sensível a diferentes fontes, indicando, portanto, que o conhecimento adquirido pode ser extrapolado para outras cidades.

Segundo [30], as Lamas de ETAR têm um poder calorífico de 7-14,4 MJ/kg.

2.3.8 Patogénicos

Grande parte da composição das lamas (especialmente a sólida) é composta por excreta humana. Assim, lamas não-tratadas estão associadas, geralmente, a elevadas concentrações de agentes patogénicos, especialmente as LF [5].

Os agentes patogénicos podem ser distinguidos em bactérias, protozoa, helmintos e vírus, sendo o controle da sua carga nas lamas crucial, uma vez que exposição aos mesmos representa um risco à saúde pública. Os principais patogénicos presentes lamas e as suas respetivas doenças e sintomas, encontram-se descritos no Anexo III. Considerando que os métodos de valorização envolvem manuseamento das lamas e que, na valorização agrícola, existe entrada direta na cadeia alimentar, a higienização adequada do produto final deve ser garantida.

Usualmente, o indicador utilizado para avaliar a presença destes agentes são os ovos Helmintos, mais especificamente *Nematodes Ascaris*. Isto deve-se ao facto de serem os mais resilientes quando comparados aos de outras categorias e como tal, concentrações seguras dos mesmos indicam concentrações seguras dos restantes [33].

Valores Típicos

Os valores típicos das concentrações de ovos Helmintos para diferentes tipos de lamas constam na tabela 2.4.

Tabela 2-4: Valores Típicos para as concentrações de Ovos Helmintos nas Lamas Fecais (várias origens) e Lamas de ETAR.

Parâmetro	Unidade	Valor				Ref
		Fossa Séptica	WC Públicos	Latrina	ETAR	
Ovos Helmintos	nº / L	600-16000	2500-60000	-	-	5
		4000	20000-60000	30000-40000	300 - 2000	47

2.3.9 Poluentes Industriais

Para além dos metais pesados, mencionados na secção 2.3.5, existem outros possíveis poluentes nas lamas, que podem estar associadas a descargas industriais ou a químicos que deram entrada nos compartimentos, como cianetos, fenóis entre outros [3].

Segundo [38], geralmente, as LF têm uma menor concentração de poluentes químicos quando comparadas a lamas de ETAR.

No entanto, caso exista mistura de efluentes/lamas industriais com LF é importante perceber se a presença destes poluentes pode ser prejudicial para os métodos de tratamentos (especialmente os que se baseiam em mecanismos biológicos) e/ou para a deposição final (principalmente aplicação no solo).

2.4 Variabilidade das Lamas Fecais

Como é possível aferir ao longo da secção 2.3, as LF, ao contrário das Lamas de ETAR, apresentam uma elevada variabilidade nas suas características e na concentração dos seus constituintes. Isto deve-se ao facto de existirem fatores a macro escala, que têm um grande impacto nas mesmas, como:

- **Tipo de Interface:** é relevante distinguir as interfaces que “operam” sob o sistema de saneamento “a seco ou com água”. A entrada de água nos compartimentos é determinante na concentração das cargas poluentes (derivado da diluição) e pela forma como as lamas se compartam (sólido, semissólido ou líquido), atendo ao teor de humidade. Adicionalmente, a frequência de recolha das lamas nas interfaces tem impacto no seu grau de estabilização e consequentemente no teor de sólidos voláteis e poder calorífico. Um bom exemplo são as fossas sépticas que estão associadas a frequências de recolha na ordem dos anos e como tal, as lamas provenientes das mesmas têm, geralmente, um grau de estabilização considerável. Estes fenómenos são descritos nas secções 3.2 e 3.5.1.
- **Tipo de Utilização:** Interfaces partilhadas (como latrinas de casas-de-banho públicas), especialmente em núcleos urbanos, tendem a ter uma taxa de enchimento superior quando comparado a interfaces privadas. Este é um fator relevante na frequência de recolha e como tal, no grau de estabilização.
- **Hábitos dos Utilizadores:** O tipo de matéria que dá entrada nos compartimentos, como por exemplo águas pretas ou cinzentas, sólidos grosseiros, entre outros, está fortemente dependente dos hábitos dos utilizados. Adicionalmente, os hábitos alimentares podem ter impacto na qualidade e quantidade da matéria fecal gerada [5].

Os fatores de macro escala encontram-se descritos em mais detalhe no Anexo IV.

Por outro lado, é importante mencionar que as LF são uma matéria heterogénea e por isso, a sua variabilidade também é verificada em microescala. O autor de [14], por exemplo, relata que foram obtidos resultados consideravelmente diferentes para amostras recolhidas na mesma ETLF.

A alta variabilidade das LF é um fator relevante na seleção e operação dos possíveis métodos de tratamento e deposição.

2.5 Tipos de Lamas Fecais

Devido aos fatores mencionados na secção 2.4, é relevante distinguir vários tipos de LF. Na presente dissertação foram identificadas três formas relevantes de as classificar, com base no teor de ST, na sua força e na sua idade/grau de estabilização.

Teor de ST

O autor de [14] sugere dividir as LF em quatro categorias, com base no seu teor de humidade/concentração de ST, que determinam a forma como estas se comportam:

- **Lamas Fecais Líquidas:** $ST < 5\%$. Forma líquida, semelhante ao efluente residual gerado no Saneamento Convencional. Não apresentam problemas num sistema bombeado, tipicamente originadas em interfaces com elevadas entradas de águas pretas e cinzentas, como fossas sépticas [14].
- **Lamas Fecais Lamacentas:** $5\% < ST < 15\%$. Líquido mais espesso, ainda bombeável, contudo não estruturalmente indicado para uma remoção manual (por exemplo com pás). Tipicamente

são originadas em tecnologias onde existe alguma entrada de águas cinzentas ou infiltração, como latrinas (melhoradas ou não melhoradas). Adicionalmente, este tipo de lamas também pode ter origem de zonas inferiores de fossas sépticas, devido a fenómenos de espessamento [14].

- **Lamas Fecais Semi-Sólidas:** $15\% < ST < 25\%$. Forma semi-sólida, parecida com uma espécie de pasta. Não bombeável, contudo em concentrações de ST já indicada para remoção manual. Este tipo de lamas tem origem em interfaces com pouca ou nenhuma entrada de água preta ou cinzenta, como latrinas (ecológicas, melhoradas ou não-melhoradas), fossas alternas e tecnologias de desidratação das lamas [14] (abordadas no capítulo 3).
- **Lamas Fecais Sólidas:** $(VT) > 25\%$. Forma sólida, com concentrações baixas de água-livre. Indicada para remoção manual. Geralmente provenientes de latrinas com separação de urina (LSU) ou resultantes de estágios de tratamento de desidratação das lamas [14].

Idade/ grau de estabilização

- **Lamas Frescas:** São lamas com pouca idade e reduzido grau de estabilização. São normalmente provenientes de interfaces com alta frequência de recolha, como latrinas de casas-de-banho públicas.
- **Lamas Digeridas:** São lamas com alguma/muita idade (por vezes 5 ou 6 anos) e/ou com um certo grau de estabilização. São, normalmente, provenientes de fossas sépticas ou outras tecnologias em que a frequência de recolha é na ordem dos anos. Adicionalmente, certos esquemas de tratamento em ETLF têm como objetivo a estabilização das lamas (secção 3.5) e, como tal, “produzem” lamas digeridas.

Como mencionado, o grau de estabilização tende a facilitar a separação sólido-líquido, no entanto tem um impacto negativo no poder calorífico (menor concentração de sólidos voláteis). A Tabela 2-5 apresenta valores típicos para estes tipos de lamas.

Carga

As LF podem ser distinguidas consoante a carga poluente. Por este termo entende-se a sua concentração de CQO e Nitrogénio total [5]. LF com altos, médios e baixos valores destes indicadores podem ser classificados como lamas com alta, média e baixa carga, respetivamente. Esta distinção é importante para alguns métodos de tratamento, especialmente para o co-tratamento com águas residuais (descrito na secção 3.11). Tendencialmente, LF com elevados teores de ST (teor de humidade reduzido) tendem a ter uma carga poluente maior, devido à menor diluição. A Tabela 2-5 apresenta valores típicos para estes tipos de lamas.

Tabela 2-5: Valores típicos das concentrações de CQO, N total e ST consoante a carga e o grau de estabilização de Lamas Fecais. (adaptado de [38]).

Tipo	Carga	CQO (mg/l)	N total (mg/l)	ST (mg/l)
Frescas	Alta	250 000	5 000	100 000
	Média	65 000	3 400	53 000
	Baixa	10 000	2 000	7 000
Digeridas	Alta	90 000	1 500	45 000
	Média	45 000	400	25 000
	Baixa	3 000	200	1 500

3. Tratamento de Lamas

3.1 Metodologia e Objetivos

Neste capítulo são abordadas várias opções de tratamento de lamas, indicadas para países de baixo/médio PIB. O critério de seleção das tecnologias foi: média/elevada facilidade de implementação; reduzido/médio custo capital e operacional; competências técnicas reduzidas/médias para a sua operação; tecnologia bem estabelecida. Os métodos de incineração e secagem térmica (discutidos nas secções 3.8.2 e 3.4.3.5, respetivamente) não se enquadram nos critérios mencionados, no entanto a sua discussão foi considerada relevante.

O objetivo do capítulo é apresentar uma revisão dos possíveis métodos de tratamento de lamas, indicando uma breve descrição do método, o impacte que têm na qualidade das lamas e quais os fatores relevantes para a sua aplicabilidade.

Como mencionado na secção 1.3, um dos objetivos da presente dissertação é fazer uma revisão dos métodos de tratamentos de LF e de lamas ETAR com o intuito orientar, em fases iniciais do projeto, a seleção de tecnologias a aplicar. Como tal, pormenores técnicos relacionados com a implementação e dimensionamento dos processos de tratamento não serão apresentados.

Este capítulo tem por objetivo apenas discutir pontos relevantes na temática do tratamento das lamas, pelo que fatores relacionados com a deposição tais como procura de produto, aceitabilidade de produto, entre outras, apenas são abordados no capítulo 4.

3.2 Principais Objetivos de Tratamento

Como descrito no capítulo 2, as lamas têm características e constituintes que são benéficas para a sua valorização (como poder calorífico e teor de nutrientes), no entanto, têm outras que tornam o seu manuseamento e deposição final inseguro e/ou inviável (como patogénicos, excesso de teor de humidade). Como tal, o intuito de aplicação dos métodos de tratamento é reduzir/eliminar as características e constituintes que dificultem ou inviabilizem a sua deposição final e, sempre que possível, que preservem/estimulem as que contribuem para a viabilização da sua valorização.

Antes de abordar os vários métodos de tratamento, é importante perceber os seus principais objetivos (Redução de Teor de Humidade, Estabilização da Matéria Orgânica e Higienização), que se descrevem nos seguintes parágrafos.

Redução do Teor de Humidade

As lamas não-tratadas têm elevados teores de humidade na sua composição que representam grande parte do seu volume total (especialmente as lamas líquidas). A Figura 3-1 exibe uma visualização do volume total das lamas em função do seu teor de água, para um certo volume fixo de ST.

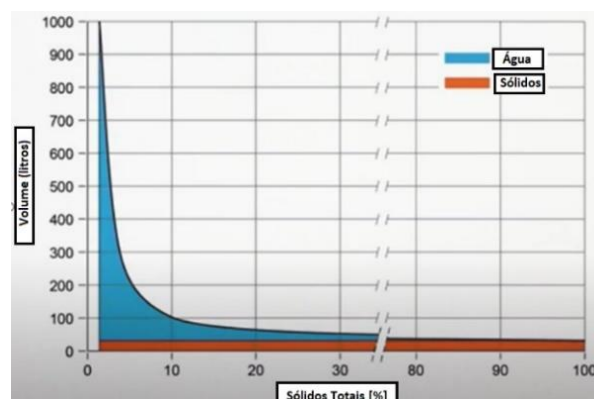


Figura 3-1: Variação do volume total das Lamas em função do seu teor de humidade [adaptado de EAWAG].

Como é possível aferir da imagem, altas concentrações de água nas lamas podem ser muito significativas no seu volume total (especialmente em lamas líquidas). Este fator causa dois principais problemas na sua gestão:

- **Custos:** Considerando que o volume total das lamas é consideravelmente maior quando comparado ao seu volume seco, é desejável reduzir o seu teor de humidade e, conseqüentemente, reduzir os custos de transporte e de tratamento. Por exemplo, lamas cuja sua concentração de ST aumente de 1% para 2%, têm uma redução de volume para aproximadamente metade, o que é muito significativo [1].
- **Aplicabilidade:** Muitos processos de tratamento e deposição final das lamas, requerem um certo valor de teor de humidade para que sejam aplicáveis e/ou economicamente viáveis. Exemplos são a Co-Compostagem, Carbonização e Incineração. Os mesmos serão abordados nas seguintes secções.

Estabilização e Higienização

As lamas têm, geralmente, concentrações elevadas de matéria orgânica (CBO ou SVT) e de agentes patogénicos (especialmente as LF). Segundo [41], estes indicadores podem ser entre 10-100 vezes superiores quando comparados aos das águas residuais.

Como o nome indica, a estabilização das lamas tem como objetivo estabilizar a sua matéria orgânica, geralmente através da transformação de cadeias moleculares complexas em compostos mais simples. A estabilização está associada à diminuição da concentração de CBO, SVT, carga patogénica e à redução de odores.

A estabilização da matéria orgânica assume especial relevância no aumento da capacidade de separação sólido-líquido e, como mencionado na secção 2.3.2, é relevante na descarga de efluentes (geralmente efluentes de tratamentos) para corpos de água. Adicionalmente, como descrito na secção 2.3.7, em casos de valorização energética, a estabilização apenas deve ser realizada quando necessário, atendendo à redução da matéria volátil e conseqüente diminuição do poder calorífico.

Por outro lado, a redução da carga patogénica é crucial para a proteção da saúde pública e, conseqüentemente, para a aplicação de certos métodos de deposição final em que seja expectável contacto humano. Assim, o nível de redução deve ser baseado no grau de contacto previsto entre as lamas tratadas e os humanos [77]. Por exemplo, a concentração de patogénicos considerada segura para a aplicação em solo agrícola deve ser mais restrita quando comparada com a aplicação em solo não-agrícola.

Como será discutido neste capítulo, existem situações em que os métodos de estabilização não são suficientes para garantir a redução da carga patogénica para os valores pretendidos. Neste contexto, é relevante distinguir a Higienização das lamas, que são processos concebidos especificamente para a redução da carga patogénica. De forma geral, as principais formas de redução têm por base a exposição à radiação UV, aumento de pH, exposição a altas temperaturas e armazenamento prolongado/decaimento natural das populações [5, 47, 55].

3.3 Pré-Tratamento

3.3.1 Princípios

Os processos de pré-tratamento são os primeiros a ser aplicados na ETLF, com o intuito de prevenir avarias, melhorar a eficiência nos tratamentos a jusante e melhorar a qualidade das lamas. Para tal, estes processos visam, sobretudo, à remoção de sólidos grosseiros e/ou de areias e à equalização e homogeneização de caudal.

Ao selecionar os processos de pré-tratamento é importante lembrar que as lamas podem ser descarregadas na ETLF sob a forma líquida (com escoamento) ou sólida (sem escoamento).

3.3.2 Sólidos

Como mencionado no capítulo 2, as LF são compostas pela matéria que dá entrada nos compartimentos de Saneamento “*On Site*” constituindo, geralmente, sólidos grosseiros. Apesar de na etapa do esvaziamento dos compartimentos, poder existir algum nível de remoção, quando as lamas são descarregadas na ETLF têm, geralmente, quantidades significativas destes sólidos [43]. Para a sua remoção é recomendável aplicar processos de gradagem.

Relativamente às lamas de ETAR, estes processos são normalmente aplicados ao efluente residual, em etapas iniciais no tratamento, pelo que as lamas já se encontram livres destes tipos de sólidos.

Gradagem

Remoção de sólidos de maior dimensão como trapos, papeis, garrafas, entre outros [2]. Quando as lamas são: 1) “tratadas” como um líquido, a gradagem é, geralmente, realizada por escoamento através de uma malha; 2) “tratadas” como um sólido, a gradagem é, geralmente, realizada manualmente ou, quando o custo-benefício o justifica, mecanicamente (geralmente em situações de média/grande escala).

A remoção destes sólidos é importante visto a sua presença poder interferir negativamente com a eficiência dos tratamentos a jusante, com qualidade do produto final e/ou originar fenómenos de entupimento nas tubagens, bem como danificar sistemas de bombagem.

Desarenação

Remoção de sólidos de menores dimensões como areias, cascas de ovo, sementes, entre outros [2]. Estes processos estão bem estabelecidos para efluentes residuais, no entanto a sua aplicação a LF permanece um desafio [43]. Isto deve-se ao facto de os sistemas usados em ETAR tolerarem poucas variações de caudal, pelo que não aparentam ser uma boa solução para LF. Segundo [43], a desarenação apenas deve ser considerada em ETLF de grande escala que tenham órgãos “fechados”, tais como desidratação mecânica ou reatores de biogás, descritos nas secções 3.4.3.4 e 3.5.1.

A remoção destes sólidos é relevante para: prevenir desgaste nos órgãos, tubagens, bombas, entre outros; prevenir a sua acumulação nos órgãos e conseqüente diminuição do volume útil de tratamento; e evitar a redução do poder calorífico das lamas devido à redução de matéria inorgânica (areias).

Os sólidos resgatados nos processos de gradagem e/ou desarenação contêm, geralmente, altas quantidades de patogénicos, pelo que devem ser encaminhados para aterro sanitário [5].

3.3.3 Outros Processos

Outros possíveis processos de pré-tratamento, utilizados com menos frequência incluem:

- **Homogeneização e Equalização:** Mistura de lamas e equalização de caudal a montante dos órgãos de tratamento, com o intuito de evitar elevados picos de cargas poluentes. Adicionalmente, pode ser benéfico a mistura de lamas digeridas com lamas frescas para melhorar a sua capacidade de separação sólido-líquido.
- **Flotação:** Remoção de gorduras e outra matéria flutuante presentes nas lamas (por flotação).

3.4 Redução do Teor de Humidade

3.4.1 Princípios

Nesta secção são abordados métodos de espessamento e desidratação, que têm como objetivo reduzir o teor de humidade das lamas.

A redução do teor de humidade das lamas é um processo complexo devido aos vários tipos de água que podem estar na sua constituição (secção 2.3.1), e devido ao facto da sua capacidade de separação sólido-líquido ser dependente do seu grau de estabilização [47].

A separação sólido-líquido pode ser definida como a remoção de água livre e é, geralmente, realizada por processos de espessamento. Como mencionado no capítulo 2, lamas digeridas tendem a exibir melhor performance quando comparadas a lamas frescas e como tal, a aplicação de tratamentos que envolvam a remoção de água-livre, geralmente, não é indicada para de lamas frescas. Existem três principais soluções para contrariar esta diversidade: 1) mistura das lamas frescas com lamas digeridas em rácios de 1:2 ou 1:3, respetivamente [41]; 2) submeter as lamas frescas a processos de estabilização a montante; 3) adição de condicionadores (secção 3.4.4).

Devido ao facto de a concentração de ST das lamas espessadas ser geralmente entre 5-10% (em casos excecionais 15%), estes processos apenas devem ser considerados para LF líquidas e em alguns casos lamacentas e para lamas de ETAR com teores de ST reduzidos. Existem três principais tecnologias de espessamento, que serão abordadas nesta secção: Tanques de Espessamento; Lagoas de Espessamento; e Espessamento Mecânico.

Por outro lado, os métodos de desidratação de lamas, para além da remoção da água-livre, têm a capacidade de remoção da água intersticial, de superfície e intracelular. De forma geral, estes métodos requerem mais recursos para reduzir o teor de humidade das lamas (maioritariamente necessidades energéticas ou área de implementação) quando comparados com os métodos de espessamento, contudo a capacidade de redução é consideravelmente superior. Os métodos de desidratação abordados nesta secção são: Leitos de Secagem; Leitos de Secagem Plantados; Secagem Solar, Desidratação Mecânica; Secagem Térmica.

Os processos de espessamento devem ser aplicados a montante dos processos de desidratação, quando o custo-benefício da remoção de água-livre é mais benéfico, derivado da sua implementação.

3.4.2 Espessamento

3.4.2.1 Espessamento Gravítico

Como o nome indica, o espessamento gravítico tem por objetivo o espessamento de lamas por ação da força da gravidade. Existem dois principais sistemas - Tanques de Espessamento e Espessadores Gravíticos.

Tanques de Espessamento

Os tanques de espessamento são um método simples para o espessamento das lamas, devido ao facto de se basearem na ação da força da gravidade e da carga hidráulica imposta pelas próprias lamas para promover a separação sólido-líquido.

Geralmente, são tanques com uma forma retangular (comparável a uma fossa séptica de maiores dimensões) onde: as lamas são alimentadas numa extremidade do tanque, sendo imposto um tempo de retenção hidráulico (TRH) que permite a que parte dos SST se acumulem na zona inferior. As escorrências escoam para o exterior do tanque, na extremidade oposta à alimentação; e, em alguns casos, forma-se uma camada de gorduras na parte superior (Figura 3-2).

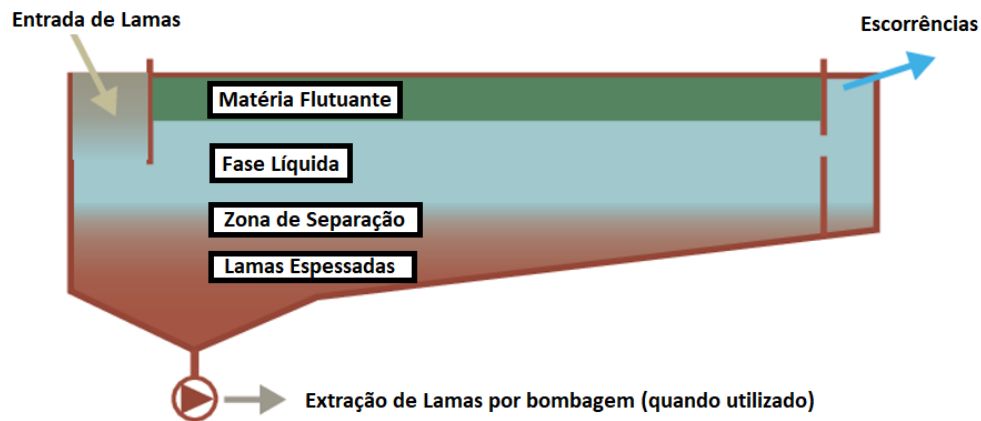


Figura 3-2: Tanque de Espessamento, adaptado de [5].

Os valores do TRH são geralmente entre 1-2 dias, embora dependendo das características das lamas, escala de operação e objetivos de tratamento possam chegar a 14 dias [9].

Devido ao facto de existir um gradiente vertical de carga hidráulica no sistema, formam-se as camadas descritas na Figura 3-2 e as lamas depositadas na zona inferior do tanque têm concentrações superiores de ST, quando comparadas com camadas superiores.

A remoção das lamas pode operar em regime contínuo ou cíclico. Apesar do sistema de operação contínuo trazer vantagens a nível logístico, está associado a custos superiores devido à maior complexidade de sistemas de remoção das lamas espessadas [9]. Assim, geralmente, é utilizado o sistema de operação cíclica, em países de baixo/médio PIB.

Espessadores Gravíticos

Existe outro tipo de espessadores, amplamente usados em ETAR, que também utilizam os mesmos princípios dos tanques de espessamento – os espessadores gravíticos. A diferença destes sistemas é o facto de serem, geralmente, circulares e terem o abastecimento de lamas pelo eixo central [3]. Adicionalmente, o fundo dos mesmos é cónico (semelhantes a um tanque de sedimentação) e equipado com um sistema rotativo de remoção de lamas. Os espessadores gravíticos operam, geralmente, em modo contínuo.

Qualidade do Produto Final

Para LF, em tanques de espessamento, o teor ST ronda 2-6%, com TRH de 1 a 2 dias, podendo atingir 15%, para TRH de até 4 semanas [9]. Para lamas de ETAR, em espessadores gravíticos, o teor de ST ronda, para lamas primárias e secundárias, 5-10% e 2-3%, respetivamente [10].

Aplicabilidade

Os tanques de espessamento são, geralmente, aplicados em ETLF de média/grande escala em que é pretendida a redução do teor de humidade de lamas líquidas (com concentrações de ST inferiores a 5%). Adicionalmente, como mencionado em 3.4.1, as lamas devem ter um grau de estabilização indicado para a separação sólido-líquido.

Em alguns casos, tendencialmente em ETLF centralizadas, pode ser vantajoso a aplicação de espessadores gravíticos. Isto deve-se ao facto de operarem em modo contínuo e a capacidade de processamento ser, geralmente, superior quando comparada com a dos tanques de espessamento [43]. No entanto, a operação e manutenção dos mesmos é mais complexa (o que exige mais competências técnicas) e os seus custos operacionais são superiores.

Caso seja planeado o tratamento posterior das lamas em leitos de secagem/ leitos plantados (descritos na secção 3.4.3.1. e 3.4.3.2, respetivamente), deve ser feita uma comparação do custo-benefício entre as opções: 1) espessamento + leitos secagem/plantados; ou 2) descarga direta nos leitos de secagem ou plantados. Esta comparação é pertinente devido ao facto da opção 1, geralmente, estar associada a investimentos inferiores, mas representar custos operacionais superiores [42], atendendo aos gastos energéticos dos tanques de espessamento (segundo [9] entre 0-20kWh por tonelada de ST) e aos elevados custos de manutenção [42]. Importante mencionar que na comparação das hipóteses também deve ser avaliado o impacte na carga de sólidos e duração dos ciclos de tratamento nos leitos.

De forma geral, quando é vantajoso aplicar processos de espessamento, os métodos gravíticos são preferíveis (especialmente os tanques de espessamento), uma vez que os seus custos de implementação/operação e requisitos de competências técnicas são baixos. Existem, no entanto, dois principais fatores a ter em conta no planeamento:

- Os requisitos de área são significativos, segundo [9], cerca de $0,006 \text{ m}^2/\text{hab}$ para tanques de espessamento;
- Caso seja previsto desidratação mecânica (secção 3.4.3.4) existem sistemas de espessamento/desidratação que podem não ser compatíveis com o espessamento gravítico.

3.4.2.2 Lagoas de Espessamento/Anaeróbias

As Lagoas de Espessamento/Anaeróbias têm como principais objetivos a separação sólido-líquido e a estabilização das lamas.

Estes sistemas consistem numa lagoa impermeabilizada, com geralmente 3-5 m de profundidade [5], onde as LF líquidas são descarregadas (Figura 3-3). De forma análoga aos Tanques de Espessamento, é imposto um TRH, que permite a deposição de parte dos SST e conseqüentemente a separação sólido-líquido. O gradiente de carga hidráulica estimula o espessamento das lamas em zonas mais profundas.

O tempo de retenção das lamas é na ordem dos meses ou anos (dependendo do dimensionamento, características das lamas e objetivos de tratamento), em que devido às condições anaeróbicas geradas no fundo da lagoa, permitem a ocorrência natural de digestão e, conseqüentemente, a estabilização das lamas. A Digestão Anaeróbica é descrita em mais detalhe na secção 3.5.1.



Figura 3-3: Possível configuração de uma lagoa de espessamento/anaeróbica, adaptado de [90].

A alimentação da(s) lagoa(s) opera de forma contínua, sendo, geralmente, interrompida para a remoção das lamas, idealmente quando a camada atinge valores a rondar os 50 cm [41]. Desta forma, é garantido que não exista acumulação excessiva das lamas e conseqüentes impactes negativos na eficiência de tratamento. Nestas situações, o efluente é, geralmente, dirigido para outra lagoa, com o intuito de operação intermitente.

As lamas espessadas podem: 1) ser encaminhadas para outro processo de tratamento ou deposição (geralmente bombeadas); 2) deixadas a desidratar ao sol, no fundo da lagoa, até valores de 20-25% ST

(à semelhança dos leitos de secagem solar, descritos na secção 3.4.3.3), em que se comportam como um sólido e como tal, são removidas manual ou mecanicamente [41]. A grande desvantagem deste método é a eventual ocorrência de precipitação, aliado à inexistência de um sistema de percolação, atendendo à impermeabilização da lagoa.

Qualidade do Produto Final

Geralmente, o teor de ST das lamas tratadas ronda os 10% [43], no entanto existem casos em que, após a remoção da fase líquida, as lamas ficam a secar no fundo das lagoas (de forma semelhante aos leitos de secagem solar), onde podem permanecer até teores de ST a rondar os 25-30% [84].

Não é claro na literatura efeitos na redução do poder calorífico, atendendo à digestão das lamas e consequente redução dos sólidos voláteis.

Aplicabilidade

As Lagoas de Espessamento são um método de fácil implementação, com custos associados reduzidos e que requer pouca qualificação da equipa técnica para a sua operação e manutenção. As maiores desvantagens estão associadas aos elevados requisitos de área e ao elevado tempo de retenção de sólidos, que pode gerar problemas logísticos nos tratamentos a jusante.

Dada a natureza do sistema, apenas é aplicável a lamas líquidas ou, em certos casos, lamacentas, devendo ambas ser submetidas a processos de gradagem a montante.

Muitas vezes, este método é utilizado como um estágio de pré-tratamento, em duas principais situações:

- **Separação Sólido-Líquido de LF destinadas a co-tratamento com águas residuais** (secção 3.11): As LF têm uma carga poluente consideravelmente superior à das águas residuais (segundo [5] entre 10 a 100 vezes), o que limita muito o volume de LF a ser cotratado em ETAR. Como tal, é uma prática recorrente a utilização destas lagoas, para a estabilização das LF e, consequente, redução da sua carga poluente. Adicionalmente, após o tratamento, apenas a fração líquida é, geralmente, encaminhada para a ETAR, sendo a fração sólida processada juntamente com as lamas produzidas na ETAR.
- **Estabilização de Lamas Frescas**: As LF frescas (com pouca estabilização), como descrito na secção 2.3.6, têm uma fraca capacidade de separação sólido-líquido. Por isso, em casos em que é previsto o espessamento de lamas frescas e não existe a hipótese de mistura com lamas digeridas em rácios indicados, é aconselhável o tratamento das lamas em lagoas de espessamento. Desta forma, devido aos longos tempos de retenção e condições anaeróbicas, as lamas são parcialmente estabilizadas e, consequentemente, melhorada a sua capacidade de separação sólido-líquido. Deve, no entanto, ser tido em conta que os fenómenos de estabilização estão associados à redução do poder calorífico das lamas, caso seja prevista valorização energética.

3.4.2.3 Espessamento Mecânico

Existem tecnologias que realizam a separação sólido-líquido das lamas por sistemas mecânicos. No entanto, geralmente, estes sistemas são um complemento de métodos de desidratação mecânica [43], dado que o espessamento mecânico é, usualmente, realizado na mesma unidade (em estágios diferentes ou num único estágio que realize o espessamento e desidratação em conjunto). Assim, foi considerado pertinente a sua discussão em conjunto na secção 3.4.3.4 - Desidratação Mecânica.

3.4.3 Desidratação

3.4.3.1 Leitos de Secagem

Os leitos de secagem são um método que tem como principais objetivos a separação sólido-líquido (à semelhança dos métodos de espessamento) e a desidratação das lamas.

Os leitos de secagem são caracterizados pela descarga das lamas num leito, sobre um meio filtrante, geralmente composto por uma camada superior de areia e uma camada inferior de cascalho. Na zona inferior ao meio filtrante, existe um sistema de drenagem, com o intuito de remover as escorrências geradas derivadas da infiltração de água (maioritariamente livre). A Figura 3-4 exhibe uma possível configuração.

Existem dois principais mecanismos que contribuem para a remoção de água das lamas: drenagem da água pela parte inferior do leito, devido à gravidade e carga hidráulica (água-livre); e evaporação da água na secção superior do leito (maioritariamente intersticial). Dependendo das características das lamas e de outros fatores, como as condições climáticas, uma fração de 50-80% do volume removido é atribuído à drenagem, originando escorrências, e cerca de 20-50% é removido por evaporação [5].

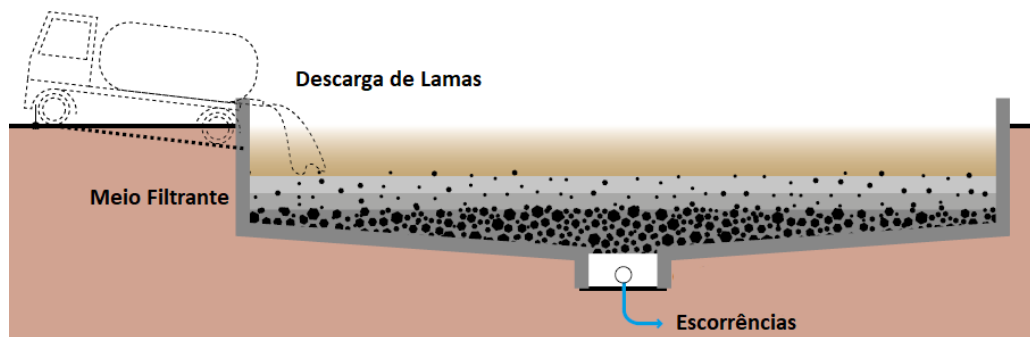


Figura 3-4: Leito de Secagem.

Geralmente, o tempo dos ciclos de secagem é na ordem das semanas. No entanto, as lamas podem permanecer nos leitos até que o teor de humidade baixe para os valores desejados, sob pena de um tempo de tratamento superior. Quando é atingido o valor pretendido, as lamas podem ser removidas manualmente ou mecanicamente. É, no entanto, recomendável que atinjam concentrações de ST de pelo menos 25%, para que possam ser removidas com eficácia (por se comportarem como um sólido) [5].

Para aumentar a eficiência de tratamento, é desejável que exista uma cobertura transparente nos leitos que sirva de barreira protetora para a eventualidade de fenómenos de precipitação. Outro fator relevante é a grossura da camada de lamas aplicadas, considerando que camadas mais finas se traduzem em maior eficiência de tratamento, no entanto em maior área requerida. Adicionalmente, as lamas podem ser misturadas, durante o ciclo de secagem, com o intuito de estimular o processo de desidratação. O autor de [22] relata que esta prática pode reduzir a área requerida em 25%, contudo com a desvantagem dos custos acrescidos derivados da mão-de-obra necessária.

Qualidade do Produto final

O tratamento em leitos de secagem resulta numa redução do teor de humidade das lamas, sendo, geralmente, removidas com valores de ST a rondar os 20-30%. No entanto, várias referências na literatura expõem a possibilidade de redução de humidade até valores na ordem dos 90% ST, associados a ciclos de secagem maiores. Um dos exemplos é o estudo realizado pelos autores de [19] que é sumariamente apresentado no Anexo V.

Adicionalmente, devido aos tempos de retenção consideráveis e consequente exposição solar prolongada, são relatados fenómenos de estabilização, em que o resultado é uma matéria “pseudo-estabilizada”. Esta estabilização é tanto maior quanto maior for o tempo de retenção das lamas. No entanto, para as lamas serem consideradas higienizadas (concentrações seguras de patogénicos) devem ser submetidas a outros estágios de tratamento.

É também importante referir que devido ao facto de existir uma camada de areia (material inorgânico) que adere às lamas na sua remoção, o tratamento em leitos de secagem pode diminuir o poder calorífico das lamas. Segundo [20], é estimado que o tratamento em leitos de secagem, contribui para um aumento da concentração de matéria inorgânica de 6 a 20%.

Aplicabilidade

Os leitos de secagem são um método comprovado de desidratação de lamas, desde pequena a grande escala.

É recomendável que as lamas tenham concentrações de ST inferiores a 10-15% de ST para que sejam bombeáveis e a sua descarga nos leitos seja facilitada. Adicionalmente, os leitos de secagem devem ser aplicados a lamas com médias/altas concentrações de água-livre, uma vez que o meio filtrante e o sistema de drenagem têm o propósito de a remover. Deve, no entanto, ser considerada a aplicação de espessamento a montante. Lamas com concentrações de ST superiores a 15-20% têm, geralmente, baixas concentrações deste tipo de água e como tal, não são indicadas para leitos de secagem.

O tratamento em leitos de secagem representa uma solução apelativa para a desidratação de lamas, devido a basear-se em mecanismos naturais e, consequentemente, exibir custos de investimento e operacionais reduzidos. No entanto, a área requerida de tratamento é elevada, sendo este um fator a ponderar no planeamento. O autor de [41] relata valores de $0,05 \text{ m}^2/\text{hab}$. Por outro lado, em [22] é relatada a experiência na ETLF de Cambérène, em Dakar, Senegal, dimensionada para o tratamento de $100 \text{ m}^3/\text{d}$ de lamas, onde os leitos de secagem ocupam 1300 m^2 .

Geralmente, é recomendada uma carga de sólidos de 100 a 200 kg ST $/\text{m}^2/\text{ano}$ [5, 41], sendo que, valores da gama superior devem ser aplicadas mediante dos seguintes fatores:

- **Características das lamas:** Devido ao facto de o método ser projetado para remoção de água-livre, é recomendável que os leitos sejam carregados com lamas digeridas ou num rácio de 2-3:1 entre lamas digeridas e lamas frescas, como mencionado em 3.4.1. Caso as lamas a tratar sejam totalmente ou maioritariamente frescas, a pré-digestão ou o condicionamento de lamas (secção 3.4.4) deve ser ponderado.
- **Condições climáticas:** Climas quentes, secos e com pouca chuva tendem a ser ideais para os leitos de secagem. Contudo, é importante ter em conta que o clima varia sazonalmente. Estudos revelam que em climas propícios, a capacidade de tratamento é entre 100-200 kg TS $/\text{m}^2/\text{ano}$ (200 com condições ideais) e em climas não propícios (como o europeu) seja na ordem dos 50 kg TS $/\text{m}^2/\text{ano}$ [5].

3.4.3.2 Leitos de Secagem Plantados

Os Leitos de Secagem Plantados têm como principais objetivos a redução do teor de humidade e estabilização das lamas.

Apresentam uma configuração semelhante à dos leitos de secagem (meio filtrante com camadas de areia e cascalho e um sistema de drenagem para as escorrências na parte inferior), contudo com a particularidade de terem espécies de plantas macrófitas plantadas no sistema (Figura 3-5).

Ao contrário dos leitos de secagem, a alimentação dos leitos plantados opera em modo contínuo. As lamas são, geralmente, descarregadas duas vezes por semana e podem acumular-se entre 5 a 10 anos,

com cargas de sólidos semelhantes aos dos leitos de secagem, entre 100-200 kgST/m²/ano, dependendo, maioritariamente, fatores climáticos (climas quentes e secos são ideais).

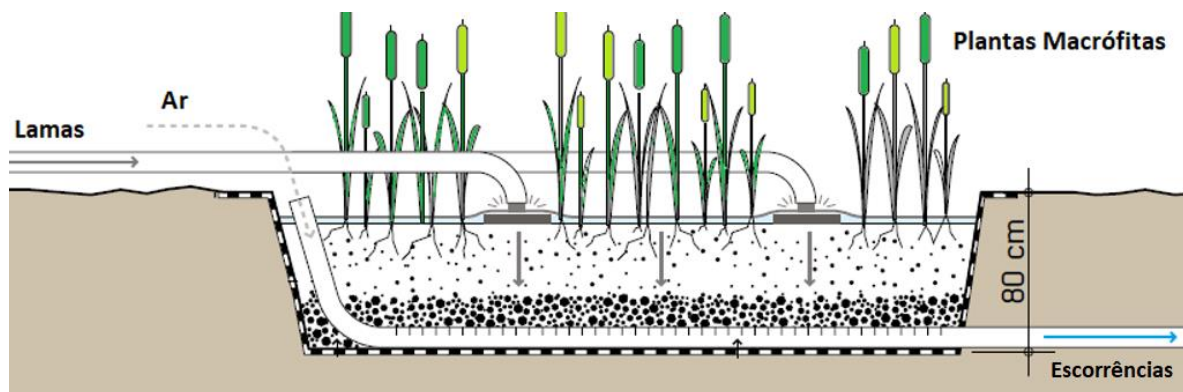


Figura 3-5: Leitos de Secagem Plantados, adaptado de [90].

É relatado em [69] que, numa fase inicial, as plantas requerem um período de crescimento e aclimatização, normalmente entre 3 a 6 meses, até serem capazes de suportar os carregamentos em operação "normal". Neste período é recomendado iniciar o processo com cargas reduzidas e ir gradualmente aumentando a mesma até chegar aos valores pretendidos.

As plantas macrófitas são encontradas naturalmente em estuários ou pântanos e são indicadas para o tratamento de LF devido ao facto de existirem espécies capazes de suportar elevadas variações no pH, salinidade, nutrientes e transição entre condições aeróbicas e anaeróbicas [5]. A escolha da espécie de plantas macrófitas a aplicar deve, no entanto, ter em conta as condições locais (devem ser adequadas ao clima, não serem espécies invasivas, entre outros). A sua presença traz várias vantagens ao sistema de tratamento:

- **Desidratação:** À semelhança dos leitos de secagem, a desidratação ocorre por fenómenos de evaporação e percolação. Contudo, devido à presença das plantas macrófitas, parte da água também é "perdida" por transpiração (absorção da água pelas raízes e libertação pelas folhas). Adicionalmente, o crescimento das raízes das plantas cria um sistema dinâmico de drenagem, que promove a infiltração e previne fenómenos de entupimento [5].
- **Tempos de Retenção:** Os elevados tempos de retenção trazem-se numa menor frequência de recolha das lamas e conseqüente diminuição dos custos operacionais. Estes devem-se à maior resistência a eventuais fenómenos de entupimento, maior capacidade de desidratação e à estabilização das lamas (explicada na próxima alínea) que reduzem a sua massa e o seu volume.
- **Estabilização:** A presença das plantas cria um ambiente que permite o crescimento de bactérias e estimula fenómenos de estabilização (também potenciados pelos próprios elevados tempos de retenção) que promove a redução do volume das lamas [5].

Qualidade do Produto Final

As lamas tratadas em leitos de macrófitas são uma matéria estabilizada, com concentrações de nitrogénio e fósforo semelhantes ao de composto maturado [33]. No entanto, não é garantida a inativação dos patogénicos até valores seguros e como tal, na ausência de monitorização, devem ser aplicados outros níveis de tratamento caso seja pretendida a valorização agrícola. Um dos exemplos é relatado em [5] em que o tratamento em leitos plantados reduziu a concentração de ovo Helmitos de 127 ovos/ g ST para 6 ovos/ g ST em 7 anos (mas ainda superior ao valor proposto pela OMS em [77] de 1 ovos/ g ST, para uso agrícola sem restrições).

Relativamente ao teor de ST, as lamas apresentam, geralmente, valores a rondar os 25-30%, sendo que num estudo relatado por [33], são indicados valores máximos de 35-45%. Ao contrário dos leitos de secagem, não se perspetiva possível a desidratação até valores superiores, atendendo à grossura da camada de lamas e a fenómenos de mineralização por biodegradação de lamas “presas” [9].

Adicionalmente, para além das lamas, as próprias plantas que crescem nos leitos são consideradas um produto do processo. Segundo [40], quando bem operados, os leitos de macrófitas podem produzir 100-150 tons matéria seca/ha. Visto estes valores representarem uma fonte considerável de biomassa, existem várias opções possíveis para a sua aplicação como: Digestão Anaeróbica, Co-Compostagem [23] ou até mesmo fabrico de peças de artesanato, como por exemplo a ETAR ponte de leites.

Aplicabilidade

Os Leitos de Secagem Plantados, inicialmente aplicados a lamas de ETAR, são um método comprovado no tratamento de LF [5]. Contudo, não existem aplicações em grande escala [47, 69].

À semelhança dos Leitos de Secagem, os Leitos de Secagem Plantados têm elevados requisitos de área e apresentam melhor desempenho em climas tropicais, em que existe mais radiação solar e menor variação climática [5].

Em relação à alimentação, é desejável que as lamas sejam líquidas ou semilíquidas (ST < 10-15%) para facilitar o carregamento dos leitos, devendo ser aplicados processos de espessamento a montante, caso o custo-benefício o justifique. Ao contrário de outros processos de desidratação, não é fulcral que as lamas tenham uma boa capacidade de separação sólido-líquido (lamas frescas), uma vez que os altos tempos de retenção nos leitos potenciam fenómenos de estabilização [9]. Adicionalmente, segundo [33], lamas com elevadas concentrações de poluentes químicos e/ou metais pesados não são indicadas, visto serem prejudiciais para as plantas e, conseqüentemente, para o tratamento.

A qualidade do produto final das lamas tratadas em leitos de secagem plantados indica o seu potencial uso em valorização agrícola, devendo ser considerados processos de higienização (secção 3.7) antes da sua aplicação. Por outro lado, devido aos fenómenos de estabilização, a aplicação deste método não se revela indicada caso seja planeada valorização energética, uma vez que existe uma redução do poder calorífico das lamas.

Os longos tempos de retenção nos leitos deve ser um fator considerado na logística de possíveis tratamentos adicionais e comercialização de produtos derivados, sugerindo que a sua implementação a grande escala pode ser dificultada.

Relativamente aos custos, não é claro na literatura a sua comparação com leitos de secagem. O autor de [69] sugere, no entanto, que no ponto de vista de remoção de lamas, os leitos de secagem plantados revelam-se vantajosos, uma vez que a frequência de remoção é consideravelmente menor. Por outro lado, deve ser tido em conta os custos operacionais associados à “manutenção” das plantas.

3.4.3.3 Secagem Solar

A Secagem Solar é um método utilizado para a desidratação de lamas, mais especificamente para a remoção da água intersticial, de superfície e intracelular.

Os Leitos de Secagem Solar ou Plataformas de Secagem são semelhantes aos leitos de secagem (descritos secção 3.4.3.1), com a diferença de não terem o sistema de percolação. Como tal, são, geralmente, leitos de cimento (sem um meio filtrante), idealmente cobertos por uma estrutura transparente que impõe uma barreira para eventuais fenómenos de precipitação.

O tempo de retenção de sólidos é, geralmente, entre 10-20 dias [43], estando, no entanto, dependente de fatores tais como, objetivo de tratamento, condições climáticas, dimensionamento dos leitos e características das lamas.

Qualidade do Produto Final

As lamas desidratadas nos leitos de secagem solar têm um teor de ST de até 90%. À semelhança dos leitos de secagem, o teor de ST final depende do tempo do ciclo de secagem.

Devido à exposição solar prolongada, geralmente, existe redução da carga patogénica. No entanto, as lamas tratadas devem ser consideradas “pseudo-estabilizadas” e por isso sujeitas a monitorização antes de serem valorizadas. Caso as concentrações de patogénicos assumam valores inseguros face ao nível pretendido, as lamas devem ser submetidas a outros processos de tratamento.

Aplicabilidade

A secagem solar é um método de fácil implementação, com baixos custos associados e que requer poucas competências técnicas para a sua operação e manutenção.

Devido ao facto de não existir um sistema de percolação, o mecanismo de remoção de água apenas se baseia em evaporação. Como tal, é desejável o tratamento de lamas com baixo teor de água-livre, idealmente com teores de ST superiores a 20%, uma vez que é mais rentável a remoção da mesma em tecnologias de espessamento e/ou com percolação, como leitos de secagem.

Atendendo que as lamas carregadas nestes leitos têm, geralmente, um teor de ST consideravelmente superior aos outros leitos de secagem, o volume útil necessário para o tratamento é menor, para a mesma massa de sólidos. Assim, os requisitos de área são menores quando comparados aos leitos de secagem, não obstante de ser um fator relevante a ser considerado no planeamento.

Adicionalmente, devido ao facto da eficiência do tratamento depender das condições climáticas, é desejável a aplicação desta tecnologia em climas propícios – quentes e secos.

3.4.3.4 Métodos Mecânicos

Os Métodos Mecânicos usam energia externa e mecanismos antropogénicos para realizar a separação sólido-líquido, através da remoção da “água-livre” e desidratar as lamas, ao remover parte da água intersticial, por aplicação de forças mecânicas fortes.

O espessamento pode ocorrer em simultâneo com a desidratação, ou em estágios distintos na mesma unidade. Por questões de organização, os métodos de espessamento e desidratação mecânicos são descritos em conjunto na presente secção.

Existem vários tipos de sistemas utilizados para desidratação mecânica de lamas de ETAR. No entanto, para LF, os sistemas de prensa são os mais utilizados devido a estarem associados a menores custos operacionais, quando comparados aos outros métodos (como sistemas de centrifugação) [43]. Como tal, na presente dissertação apenas serão mencionados os principais sistemas de prensa: Prensa de Parafuso e o Filtro de Prensa de Banda.

Estes sistemas são, geralmente, compostos por três fases: 1) Condicionamento das Lamas; 2) Espessamento das lamas (separação sólido-líquido e conseqüente remoção de água-livre); 3) Desidratação (remoção de água intersticial por aplicação de força mecânica).

De forma geral, uma maior eficiência de tratamento implica maiores custos operacionais, derivados da adição de polímero e condições de operação mais exigentes do ponto de vista energético. O

funcionamento da Prensa de Parafuso e do Filtro de Prensa de Banda encontram-se descrito em mais detalhe no Anexo VI.

Considerando que o condicionamento das lamas aumenta os custos operacionais, com o intuito de melhorar a eficiência do tratamento, em casos em que as lamas apresentam uma elevada capacidade de separação sólido-líquido (lamas digeridas) deve ser reavaliado o custo-benefício da sua aplicação.

Qualidade do Produto Final

As lamas desidratadas têm um teor de ST, geralmente, entre 15-25%, em ambos os sistemas de prensa mencionados [9].

Os métodos mecânicos não fomentam qualquer processo de estabilização/higienização de lamas e como tal, para a possível valorização é, normalmente, requerido tratamento adicional.

Aplicabilidade

Os métodos mecânicos são tecnologias bem estabelecidas no espessamento e desidratação de lamas de ETAR. No entanto, o número de aplicações a LF é muito reduzido, principalmente devido a:

- **Custos Operacionais:** Os custos operacionais dos métodos mecânicos são elevados quando comparados aos métodos naturais. Estes são principalmente atribuídos a: 1) Dependência de uma fonte de energia externa para a sua operação (normalmente eletricidade); 2) Apesar de não requerido, estes métodos, geralmente, estão associados à utilização de um polímero para condicionar as lamas. Segundo [43], na maior parte dos casos, este representa a maior fração dos custos operacionais; 3) Manutenção e reposição de peças.
- **Especialização dos Recursos Humanos:** Estes métodos requerem uma alta especialização da equipa técnica para efetuar a manutenção, monitorizar a operação e ajustar a dosagem do polímero (quando usado) [43];
- **Acessibilidade de Peças:** No caso de avaria em que seja necessário a substituição de uma peça, muitas vezes o acesso às mesmas é difícil.

Por outro lado, a grande vantagem dos métodos mecânicos, em comparação aos métodos naturais, é o facto de terem requisitos de área consideravelmente inferiores por kg ST de lamas tratadas. Como tal, devido aos elevados custos operacionais e maior dificuldade de implementação, estes métodos apenas devem ser aplicados quando os métodos naturais são inviáveis, geralmente em situações de grande escala em que a elevada área requerida de tratamento impossibilita a sua aplicação.

Relativamente à alimentação dos sistemas de desidratação mecânica, existem 4 pontos relevantes:

- **Teor de ST:** Estes sistemas devem receber lamas líquidas ou, em alguns casos, lamacentas. Segundo [43], o teor de ST ideal na alimentação deve rondar os 2%, dado que o carregamento com lamas com teores de ST inferiores (apesar de serem possíveis), resultarem em maiores dimensões das máquinas e de menor capacidade de processamento. Como tal, considerando o custo-benefício, a implementação de espessadores gravíticos a montante pode ser benéfica. Nestes casos, os tanques de espessamento dificilmente serão uma boa opção, visto não funcionarem em modo contínuo e a sua capacidade de processamento ser reduzida. Por outro lado, lamas com maiores teores de ST podem ser desidratadas nestes sistemas, contudo raramente o custo-benefício é justificado (especialmente lamas lamacentas).
- **Sólidos Grosseiros:** Em relação aos sólidos grosseiros, é indispensável a aplicação de processos de gradagem a montante para prevenir avarias. Por vezes, pelo mesmo motivo, pode ser relevante a aplicação de processos de desarenação (especialmente para Prensa de filtros de Banda [43]).

- **Estabilização:** Lamas estabilizadas são preferíveis a lamas frescas, visto a eficiência do processo ser superior e/ou necessitarem de menores dosagens de polímero (quando usado).
- **Homogeneização e Equalização:** É necessário dispor de tanques de homogeneização e equalização de lamas a montante.

3.4.3.5 Secagem Térmica

A secagem térmica tem como principal objetivo a redução do teor de humidade das lamas, por ação de uma fonte de calor externa [9].

Dependendo da forma de transmissão de calor às lamas, os sistemas podem ser: diretos (por convecção); indiretos (por condução); combinados (convecção e condução); ou por infravermelhos (radiação) [5].

Foram realizados estudos, apresentados em [67], sobre a secagem térmica a LF, em que os resultados sugerem uma temperatura ótima a rondar os 150°C. Segundo o mesmo autor, valores inferiores traduzem-se num tempo de secagem exponencialmente superior e valores superiores apresentam tempos de secagem semelhantes, porém degradação de sólidos voláteis e consequente diminuição do poder calorífico das lamas, entre 10-30%.

Adicionalmente, dependendo das condições de operação, pode ser necessário o tratamento do efluente gasoso gerado, de acordo com as diretivas em vigor no local de implementação [5].

Qualidade do producto final

As lamas tratadas por secagem térmica têm, geralmente, forma granular e teores de ST a rondar os 45 a 65%. No entanto, é possível secar as lamas até valores na ordem dos 90% ST [9, 10]. Adicionalmente, devido a exposição a altas temperaturas, o producto final tem concentrações, usualmente, nulas de patogénicos.

Aplicabilidade

A secagem térmica é um método que deve ser aplicado para desidratar as lamas até teores de ST superiores a 45-65% (idealmente para a remoção da água intersticial, de superfície e intracelular por evaporação). Geralmente, é aplicado antes da incineração ou de métodos que envolvam valorização energética (como carbonização ou briquetes não-carbonizados) [9].

Devido ao facto de ter custos operacionais elevados e requerer pessoal técnico com algum nível de conhecimento para a sua operação e manutenção, apenas deve ser considerado quando a aplicação de secagem solar ou leitos de secagem é inviável (geralmente devido aos requerimentos de área ou à capacidade de processamento). O autor de [47] relata a possibilidade usar painéis solares para reduzir os custos operacionais do processo.

Relativamente à alimentação, as lamas são, geralmente, pré-desidratadas até concentrações de ST na ordem dos 20-30%, em leitos de secagem, leitos plantados ou desidratação mecânicas. Isto deve-se ao facto destes métodos removerem a maior parte da água-livre e parte da água intersticial com um custo-benefício superior à secagem térmica.

3.4.4 Condicionamento de Lamas

O condicionamento de lamas tem como principal objetivo aumentar a sua capacidade de espessamento e desidratação. Normalmente, este é feito a partir da adição de aditivos químicos, tais

como cloreto férrico, cal, alumínio e outros polímeros orgânicos [5]. A adição de sais de ferro aumenta o teor de ST das lamas, no entanto, isso não é verificado com a adição de polímeros [5].

A adição de condicionantes aumenta a massa das lamas e, no caso de serem agentes inorgânicos, existe uma diminuição do poder calorífico [47]. A dosagem aplicada é, normalmente, baseada em *jar-tests* realizados em laboratório e depende de fatores, tais como idade das lamas, alcalinidade, pH, origem e concentração de sólidos [5].

Existe mais experiência e estudos realizados sobre o condicionamento de lamas de ETAR quando comparado a LF. Por isso, mais testes e informação devem ser realizados para aplicar esta tecnologia a LF, especialmente relativamente ao custo-benefício seu uso em tecnologias de espessamento e desidratação baseadas em processos naturais [5].

3.5 Estabilização de Lamas

3.5.1 Digestão Anaeróbia

A Digestão Anaeróbica é um processo baseado em mecanismos biológicos em que a matéria orgânica complexa é decomposta na ausência de oxigénio. O processo estabiliza as lamas e adicionalmente, devido à digestão, reduz a sua massa e o seu volume.

Os produtos do processo são: 1) **Digerido** - matéria com teor reduzido de sólidos voláteis e fração orgânica, porém com maiores concentrações de nutrientes na forma mineral; 2) **Biogás** - Gás composto por dióxido de carbono e metano, numa fração volúmica na ordem dos 30-45% e 55-70%, respetivamente [7]; 3) **Água**.

No Anexo VII, encontram-se descritas em mais detalhe as fases do processo.

A Digestão Anaeróbia ocorre em qualquer local onde se criem condições anaeróbicas e exista substrato para os microrganismos. Pode ocorrer de forma planeada em órgãos especificamente projetados para o processo, como filtros anaeróbicos, *anaerobic baffled reactor* (ambos mencionados na secção 3.10), lagoas facultativas, lagoas anaeróbicas e reatores de biogás, ou de forma “natural”, em tanques de sedimentação, fossas sépticas entre outros. A ocorrência natural do processo é a razão pela qual as lamas com alguma idade (geralmente de fossas sépticas) tendem a ter um grau de estabilização superior quando comparadas a lamas frescas (por exemplo de latrinas de casas-banho-públicas).

Apesar do processo poder ocorrer em vários locais, a presente secção é alusiva ao tratamento anaeróbico das lamas em reatores de biogás. A principal diferença deste método, em relação aos outros, é o facto de ser planeada a recolha do biogás gerado no processo.

Com base na temperatura de operação, é revelante distinguir dois tipos de Digestão – Mesófila e Termófila:

- A Digestão Mesófila é caracterizada por tempos de retenção de 10 a 40 dias [40] e pela ação de microrganismos que crescem em ambientes com temperaturas entre 20-45°C [24].
- A Digestão Termófila é caracterizada por tempos de retenção entre 2 a 5 dias e pela ação de microrganismos que crescem em ambientes com temperaturas entre 50-80°C [24].

Comparativamente, a Digestão Mesófila está associada a uma maior resiliência a variações das condições de operação (relevante para o tratamento de LF), maiores concentrações de patogénicos nas lamas, tempos de retenção maiores, custos de operação inferiores e menores requisitos técnicos de pessoal, tornando estes sistemas predominantes em países de baixo/médio PIB [27]. A Digestão Termófila, devido às maiores temperaturas de operação, está associada a uma digestão mais rápida e a uma maior qualidade do digerido e do biogás. No entanto, a pouca tolerância a variações na

alimentação e os elevados custos associados tornam a sua implementação pouco provável em países de baixo/médio PIB, especialmente em situações de pequena-média escala [44].

Os sistemas podem funcionar em estágios únicos ou múltiplos, podendo ser alimentados com lamas líquidas ou sólidas. Apesar de existir uma vasta pesquisa sobre o tema em relação as Lamas de ETAR, o mesmo não é verificado em relação às LF, pelo que apenas são relatados casos de digestão com alimentação líquida e de estágio único. Devido à aplicação reduzida ou inexistente dos restantes casos, não serão abordados na presente dissertação.

Segundo [44] os reatores mais utilizados, em países de baixo/médio PIB, são os “*fix-dome reactors*” a operar em temperaturas mesófilas em modo contínuo. A Figura 3-6 exhibe a sua configuração.

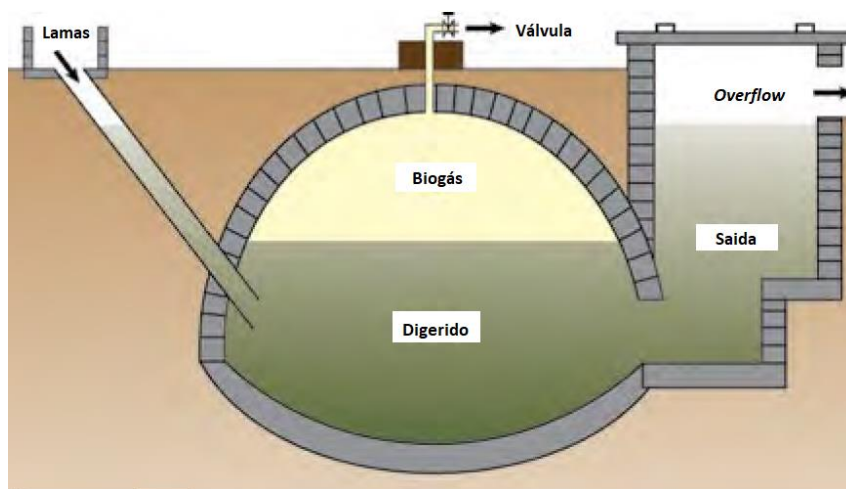


Figura 3-6: Reator de biogás “*fix-dome*”, adaptado de [44].

Co-Digestão

Existe a possibilidade de realizar co-digestão de lamas com outras matérias orgânicas (preferencialmente resíduos), sendo relatados inúmeros benefícios na literatura. Um dos exemplos são os resultados de um estudo apresentado em [45], em que foi concluído que a co-digestão de LF com estrume de vaca e/ou resíduos orgânicos, se traduziu num aumento da quantidade e qualidade do biogás produzido.

Qualidade do Produto Final

Como mencionado, o digerido é a matéria que permanece no reator após a digestão, que se caracteriza, de forma geral, por ter uma baixa concentração de sólidos voláteis (matéria orgânica).

Relativamente aos nutrientes, geralmente, o digerido tem concentrações superiores de nitrogénio mineralizado quando comparado às lamas não digeridas, devido ao facto do processo promover a transformação de nitrogénio orgânico em amónia. Assim, o digerido pode ser considerado um fertilizante orgânico (descrito em mais detalhe na secção 4.3.2.1). Contudo, para ser comercializado, é recomendável que o digerido seja submetido a outros estágios de tratamento:

- **Higienização:** Geralmente, as temperaturas da digestão mesófila versus o tempo de retenção no reator não são suficientes para garantir inativação dos patogénicos para o seu uso agrícola sem restrições. Para atingir valores seguros, é recomendável a higienização do digerido. No entanto, se o sistema operar em condições termófilas, geralmente, o digerido apresenta valores seguros de patogénicos (sendo recomendável a monitorização do produto) [44].

- **Redução do teor de Humidade:** Considerando que a maioria dos sistemas é de digestão “molhada”, o digerido deve ser submetido a processos de desidratação a jusante. Um ponto positivo relativamente a este estágio é o facto da digestão anaeróbica potenciar a capacidade de desidratação das lamas.

Aplicabilidade

A Digestão Anaeróbica é um método comprovado para a estabilização de lamas de ETAR e LF que permite simultaneamente a valorização energética e aplicação no solo.

Em relação à alimentação, é recomendável que as lamas tenham um teor reduzido de ST (idealmente inferior a 10%) para evitar fenómenos de entupimento. No entanto, lamas com teores inferiores a 2% podem traduzir-se numa produção de biogás reduzida e reatores com volumes elevados. Como tal, nesses casos deve ser avaliado o custo-benefício da implementação de um sistema de espessamento de lamas a montante [44 49]. Adicionalmente, as lamas devem ter baixas concentrações de toxinas e metais pesados que possam perturbar o processo e, idealmente, uma elevada concentração de sólidos voláteis (lamas frescas) para potenciar a produção de biogás. O autor de [66] relata que lamas provenientes de latrinas com alta frequência de recolha (como de casas-de-banho públicas) podem produzir entre 5-10 vezes mais biogás do que lamas provenientes de fossas sépticas (com um certo grau de estabilização).

Relativamente aos fatores climáticos, é desejável a aplicação em climas quentes que minimizem/eliminem a necessidade de energia externa para aquecer o reator. Segundo [44] existem vários casos, em países de baixo/médio PIB, em que a temperatura ambiente é necessária para levar o reator a condições mesófilas. O mesmo autor estima que países onde a temperatura média é inferior a 15°C, traduzem-se em sistemas mesófilos não satisfatórios.

Em média/grande escala deve ser considerado:

- **Sistemas de Digestão Termófila:** devido ao seu maior poder de processamento e produção de digerido com concentrações seguras de patogénicos (mas com maiores custos operacionais).
- **Desarenação:** Caso sejam identificadas grandes quantidades de areias nas lamas, para impedir a sua acumulação no reator, deve ser considerado a aplicação de desarenação.
- **Co-Digestão:** sistemas em que é pretendida a comercialização de biogás ou geração de eletricidade devem considerar a Co-Digestão (maior qualidade e quantidade de biogás produzido). Caso aplicada, o material a ser co digerido deve ter baixo custo e alta disponibilidade na zona de aplicação. Um bom exemplo são os resíduos municipais orgânicos, visto serem gerados em grandes quantidades nos mesmos locais das de LF (núcleos urbanos). No Anexo IX é discutida a relevância da inclusão dos resíduos municipais orgânicos na Gestão de LF. Caso usados, estes devem, no entanto, ser submetidos a um pré-tratamento de separação orgânica e inorgânica, redução do tamanho das partículas e possivelmente aumento do teor de humidade por adição de água. Adicionalmente, deve ser garantido que não exista contaminações significativas de toxinas ou metais pesados.

3.5.2 Estabilização Alcalina

A Estabilização Alcalina é um método usado para a estabilização de lamas, tendo como principal objetivo a inativação dos patogénicos e impedir a decomposição biológica.

Para tal, é adicionado um agente químicos às lamas, normalmente Cal, que ao induzir um ambiente alcalino (valores de pH a rondar os 12, com tempos de contacto mínimos de 30 minutos) diminui a atividade microbiana e hidrolisa gorduras, hidratos de carbono, proteínas e amónia [1, 5]. O resultado do processo é um estado de petrificação que conduz a uma redução nos odores emitidos e na carga

patogénica, devido à indução de um ambiente adverso [5]. No entanto, existe a preocupação do pH das lamas poder voltar a valores “normais” e ser verificado o recrescimento das populações de bactérias e patogénicos [5]. Como tal, deve ser adicionada Cal em excesso para garantir elevados valores de pH durante o tempo de armazenamento [1].

Quando é utilizada Cal desidratada, CaO, ocorre uma reação exotérmica que leva as lamas a temperaturas de até 60°C, o que também promove a redução dos patogénicos [5].

Produto Final

As lamas resultantes do processo são estabilizadas e com níveis reduzidos de patogénicos. Ao contrário da digestão anaeróbica, não existe redução da matéria orgânica e, conseqüente, redução da massa e volume das lamas. Na verdade, devido à adição de cal, o volume e massa das lamas aumentam com o processo, segundo [38], entre 15-50%.

Por outro lado, é relatado em [38] que o tratamento com cal diminui a concentração de nutrientes das lamas, devido ao aumento da sua massa/volume e por perdas de amónia relacionadas com emissão de gases.

Relativamente à capacidade de desidratação, [1] relata um desempenho superior quando comparadas a lamas não estabilizadas, apesar do processo não envolver digestão.

Apesar de não ser claro na literatura, devido ao cariz inorgânico, a sua adição às lamas sugere uma redução do seu poder calorífico.

Aplicabilidade

A Estabilização Alcalina é um método comprovado de estabilização de lamas, de fácil implementação. Os seus custos capitais são relativamente reduzidos, no entanto os custos operacionais podem-se revelar elevados devido à alta necessidade constante de adição de Cal. Como tal, o método deve ser aplicado em zonas onde o acesso à mesma é facilitado e o seu custo seja reduzido.

Devido à inativação da carga patogénica e a sua fácil implementação, a estabilização com cal também pode ser considerada com o intuito de higienização de lamas, no entanto devido à potencial redução do poder calorífico não se perspetiva indicada para a valorização energética.

O processo pode assumir a função de “método principal” de estabilização numa ETLF. Contudo, os autores de [1, 36] sugerem que a Estabilização com Cal pode ser relevante na função de processo de recurso ou processo “temporário”, em contextos de avaria da linha de tratamento principal ou em fases de planeamento/construção da ETLF.

3.6 Compostagem

A compostagem é um processo de biotransformação aeróbico, em que o resultado é uma matéria estabilizada, parecida com húmus (ver Figura A-4 no Anexo VIII). Para além da estabilização, a compostagem permite a recuperação de nutrientes e matéria orgânica, possibilitando a valorização na aplicação de lamas no solo [12]. Devido à degradação da matéria orgânica e de carbono em CO_2 , o volume e massa das lamas são reduzidos no processo, por volta de 50%, segundo [37].

Existem várias configurações possíveis para o processo, sendo a mais comum a compostagem de pilha estática, que implica amontoar a matéria a ser compostada em várias pilhas, geralmente num ambiente que ofereça proteção contra chuva/vento e impermeabilizado para evitar a infiltração de drenados contaminados. As pilhas devem ter uma dimensão adequada que permita aos trabalhadores homogeneizarem a matéria durante o ciclo de tratamento (geralmente de 10 em 10 dias), para garantir

o arejamento e distribuição de temperatura. Outra possível configuração é dispor a matéria a ser compostada em leiras. Em ambos os métodos, podem ser aplicados sistemas de homogeneização e de arejamento mecânicos, caso o custo-benefício o justifique.

O processo, incluindo maturação, ronda no mínimo 6 a 8 semanas [5]. Durante o ciclo podem ser identificadas 3 fases, em que, quando bem aplicado, são geradas temperaturas suficientes (e durante tempo suficiente) para a inativação de patogénicos até valores que permitam o seu uso agrícola sem restrições, segundo as normas da OMS expostas em [77]. As fases de compostagem e o perfil de temperatura podem ser consultados no Anexo VIII.

É importante referir que existem condições que devem ser verificadas para assegurar a otimização do processo e a qualidade do produto final. As mais importantes são: rácio Carbono:Nitrogénio (C:N) inicial, teor de humidade, diâmetro e Porosidade das partículas e Arejamento durante a operação. No Anexo VIII cada uma delas é descrita em detalhe.

De forma geral, as características das lamas não são adequadas para realizar compostagem, especialmente pelo baixo valor de rácio C:N [12]. Consequentemente, a compostagem lamas pode implicar que não se atinjam temperaturas suficientes para a eliminação de patógenos e/ou que o valor agrícola do produto final seja reduzido. Uma possível solução, para contrariar esta adversidade, é misturar as lamas com outra matéria que balance estas características, recorrendo à Co-Compostagem, Figura 3-7.

Co-Compostagem

A compostagem de matéria orgânica é um método bem estabelecido em várias partes do Mundo. Existem vários resíduos orgânicos que podem ser utilizados no processo de Co-Compostagem com lamas, incluindo: resíduos municipais sólidos; resíduos agrícolas (como casca de café, casca de coco, turfa); serradura; estrume, entre outros [68].



Figura 3-7: Representação da Co-Compostagem de lamas com resíduos orgânicos, adaptado de [90].

Para a seleção do material a utilizar e a sua percentagem de mistura devem ter em conta, o seu custo, as suas características versus as características das lamas e a sua disponibilidade, devendo-se, idealmente, optar por um resíduo. É importante garantir que o material a usar tenha baixas concentrações de metais pesados e de toxinas que possam limitar o uso agrícola e/ou inibir o processo.

Um dos casos comprovados, em vários países em de baixo/médio PIB, é a Co-Compostagem de LF com resíduos municipais sólidos [12,33,53], geralmente em rácios de mistura de 1:2 ou 1:3, respetivamente [53]. A pertinência da sua utilização deve-se: ao rácio C:N apropriado; ao custo reduzido; às elevadas taxas de geração em zonas onde também existem elevadas taxas de geração de LF (núcleos urbanos); e ao facto da sua fração orgânica (componente “compostável”), em zonas urbanas de países de baixo/médio PIB, ser consideravelmente superior quando comparada a países com um PIB elevado [12, 44] (Figura 3-8).

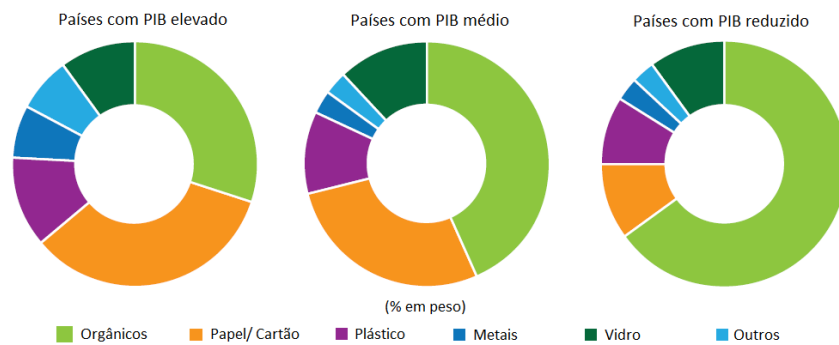


Figura 3-8: Composição dos Resíduos Orgânicos Municipais países de alto, médio e baixo PIB, adaptado de [12].

À semelhança da gestão de LF, a gestão dos resíduos municipais sólidos, em países de baixo/médio PIB, apresenta diversas falhas. Como tal, o co-tratamento destes resíduos cria uma simbiose que possibilita a valorização de ambos e a colmatação das falhas nas respetivas cadeias de gestão. No Anexo IX, pode ser consultado em mais detalhe as falhas na gestão dos resíduos municipais sólidos em países de baixo/médio PIB e a relevância de incluir este resíduo na gestão de LF.

Adicionalmente, é, geralmente, necessário pré-tratar os resíduos devido a dois fatores:

- **Separação Orgânica/Inorgânica:** A fração orgânica e inorgânica estão, geralmente, misturadas, pelo que devem ser separadas manualmente ou mecanicamente. Após a separação, a componente orgânica é compostada e a componente inorgânica deve ser encaminhada para aterro sanitário. Este ponto implica um desafio na utilização dos resíduos municipais sólidos, devido ao facto da mistura das duas componentes poder ser uma fonte de contaminações. Idealmente, a separação deve ser feita na origem.
- **Tamanho das partículas:** Como mencionado no Anexo VIII, é aconselhável um diâmetro a rondar entre 1-2,5 cm para métodos com aeração mecânica e de 5-10 cm para métodos de aeração natural [12], pelo que pode ser necessário pré-tratar os resíduos municipais sólidos.

Produto final

Quando o processo de compostagem é efetuado corretamente, o produto final é uma matéria estabilizada com concentrações seguras de patogénicos e com uma estrutura química semelhante ao solo, porém com maior teor de matéria orgânica e nutrientes [12].

O composto pode ser classificado como um condicionador de solo [24] dado que apresenta um alto teor de matéria orgânica (estabilizada) e um baixo teor de nutrientes na forma mineralizada (a rondar os 10%) [12]. Como tal, a principal área de ação do composto é a qualidade do solo. No entanto, os nutrientes na forma orgânica têm uma taxa de mineralização, por volta de 6-7% anualmente, que, segundo [12], atuam como um “repositório de nutrientes” para as plantas. Ainda assim, o composto pode ser enriquecido com um fertilizador inorgânico para aumentar a quantidade de nutrientes imediatamente disponíveis para as plantas, na forma mineral.

É importante monitorizar a qualidade do produto final, uma vez que a aplicação de composto imaturo no solo pode gerar impactos negativos no mesmo, como inibição do crescimento das plantas (devido à possível presença de ácidos orgânicos, resultantes de passos intermédios da decomposição) [12]. Deste modo, quando a estabilidade do produto final não é averiguada, é aconselhável que o composto seja curado durante um mês. Segundo [12], Rácios de C:N inferiores a 20 são aceitáveis no produto final, contudo, valores inferiores a 12-15 indicam um bom nível de maturação.

Adicionalmente, o produto final pode sofrer ainda algum processamento, dependendo do produto pretendido. Podem ser aplicados processos de *screening*, enriquecimento com fertilizante inorgânico

e compactação. É importante referir que é desejável que o produto final tenha um teor de humidade inferior a 40% para não ocorrerem zonas com condições anaeróbicas no pacote [12].

Aplicabilidade

A Co-Compostagem deve ser aplicada quando é garantido o fluxo de um material indicado (de preferência um resíduo) que se adequa às características das lamas a serem tratadas e garanta que a mistura apresente as condições descritas em detalhe no Anexo VIII (Rácio C:N, teor de humidade, entre outros). Caso estas condições e/ou a qualidade do produto final não sejam monitorizadas, devem ser aplicados processos de higienização ao produto final, consoante o método de deposição planeado, dado que não é garantido que o processo tenha sido realizado corretamente, possivelmente resultando numa redução deficiente da carga patogénica. Os processos de higienização são descritos em detalhe na secção 3.7.

As lamas devem ser submetidas a processos de gradagem e devem ter teores de ST superiores 25-30% [23], dado que é recomendável que se comportem como um sólido para conferir estrutura às pilhas e permitir o arejamento durante o processo. Como tal, o teor de humidade das lamas é, geralmente, reduzido antes da compostagem (quando necessário). É, também, importante averiguar possíveis contaminações de metais pesados ou de substâncias tóxicas que limitem o processo e/ou a aplicação no solo, tanto nas lamas como em eventuais resíduos incluídos no processo.

Adicionalmente, é importante garantir que existe espaço suficiente para a implementação do processo, face ao fluxo de resíduos a serem processados, uma vez que a compostagem tem requerimentos de área significativos [12].

3.7 Higienização das Lamas

3.7.1 Armazenamento Prolongado

O armazenamento prolongado tem por objetivo a redução da carga patogénica das lamas, baseado na premissa de que a sua concentração tende a decrescer com o aumento da idade das lamas, devido à sua inativação natural [47, 77].

As lamas são armazenadas, geralmente, em pilhas, em locais impermeabilizados, para evitar a infiltração de drenados contaminados, e cobertos, para proteção de eventuais fenómenos de precipitação. É pretendido o armazenamento das lamas durante o tempo suficiente para que ocorra o decaimento natural das populações de agentes patogénicos, até aos valores pretendidos. Segundo [41], o tempo mínimo indicado para o tratamento são 6 meses, no entanto quanto maior for o tempo de armazenamento, maior será a eficácia do processo.

Outra opção, relatada por [9], no tratamento em Leitões de Secagem Plantados em que é pressuposta higienização do produto, envolve a interrupção do carregamento dos mesmos e “armazenar” as lamas nos próprios leitões até que os níveis de patogénicos desejados sejam atingidos. Não são mencionadas tais práticas para leitões de secagem.

Qualidade do Produto Final

Lamas submetidas a armazenamento alongado têm menores concentrações de patogénicos [73]. Adicionalmente, é sugerido pela análise de [1,9] que possa existir estabilização de lamas, devido a fenómenos de digestão aeróbica, sendo os mesmos potenciados no caso da mistura de lamas (à semelhança da co-compostagem) e conseqüente arejamento. Apesar de não ser claro na literatura, estes fenómenos sugerem uma redução do poder calorífico.

Aplicabilidade

O armazenamento prolongado representa uma solução de custos reduzidos para a higienização das lamas, em que devem ser considerados os requisitos de área para o seu armazenamento face ao tempo de tratamento requerido. É, no entanto, necessária mais investigação sobre a qualidade do produto final e fatores determinantes para a sua aplicação.

Relativamente às lamas, o teor de ST deve ser elevado o suficiente para conferir força estrutural às pilhas no armazenamento e redução de odores [77]. Por outro lado, autor de [73] sugere que teores de ST de 70-80% são ótimos para a inativação dos patogénicos.

O método deve ser aplicado em climas quentes. O autor de [36] sugere que em temperaturas de armazenamento de 2-20°C e 20-35°C os períodos de armazenamento indicados para a redução da carga patogénica para valores inferiores a 1 ovo Helminto/gST (valor recomendado pela OMS para uso sem restrições relativas à carga patogénica) é de 1,5-2anos e 1, respetivamente.

3.7.2 Pasteurização

A Pasteurização tem por objetivo a higienização das lamas, através da ação de calor. As temperaturas do processo são inferiores às da secagem térmica e, como tal, a redução do teor de humidade, ainda que existente, não é muito significativa.

Segundo [73], a exposição de lamas a 50°C e 55°C, durante 60 minutos e 5 minutos, respetivamente, foi suficiente para a inativação dos patogénicos, até valores inferiores a 1 ovo/gST (valores recomendados pela OMS para uso sem restrições).

À semelhança da secagem térmica, os sistemas de transmissão de calor podem ser: diretos (por convecção); indiretos (por condução); combinados (convecção e condução); ou por infravermelhos (radiação) [5].

Uma possível aplicação para países de baixo/médio PIB, são sistemas de pasteurização alimentados a energia solar. Apesar do investimento capital, a redução dos custos operacionais pode justificar a sua aplicação. Um dos sistemas é mencionado no caso de estudo da Sanivation, apresentado na secção 4.3.3.3. Outra possibilidade é a combustão de biogás para fornecer calor às lamas, caso seja realizada Digestão Anaeróbica na planta. O autor de [7] comprovou que o biogás produzido no processo é suficiente para fornecer o calor necessário para higienizar o produto até valores inferiores a 1 ovo/gTS.

Qualidade do Produto final

Lamas higienizadas com concentrações seguras de agentes patogénicos. As temperaturas de operação não são suficientes para degradar os sólidos voláteis e como tal, o poder calorífico é semelhante.

Aplicabilidade

A pasteurização é um método de higienização das lamas que tem requisitos de área inferiores e capacidade de processamento superior quando comparado ao armazenamento prolongado. No entanto, os seus custos operacionais são superiores.

O autor de [73] concluiu que o meio de suspensão não tem impacto na eficiência de pasteurização, pelo que o processo pode ser aplicado a lamas líquidas, por exemplo a montante de um reator de Digestão Anaeróbica, como um caso descrito em [51], ou a lamas sólidas, como o modelo da Sanivation descrito em mais detalhe na secção 4.3.3.3.

Comparativamente com o armazenamento prolongado e estabilização alcalina (quando usado como processo de higienização), a pasteurização tem como vantagem a higienização das lamas sem diminuir o seu poder calorífico. Como tal, este processo assume especial relevância na valorização energética de combustíveis sólidos não-carbonizados (descritos na secção 4.3.3.2), devido ao facto de garantir a segurança do seu manuseamento.

3.8 Processos de Alta Temperatura

3.8.1 Pirolise lenta / Carbonização

A Carbonização tem por objetivo a transformação das lamas em *char* (material visualmente parecido com carvão) que pode ser valorizado energeticamente ou, ainda que menos comum, para aplicação no solo. As lamas podem ser carbonizadas com outros materiais (como outros resíduos orgânicos), num processo chamado de Co-Carbonização.

A Carbonização pode ser definida como uma transformação termoquímica que decompõe as lamas, através da aplicação de calor, na ausência de oxigénio. Geralmente, em países de baixo/médio PIB, o processo ocorre em reatores em operação cíclica [43] onde são impostas temperaturas a rondar os 300-500 °C para tempos de retenção na ordem de minutos a dias [32]. Contudo, o autor de [70], relata que para a valorização energética, a temperatura ideal ronda os 350°C, para tempos de retenção de 10 minutos no reator. Os resultados do estudo não mencionam valores ótimos para a valorização em aplicação no solo.

Devido às altas temperaturas, ocorre uma degradação térmica das lamas que resulta na formação de gases, derivado da presença de sólidos voláteis, que podem ser divididos em gases condensáveis ou não-condensáveis. Ao submeter os vapores a um condensador (quando aplicado), é possível separar uma fração líquida - Óleo de Pirolise. O efluente gasoso composto pelos gases não-condensáveis é emitido para a atmosfera, idealmente depois de ser submetido a tratamento. O *char* é a fração sólida restante no reator após o processo, sendo o produto pretendido com o processo de carbonização, atendendo às condições impostas. Existem outros tipos de pirólise que têm como objetivo a otimização da produção de óleo e/ou gases, que não serão abordadas na presente dissertação.

Qualidade do Produto Final

O processo de carbonização aumenta a concentração de carbono fixo das lamas e diminui o seu teor de sólidos voláteis, devido à sua perda sob a forma de gases. Esta redução e as altas temperaturas verificadas no reator, tornam o produto final composto por uma matéria estabilizada, sem odores e livre de patogénicos [22, 72]. No entanto, a redução de sólidos voláteis implica uma diminuição significativa do poder calorífico, quando comparado às lamas não-carbonizadas. O autor de [22] estima que o valor deste indicador para *char* de lamas varia entre 4,7-14,5 MJ/kgST que, especialmente nas gamas mais baixas, é consideravelmente reduzido quando comparado a outros tipos de biomassa (ver Figura 4-3).

Uma possível solução para contrariar esta adversidade é o enriquecimento do *char* com outros resíduos (como pó de carvão) e/ou a co-carbonização com materiais cujo poder calorífico não seja tão dependente dos sólidos voláteis, mas sim no carbono fixo. O autor de [72] relata a co-carbonização de uma mistura 30-50% de LF com outros resíduos orgânicos e posterior enriquecimento com pó de carvão, onde o poder calorífico do produto final foi de 18-20 MJ/kg ST. Esta temática é abordada em mais detalhe na secção 4.3.3.2.

Em relação à aplicação de *char* de LF no solo, o autor de [63] relata melhorias nas propriedades físico-químicas do solo e fornecimento de nutrientes às plantas (principalmente fósforo e potássio). Isto deve-se ao facto da presença destes nutrientes na forma inorgânica não ser afetada no processo. Adicionalmente, o pH é geralmente alcalino, segundo [70], entre 9.1-11.2, constituindo um fator que deve ser ponderado mediante a qualidade dos solos.

Como mencionado, pode ser revelante compactar o *char* com outras matérias no caso do enriquecimento ou caso esteja maioritariamente sob a forma de pó. O processo de compactação é descrito em detalhe na secção 3.9.

Aplicabilidade

A tecnologia de carbonização está bem estabelecida na aplicação a madeira, para a produção de carvão vegetal. No entanto, na aplicação a LF apenas existem reatores de pequena escala. Um dos exemplos é o reator descrito em [32] - reator de duplo barril (Figura 3-9) – em que foi comprovada a sua construção com materiais acessíveis em comunidades de países de baixo/médio PIB e dadas instruções para a sua operação e informações detalhadas sobre os custos envolvidos.

Para a carbonização de LF atingir escalas maiores, é necessária a conjugação de vários reatores numa instalação, ou da aplicação de tecnologias de carbonização estabelecidas em outras áreas, como o reator de cama fixa. É necessária mais investigação neste domínio.



Figura 3-9: Reator de Duplo Barril (esquerda) [32] e pellets de LF carbonizadas (direita) [28].

Relativamente à alimentação, segundo [43], as lamas devem ter um teor de ST mínimo de 60-70%, para ser mantida a temperatura no reator. No entanto, quanto maior for este valor, mais rentável é o processo [22]. Apesar de as temperaturas do reator serem suficientes para desidratar as lamas, é aconselhável preservar a energia necessária para o processo e reduzir o seu teor de humidade em métodos com um custo-benefício mais favorável. Adicionalmente, as lamas devem ser quebradas em pequenos fragmentos (50-100 mm) para estimular a penetração de calor [31].

Na eventual valorização energética de combustíveis sólidos derivados de lamas, um fator relevante para a aplicação de carbonização é o facto das tecnologias de combustão utilizadas pelos potenciais consumidores, requererem um combustível com propriedades semelhantes ao carvão. Por outro lado, apesar de lamas terem sido carbonizadas com sucesso, as suas altas concentrações de matéria inorgânica e baixas de carbono fixo, quando comparado a outros tipos de biomassa, limitam a viabilidade do processo. O autor de [72] sugere que a carbonização de LF, geralmente, apenas deve ser considerada quando realizada com outros resíduos (Co-Carbonização).

Salienta-se que existe um processo altamente promissor na área da carbonização de LF - carbonização hidrotérmica. Isto deve-se ao facto de exigir um menor teor de ST na alimentação (a rondar os 20% ST) e produzir *char* com um poder calorífico superior (16,1-28,5 MJ/kg) [22]. Contudo, o processo não foi descrito em detalhe na presente dissertação devido ao facto de ser uma tecnologia emergente e não haver registo de aplicações em países de baixo/médio PIB.

3.8.2 Incineração

A incineração das lamas pode ser definida como a sua combustão total a altas temperaturas (normalmente entre 850-900°C) [5]. Este método não envolve propriamente a valorização das lamas, no entanto, pode existir um retorno energético, sob a forma de calor ou eletricidade, que pode ser

utilizado para diversas aplicações tais como, secagem térmica das lamas, fornos de cimento, entre outras [5].

Os tipos de reatores mais comuns são, o leito fluidizado e o reator de vários núcleos. Nestes, as lamas podem ser mono-incineradas ou coincineradas, por exemplo com carvão ou outros resíduos [5].

Qualidade do Produto Final

A incineração converte as lamas num material inerte e livre de patogênicos (cinzas) que são, geralmente, encaminhadas para aterro sanitário. Vários autores na literatura, como [3, 5], relatam uma redução do volume de lamas desidratadas para menos 10% do seu volume original.

Para além das cinzas, os produtos do processo são: dióxido de carbono, água e outros gases potencialmente nocivos (muitas vezes derivados de combustão incompleta) que, idealmente, requerem tratamento antes da sua emissão para a atmosfera [10].

Aplicabilidade

Devido aos altos custos, a incineração é, normalmente, aplicada em situações de grande escala (o autor de [3] sugere para lamas geradas por 500 000 pessoas) que justifiquem o investimento, e em casos em que as opções de deposição são limitadas [10]. Por outro lado, pode-se revelar viável, para escalas inferiores, se existir uma infra-estrutura, dentro de uma distância adequada, que realize incineração [59].

Considerando que as cinzas são, geralmente, encaminhadas para aterro sanitário, a mono-incineração apenas deve ser considerada quando a redução dos custos de transporte e taxas de deposição em aterro (devido a volume reduzido e material inerte) justifiquem os custos capitais e operacionais adicionais da operação [20].

Um dos objetivos no planeamento do processo é reduzir ou eliminar a necessidade de fonte de energia externa. Idealmente, esta energia é apenas usada para aquecer o reator até à temperatura de ignição das lamas, onde posteriormente, o seu poder calorífico sustenta o processo [1]. Como tal, é desejável que as lamas tenham em elevado teor de ST, idealmente superior a 50-70%, uma vez que é o valor necessário para a combustão ser autossustentável [20].

3.9 Compactação

A compactação tem como objetivo moldar as lamas, geralmente já submetidas a alguns níveis de tratamento, e potencialmente outras matérias (com o intuito de enriquecimento do produto final) em formas como briquetes ou *pellets*.

Apesar de não ser um tratamento que modifique as características ou propriedades das lamas, a compactação assume um papel relevante na sua deposição final. Isto deve-se maioritariamente a:

- **Transporte:** A logística de transporte é facilitada se produto tiver a forma de *pellets* ou briquetes. Este fator assume maior relevância comparando com o cenário do produto estar sob a forma granular ou em pó, pois para além da logística do transporte facilitada, podem ser minimizadas perdas de produto.
- **Comercialização:** As lamas podem ser compactadas com outras matérias que aumentam o valor do produto final (um bom exemplo é a adição de pó de carvão na valorização energética). Adicionalmente, o próprio formato do produto pode traduzir-se num valor de mercado superior. O autor de [65] relata que num estudo realizado em Kampala, Uganda, foi concluído

que os potenciais compradores de composto estão dispostos a pagar mais por um produto compactado.

Para que os briquetes ou *pellets* tenham estrutura suficiente para manter a sua forma, é necessário que as lamas tenham um teor de ST de 50-60% [64, 71]. Caso tenham teores inferiores (ou superiores, mas na forma de pó) é, geralmente, necessário a aplicação de um *binder*, que têm como objetivo conferir força estrutural à mistura e idealmente que seja um material de fácil acesso e de custo reduzido. Adicionalmente, considerando que os briquetes ou *pellets* podem ser comercializados no setor energético ou agrícola, é importante a escolha de um *binder* com características adequadas ao método de valorização pretendido. Exemplos na comercialização no setor energético são: melaço; cera de abelha; amido de mandioca e barro [22].



Figura 3-10: Exemplos de compactadores, de funcionamento manual, à esquerda, e automática, à direita. [28]

Os produtos compactados, caso pretendido, podem ser posteriormente desidratados. Este fator assume relevância na valorização energética, em que muitas vezes é pretendido um produto com teor de ST a rondar os 90%. Curiosamente, vários autores na literatura como [22, 54] relatam que a capacidade de desidratação das lamas compactadas pode ser superior quando comparada ao seu estado original. É relatado, pelos mesmos autores, um aumento de teores de ST de 40-60% para 90% em 1 semana através de secagem passiva ao sol. Um exemplo é exposto na secção 4.3.3.3.

3.10 Tratamento de Escorrências

Os processos de tratamento, especialmente os de espessamento e desidratação, geram um efluente líquido (escorrências e drenados) que requerem tratamento apropriado anterior à descarga no meio recetor, para garantir que não existam impactes negativos [9]. A Tabela 3-1 exhibe uma comparação de alguns indicadores para escorrências de tecnologias de desidratação e espessamento, com águas residuais, em três países africanos.

Tabela 3-1: Valores Típicos das características de escorrências em comparação com águas residuais, adaptado de [9].

Parâmetros	Origem	CBO (mg/l)	CQO (mg/l)	SST (mg/l)	ST (mg/l)	N (mg/l)
Águas Residuais	PRESEC, Gana	774-868	1343-1375	390-480	1180-1420	-
	Kumasi, Gana	285	696	-	-	43
Escorrências Leitos de Secagem	Gana	870-1350	3600-5600	290-600	5100-5700	-
	Senegal	-	3600	1900	2500	-
Escorrências Tanques de Espessamento	Gana	150	650-3000	1000	-	104
Escorrências Leitos de Secagem Plantados	Camarões	-	250-500	100-300	1500-4000	100-200

Como é possível aferir da Tabela 3-1, as escurrências podem ter valores de CBO, CQO, SS, ST ou N consideravelmente superiores aos das águas residuais, sendo clara a necessidade de aplicar um tratamento adequado para as purificar. Relembrando que o foco da presente dissertação são situações em países de baixo/médio PIB, é importante assegurar métodos eficazes, baratos e de fácil implementação. Por outro lado, a presente dissertação tem como foco principal o tratamento e deposição final da fração sólida das lamas com vista à possível valorização. Neste contexto, apenas serão brevemente descritas as opções indicadas para o tratamento da fase líquida:

- **Co-tratamento do efluente numa ETAR:** Caso exista uma ETAR próxima da ETLF, é desejável, encaminhar as escurrências para a mesma. Este processo é discutido com mais detalhe na secção 3.11;
- **Sistema de Lagunagem:** É uma solução de baixo custo que facilmente pode ser implementada para o efeito. Estes sistemas são descritos com mais detalhe no Anexo XI;
- **Reutilização do efluente para Compostagem:** Na compostagem, é desejável manter valores indicados de humidade. Para tal, é muitas vezes necessário adicionar humidade às pilhas de compostagem. As escurrências podem ser utilizadas para o efeito em estágios iniciais do processo [9]. O processo de compostagem é descrito com mais detalhe na secção 3.6.
- **Leitos de Macrófitas:** São semelhantes aos leitos de secagem plantados, no entanto o escoamento é geralmente, horizontal em vez de vertical, sendo indicados para o tratamento das escurrências e drenados de uma ETLF, devido à sua fácil implementação, baixo custo e poucas competências requeridas da equipa técnica. A montante, idealmente, deve existir um sistema de tratamento primário, como: Decantador Primário, Tanque *Imhoff* ou *Anaerobic Baffled Reactor*.

3.11 Co-Tratamento em ETAR

Na presente secção é discutido o co-tratamento de LF com águas residuais. Os métodos mais comuns de tratamento em ETAR, em países de baixo/médio PIB são Decantação Primária + Lamas Ativadas ou Sistemas de Lagunagem [50]. Estes encontram-se descritos nos Anexos X e XI, respetivamente.

As ETAR incluem, em regra, duas fases de tratamento: fase líquida (purificação das águas residuais); e fase sólida (tratamento das lamas geradas do processo de purificação). Como tal, existem três principais formas de realizar o co tratamento: 1) encaminhamento das LF para a linha de tratamento líquida; 2) encaminhamento das LF para a linha de tratamento sólida; 3) separação sólido-líquido das LF, com tratamento da fase líquida na linha de tratamento líquida da ETAR e/ou tratamento da fase sólida na linha de tratamento sólida.

No planeamento do co-tratamento em ETAR devem ser considerados fatores limitativos comuns aos três casos, nomeadamente a possível descarga de efluentes industriais o que implica contaminações na fase sólida (por exemplo toxinas ou metais pesados) e pode limitar a valorização das lamas, garantir que a carga adicional de LF ou escurrências não compromete o bom funcionamento do sistema de tratamento.

Alternativa 1 – “Encaminhamento das LF para a linha de tratamento líquida”

Este método deve ser aplicado a LF líquidas (teor de ST < 5%), considerando que são encaminhadas para a linha de tratamento líquida da ETAR. Adicionalmente, as lamas devem ser pré-tratadas para a remoção de sólidos grosseiros para prevenir fenómenos de entupimento (gradagem). Caso existam quantidades elevadas de sólidos de menor dimensão (como areias) pode ser relevante a aplicação de desarenação.

As LF devem ser descarregadas na linha de tratamento e não nas caixas de visita dos coletores. Apesar desta prática simplificar a logística da operação, pode resultar em diversos problemas como: entupimento dos coletores; possíveis danos às bombas (se existirem) e aos coletores [16].

Na aplicação deste método deve ser garantido que a ETAR tenha capacidade de receber o excesso de carga poluente. As LF têm, geralmente, concentrações consideravelmente mais elevadas de ST, CQO, nutrientes entre outros (entre 10 a 100 vezes [41]), quando comparadas aos efluentes residuais. Consequentemente, sem as devidas precauções, rapidamente podem ser verificadas condições de sobrecarga que, ao afetar a eficiência de tratamento, podem implicar que o efluente purificado não cumpra os requisitos de qualidade [43]. Um dos exemplos, é o caso relatado em [47] em que é exposta a possível inibição de amónia após a descarga de LF em sistemas de lagunagem, com impactos negativos nas bactérias que realizam o tratamento. Lamas de média e alta carga tendem a ser mais problemáticas. O autor de [5] estima que numa ETAR dimensionada para o tratamento do efluente gerado por 100 000 pessoas, a adição de 1% de LF de carga média ou alta pode representar uma carga de equivalente de 144 500 ou 555 500 pessoas, respetivamente. Por outro lado, considerando que a descarga de LF não é efetuada de forma contínua e que as LF são uma matéria com elevada variabilidade, devem ser considerados tanques de equalização e homogeneização.

Adicionalmente, a adição de LF vai aumentar a quantidade de lamas produzidas pela ETAR, devendo ser garantido que o tratamento da fase sólida tem capacidade para o processar.

Em suma, dos possíveis casos co-tratamento, segundo a literatura, este é um menos recomendado, devendo apenas ser considerado para LF líquidas com baixa carga poluente.

Alternativa 2 – “Encaminhamento das LF para a linha de tratamento sólida”

A aplicação deste método deve ter em conta o esquema de tratamento da fase sólida da ETAR e as características das LF. Geralmente, as lamas de ETAR são espessadas e desidratadas antes de outros tratamentos e/ou sua deposição final. Como tal, a descarga das LF deve ser realizada no estágio correto de tratamento. Um bom exemplo é uma instalação que tenha espessadores gravíticos e leitos de secagem (relativamente comuns em ETAR). Se as LF tiverem um teor de ST > 5%, não faz sentido a sua descarga a montante dos espessadores. Por isso, a situação deve ser analisada caso-a-caso.

No caso das lamas de ETAR serem desidratadas e encaminhadas para aterro sanitário deve ser estudado o custo-benefício entre o co-tratamento e a implementação de ETLF (caso existam oportunidades de valorização não exploradas).

Alternativa 3 – “Separação sólido-líquido das LF. Tratamento da fase líquida na linha de tratamento líquida da ETAR e/ou tratamento da fase sólida na linha de tratamento sólida”.

Neste caso as LF são, geralmente, pré-tratadas numa lagoa de sedimentação/ lagoa anaeróbia (secção 3.4.2.2) e as fases líquidas e/ou sólidas são encaminhadas para as respetivas linhas de tratamento. Este método é relevante para atenuar as possíveis condições de sobrecarga impostas na linha de tratamento líquida descritas no caso 1). Apesar da fase líquida das LF ter, geralmente, cargas superiores às das águas residuais, Tabela 3-1, a diferença é consideravelmente mais atenuada quando a comparação é feita com LF. Assim, o “choque” de carga é mais reduzido, o que permite maiores volumes para co-tratamento. Adicionalmente, o tratamento em lagoas de espessamento/anaeróbicas diminui a carga das escorrências geradas.

Relativamente ao tratamento em fase sólida, a aplicabilidade deve seguir os mesmos princípios apresentados no caso 2).

4. Valorização e Deposição Final

4.1 Metodologia e Objetivos

Neste capítulo são apresentados métodos de deposição final de lamas, indicados para países em de baixo/médio PIB. Os critérios de seleção usados foram: 1) garantir a deposição segura das lamas; 2) em caso de valorização, o produto final deve ser adequado ao contexto dos países em de baixo/médio PIB; 3) devem ser métodos bem estabelecidos; 4) caso as lamas tenham requisitos de tratamento para a aplicação do método, devem ser garantidos pelos processos descritos no capítulo 3.

Este capítulo tem por objetivos, a descrição dos métodos de deposição final, a relevância da sua aplicação no contexto dos países de baixo/médio PIB, e quais os fatores que determinam a sua aplicabilidade. Foi considerado pertinente abordar a temática da relevância, uma vez que os métodos de deposição final estão associados a impactes (positivos ou negativos) de cariz ambiental e social no local de aplicação. Estes fatores podem ser determinantes na possível atração de financiamentos externos e/ou subsídios.

Os métodos abordados são: comercialização de lamas no setor agrícola, comercialização de lamas no setor energético, deposição de lamas no solo (valorização sem comercialização) e deposição em aterro sanitário. No entanto, antes de entrar em detalhe nos métodos mencionados, é relevante abordar a temática do contexto legal na deposição final de lamas em países de baixo/médio PIB.

Nota: Existem métodos de deposição final que oferecem valorização que não serão abordados neste capítulo, tais como, aplicação de lamas ou de cinzas de lamas no setor de construção (por exemplo na incorporação na produção de tijolos ou telhas) e utilização de lamas para a produção de proteína para consumo animal. Estes métodos não são abordados na presente dissertação, dado serem emergentes e o seu nível de pesquisa e de aplicação ser muito reduzido/nulo.

4.2 Contexto Legal e Regulações Existentes

Em 1992, a estimativa de lamas produzidas a partir do tratamento de águas residuais, nos países EU-15, foi de 6,5 milhões de toneladas de sólidos secos [11]. No entanto, com a implementação da diretiva de resíduos de tratamento de águas residuais 91/271/EC, os requisitos de tratamento aumentaram e, para os cumprir, as ETAR tiveram de operar com maior eficiência de tratamento. Isto levou a que o valor das lamas produzidas em ETAR subisse para 9,8 milhões de toneladas de sólidos secos em 2005 [11].

Apesar da diretiva não ser diretamente relacionada com o tratamento e deposição de lamas, é possível perceber o quão impactantes as diretivas podem ser nestas intervenções. O panorama legal do tratamento e deposição de lamas assume um papel fulcral na mitigação dos impactes da saúde pública e nos ecossistemas.

Segundo [35, 36], na maior parte dos países de baixo/médio PIB, especialmente em África, não existem regulações aplicadas à gestão de lamas, especialmente LF, e a sua monitorização é muito reduzida ou inexistente. Isto reflete as falhas institucionais na área e a forma não planeada e sistemática com que a gestão de LF é realizada. Existem, no entanto, alguns países (como a Índia) que recentemente começaram a desenvolver e aplicar estas regulações [35].

Para os países onde não existe legislação específica, é desejável adotar como referência as de outros países, ou regulações propostas por organizações internacionais. Contudo, é importante perceber que estas devem ser consideradas consoante a realidade económica, institucional e tecnológica do país de aplicação [33]. Não faz sentido aplicar os limites de qualidade extremamente restritivos de países com um PIB elevado a países de baixo/médio PIB, onde os recursos são inferiores e a aplicação da

tecnologia necessária torna-se proibitiva. É preferível adotar o paradigma de que “um pouco” é melhor do que “nada” e garantir o maior nível de tratamento possível sem comprometer a viabilidade económica da operação. Um bom exemplo é a diretiva da Suíça que limita a concentração de ovos helminto em LF e lamas de ETAR em 0 ovos/gST, na aplicação no solo. Este limite é extremamente restritivo e só pode ser alcançado através de tratamentos altamente dispendiosos [33]. É, então, preferível adotar, por exemplo, as regulações propostas pela OMS em que o limite mais restritivo para aplicação no solo é de 1 ovo helminto/gST de Lamas.

É também importante referir que a maior parte das legislações (mesmo em países de alto PIB) e das regulações propostas por organizações internacionais, apenas são dirigidas à aplicação de lamas no solo e em aterro sanitário, pelo que, de forma geral, a valorização energética é negligenciada [36].

Na presente dissertação, serão tomadas como referência as regulações propostas por: OMS, expostas em [77]; IWMI - *International Water Management Institute*, expostas em [36]; e pela legislação da África do Sul, que apesar de ser direcionada a lamas de ETAR, foi considerado relevante ser tomada como referência para a deposição de LF, expostas em [59, 60, 78, 79] e sumariamente no Anexo XII.

De forma geral, as regulações propostas ditam que os limites de qualidade na deposição final devem ter em conta os potenciais impactes gerados face ao método de deposição aplicado. Um dos exemplos, é a concentração de patogénicos nas lamas (a serem dispostas) ser definida em função do nível previsto de contacto com Humanos. Estas temáticas são descritas em mais detalhe nas respetivas secções dos métodos.

4.3 Valorização

4.3.1 Princípios

Os métodos descritos nesta secção garantem a deposição final segura das lamas e tiram partido das suas características para um certo benefício. Idealmente, devem ser produzidos produtos com um valor de mercado significativo que, a partir da sua comercialização, permitam a possibilidade de cobrir frações significativas ou a totalidade dos custos operacionais da operação.

Um dos exemplos do possível impacto positivo da valorização de LF é o estudo realizado por [37], em que foi comparado os custos, em USD/capita/ano, da deposição final em aterro sanitário (sem valorização) com os custos líquidos da valorização agrícola (usando o método de Co Compostagem), no Gana e na Índia. Os resultados são exibidos na Figura 4-1.

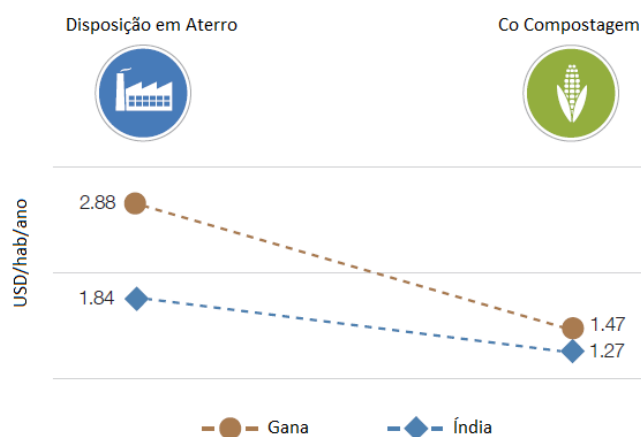


Figura 4-1: Custo de Deposição em Aterro em Comparação com Valorização Agrícola, no Gana e na Índia (incluindo transporte).

Apesar de, em ambos os casos, as receitas da comercialização dos produtos não ter sido suficiente para cobrir a totalidade dos custos da operação, foi verificado um impacto positivo, comparando com a deposição em aterro sanitário, especialmente no caso do Gana em que a redução ronda os 50%.

Por outro lado, após uma análise feita pelo autor de [66] a redes de gestão de LF que culminavam na comercialização de produtos no setor agrícola, concluiu que as receitas geradas apenas cobriam uma média de 10% dos custos operacionais, sugerindo que estavam altamente dependentes das tarifas cobradas aos utilizadores e/ou investimentos internos/externos. No mesmo documento, não são reportadas comparações com outros métodos de deposição.

Como descrito no capítulo 1, a deposição final segura das lamas está associada à mitigação de impactes ambientais diretamente com as práticas de saneamento melhorado. No entanto, a valorização das lamas pode também estar associada a mitigação adicional de impactes nas áreas em que atuam, podendo ser um fator estimulante para a atração de benefícios económicos como financiamentos e subsídios. Um dos exemplos é o caso relatado pelos autores de [66], em que uma empresa, sediada no Quênia, que gera eletricidade a partir da digestão anaeróbica de cana-de-açúcar, cobriu 27% dos custos operacionais através créditos de carbono devido à mitigação de emissões de CO_2 . Este caso, pode ser extrapolado para a valorização energética de produtos derivados de lamas. Neste contexto, é exposto na secção “relevância” os possíveis impactes adicionais que as diferentes formas de valorização de lamas podem mitigar.

Por outro lado, é importante perceber que nem todos os métodos que valorizam as lamas pressupõem a sua comercialização. Um bom exemplo é a deposição de lamas no solo, geralmente não-agrícola, cujo baixo valor de mercado não permite a sua comercialização, contudo podem ser dispostas em lugares indicados que tiram benefício das suas características. Este método de deposição é abordado em mais detalhe na seguinte secção.

4.3.2 Aplicação de Lamas no Solo

4.3.2.1 Descrição e Relevância

A aplicação de lamas no solo pode ser distinguida entre a comercialização de produtos, geralmente, no setor agrícola, ou na deposição de lamas no solo (valorização sem comercialização). Ambos os métodos representam uma oportunidade de valorização das lamas, devido ao facto de “fecharem” o ciclo de nutrientes e promoverem a reciclagem da matéria orgânica.

De forma geral, os aditivos ou suplementos aplicados no solo podem ser classificados consoante o seu objetivo:

- **Fertilizante:** Fornecer nutrientes às plantas, promovendo o seu crescimento. É importante referir que as plantas apenas conseguem consumir nutrientes na forma mineralizada e não orgânica. Os fertilizantes podem ser considerados uma solução a curto-prazo, visto serem apenas direcionados para o crescimento das plantações que são aplicados.
- **Condicionador de Solo:** Melhorar a qualidade dos solos ao repor a matéria orgânica. O uso de condicionadores no solo tem como principais benefícios melhorar a capacidade de retenção de água, melhorar a estrutura, regular o pH, temperatura e atividade biológica e até mesmo supressão de patogénicos nas plantas [24]. Podem ser classificados como uma solução a longo-prazo visto melhorarem a qualidade dos solos.

Devido ao benefício imediato, o uso de fertilizantes é predominante, especialmente os de cariz inorgânico, produzidos artificialmente. Estes, geralmente, fornecem às plantas um ou mais dos principais nutrientes para o seu crescimento (N , P , K), não sendo reposta a matéria orgânica e fornecidos nutrientes secundários (S , Ca , Mg) ou micro nutrientes (Al , Zn , Fe , entre outros).

Segundo [24], práticas de agricultura intensiva, acompanhadas de aplicação regular de fertilizantes inorgânicos, danificam os solos a longo-prazo. O mesmo autor relata que aproximadamente 80% dos espaços agrícolas no Mundo sofre de problemas de erosão de solos e nos últimos 40 anos cerca de 30% destes espaços tornou-se não produtiva. Considerando que grande parte da produção alimentar a escala global advém dos solos (direta ou indiretamente) e que estes desempenham um papel fulcral na sequestração de carbono [24], é clara a necessidade de agir.

Como mencionado no capítulo 2, as lamas contêm vários tipos de nutrientes (principais, secundários e micro) e elevados teores de matéria orgânica na sua constituição. Assim, a sua aplicação no solo pode revelar-se benéfica no contexto abordado.

Por outro lado, ao contrário do nitrogénio, o fósforo é um nutriente (essencial para as plantas) extraído por atividades mineiras e apenas disponível em alguns países [47]. Considerando que as suas reservas naturais estão a diminuir e que 25% do fósforo extraído a nível mundial acaba em meios aquáticos ou em aterros sanitários [77], práticas de valorização de lamas que reciclem este nutriente podem assumir um papel relevante a nível mundial.

Por fim, a aplicação de condicionadores de solo e de fertilizantes orgânicos pode ter um papel relevante na temática do aquecimento global, estando associados ao aumento da sequestração de carbono nos solos e à redução das emissões de gases efeito estufa (devido à substituição de fertilizantes inorgânicos), respetivamente [12, 44].

4.3.2.2 Considerações Gerais

Para garantir a aplicação segura de lamas no solo e mitigar possíveis impactos associados a esta prática, é relevante considerar os seguintes fatores.

Patogénicos

Como mencionado na secção 2.3.8, a presença de agentes patogénicos nas lamas representa uma ameaça à saúde pública, sendo este fator intensificado na aplicação de lamas em solo agrícola, uma vez que pode existir entrada direta na rede alimentar.

Segundo a OMS, para a aplicação de lamas no solo ser realizada sem qualquer restrição (relativamente aos patogénicos), é proposto que a concentração de ovos helmintos seja inferior a 1 ovo/gST. Este valor é adotado por diversas regulações propostas por outros autores na literatura e até mesmo na legislação de alguns países (incluindo África de Sul para lamas de ETAR, exposto nas referências [78, 79]). Por outro lado, nos em que onde este limite não é cumprido, devem ser tomadas medidas que diminuam o risco de proliferação de doenças [36, 77], tais como restrição às plantações de aplicação (por exemplo a espécies que produzam alimentos ingeridos crus e exista contacto com o solo), intervalo temporal mínimo entre a aplicação das lamas no solo e a colheita dos alimentos, barreiras de proteção (por exemplo interditar o acesso público à área de aplicação das lamas e/ou enterrar as lamas no solo) e tomar medidas de proteção aos trabalhadores que têm contacto com as lamas.

Apesar de serem sugeridas estas medidas no documento da OMS [77], não são propostos valores de concentração limite de patogénicos que definam a aplicação específica de cada uma. Neste contexto, foi considerado pertinente tomar como referência a legislação à deposição de lamas de ETAR da África do Sul [78, 79] em que estas temáticas são definidas em mais detalhe. É proposto dividir as lamas em 3 categorias em função da concentração de patogénicos (em número de ovos Helmintos/g ST):

- **Classe A** (< 1): À semelhança da OMS para esta classe, a presença de patogénicos não impõe nenhuma restrição.
- **Classe B** ($1 < x < 4$): Vegetais ingeridos crus são restritos; O local deve ser interdito a pessoas e animais pelo menos durante 30 dias, entre outros.

- **Classe C (> 4):** O uso agrícola apenas é permitido, com restrições, caso as lamas apresentem um certo grau de estabilização ou sejam dispostas numa camada enterrada. Este fator é relevante pois lamas não estabilizadas podem-se traduzir em maus odores e, conseqüentemente, na atração de animais e insetos (como ratos ou moscas) que podem ser veículos para a proliferação de doenças. Caso a condição de estabilidade das lamas seja cumprida o uso agrícola é restrito a vegetais ingeridos crus, o local deve ser interdito a pessoas e animais por pelo menos 90 dias, entre outros.

Pormenores relevantes da legislação mencionada são apresentados em mais detalhe no Anexo XII.

Taxas Agronómicas

Para evitar que uma quantidade excessiva de nutrientes seja aplicada e conseqüentemente prevenir eventuais fenómenos de eutrofização (no caso de escorrência dos mesmos), a quantidade de nutrientes fornecida, idealmente, deve ser adequada atendendo às espécies plantas e ao tipo de solo – taxas agronómicas. O valor alvo é dado pela diferença do valor requerido por uma certa espécie, menos a quantidade de nutrientes fornecida naturalmente pelos solos [77].

Um dos exemplos desta temática é exposto na Tabela 4-1, onde são exibidas as quantidades requeridas de composto “normal” e de composto enriquecido com fertilizantes inorgânicos para diferentes espécies de plantações, para um certo tipo de solo, segundo as condições apresentadas no estudo [36].

Tabela 4-1: Quantidade de composto de LF e de composto de LF enriquecido a ser aplicado para diferentes espécies de plantas, para um certo tipo de solo [36].

Quantidade Requerida (t/ha)	Composto de LF	Composto de LF enriquecido (3% N)
Couve	10,8	3,4
Milho	10	3,0 - 4,0
Tomate	8	3,2
Beringela	7,5 - 9,5	3,7
Alface	12,5	4,3-5,0
Arroz	7,0-8,0	3,2

Salienta-se que este fator é mais difícil de controlar em fertilizantes e condicionadores orgânicos, quando comparado com fertilizantes inorgânicos, uma vez que é mais difícil estimar a quantidade de nutrientes presentes nos mesmos.

Metais Pesados

Os metais pesados são substâncias importantes de quantificar dado que, como descrito na 2.3.5, podem revelar-se tóxicos e prejudiciais na aplicação no solo. Sendo substâncias conservativas, a sua monitorização é relevante tanto em solo agrícola como em zonas florestais.

Os limites impostos devem ter em conta o grau de toxicidade do metal, considerando que existem metais mais prejudiciais do que outros (por exemplo Zinco e o Cobre que em pequenas quantidades são considerados micronutrientes, em comparação com o Cádmiu que mesmo em pequenas quantidades se pode revelar prejudicial). No Anexo XII encontram-se valores recomendados para a aplicação de lamas no solo, segundo a legislação da África do Sul [78, 79].

Vários autores na literatura, como [47], relatam que a concentração de metais pesados é, geralmente, baixa nas LF. Contudo, a sua monitorização assume maior relevância quando as LF são dispostas juntamente com Lamas de ETAR e/ou possam existir possíveis contaminações industriais.

4.3.2.3 Métodos de Aplicação de Lamas no Solo

Como discutido na secção anterior, tendo em conta a concentração de patogénicos e o grau de estabilização, é relevante distinguir a aplicação de lamas em solo agrícola e em solo não-agrícola. Por outro lado, existem dois principais métodos de deposição no solo:

Aplicação em Superfície

As lamas são aplicadas na superfície do solo, geralmente, estabilizadas e/ou com concentrações adequadas de patogénicos, que eliminam a necessidade de impor barreiras físicas ao contacto humano e/ou a vetores de doenças. Para tal, geralmente é necessário submeter as lamas a processos de tratamento “adicional” (por exemplo Co-Compostagem) cujos seus custos pressupõem a comercialização de produtos derivados, com o intuito de cobrir parte ou a totalidade dos custos da operação. Neste contexto, este método é maioritariamente aplicado em zonas agrícolas, considerando que este setor representa uma fração considerável da economia da maior parte dos países de baixo/médio PIB [52]. Apesar de menos provável, em situações excecionais também podem ser comercializados em setores não-agrícolas, como por exemplo na produção de madeira.

“Valas de Entrincheiramento”

São escavadas fileiras onde são dispostas as lamas, sendo posteriormente cobertas com uma camada de solo (Figura 4-2). Apesar de estar associado a custos de aplicação no solo superiores em comparação à aplicação em superfície, este método representa uma solução barata e simples para a deposição de lamas que exijam a imposição de uma barreira física com o contacto humano e/ou vetores de doenças (por exemplo lamas não-tratadas ou apenas desidratadas em leitos de secagem) [80]. Desta forma, este método está, tradicionalmente, associado a práticas não-agrícolas.

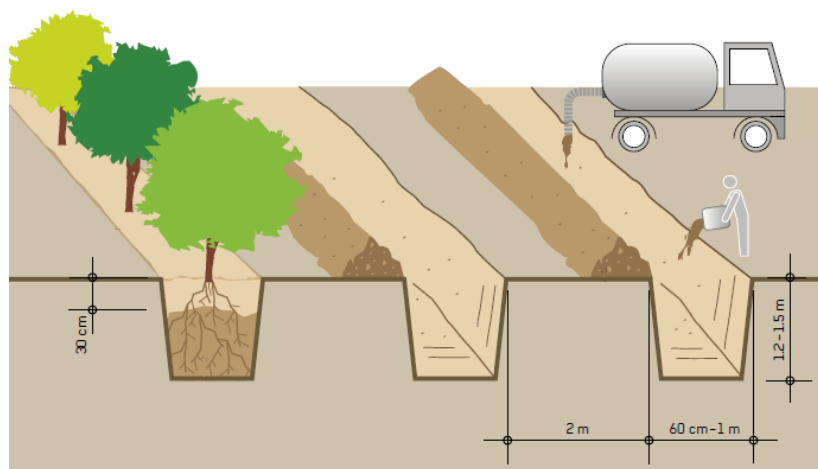


Figura 4-2: Representação do método "Valas de Entrincheiramento" [90].

Após a deposição das lamas, são, geralmente, plantadas árvores (de cariz florestal), por cima das fileiras, que beneficiam do seu valor nutricional e da melhoria das propriedades do solo, devido à reposição de matéria orgânica. As condições anaeróbicas nas fileiras promovem a decomposição natural das lamas, tornando-se indistinguíveis do solo passados alguns anos. Caso as árvores sejam plantadas para fins de produção de madeira, em que o tempo médio da primeira colheita varia, geralmente, entre 5 a 10 anos, é garantida a estabilização das lamas e concentrações seguras de patogénicos. O autor de [81] relata que a deposição de LF e Lamas de ETAR não-tratadas, com este método, resultou num aumento a rondar os 50% da madeira produzida por eucaliptos, na África do Sul.

A comercialização de lamas de baixa qualidade (baixo valor de mercado) torna pouco provável a cobertura de frações significativas dos custos da operação. Assim, a deposição através do método

“Valas de Entrincheiramento” pode assumir relevância na sua valorização, através da reabilitação de zonas florestais, na produção de madeira e/ou na deposição temporária das lamas até que cadeias de gestão definitivas sejam estabelecidas [80].

4.3.2.4 *Produtos Derivados de Lamas como Aditivos do Solo*

Composto

O processo de Co-Compostagem resulta numa matéria estabilizada, parecida com Húmus, que é classificada como condicionador de solo, considerando que os nutrientes estão maioritariamente na forma orgânica. No entanto, é relatada uma taxa de mineralização dos mesmos, tornando os nutrientes gradualmente disponíveis para as plantas [12]. Quando o processo é efetuado corretamente, a carga patogénica atinge valores seguros e o produto pode ser aplicado em áreas agrícolas sem restrições [55]. No entanto, em situações em que a monitorização das condições do processo e/ou da qualidade do produto final são reduzidas, é recomendada a aplicação de processos de higienização. Segundo [5], do ponto de vista agrícola, o composto de lamas, é um produto com valor consideravelmente superior a lamas não-tratadas visto exigir volumes de aplicação inferiores para atingir o benefício pretendido. Adicionalmente, o uso de composto estimula a sequestração de carbono nos solos (entre 0,1 a 4,5%, contabilizando o carbono orgânico total nos solos) [12].

Digerido de Digestão Anaeróbica

Do processo de Digestão Anaeróbica resulta um digerido caracterizado por ter a matéria orgânica estabilizada e altas concentrações de nutrientes na forma mineral. No entanto, quando comparado ao composto a sua concentração de matéria orgânica é inferior, devido à perda de carbono associada à formação de biogás. Segundo [24], a sua aplicação não tem impacto significativo na matéria orgânica no solo a longo prazo, mas sim no fornecimento de nutrientes às plantas. Desta forma, o digerido pode ser classificado como um fertilizante orgânico [24, 44].

Caso seja efetuada Digestão Termófila, a redução da carga patogénica no digerido, geralmente, permite o seu uso agrícola sem restrições. O mesmo não é garantido na Digestão Mesófila, sendo, normalmente, necessário submeter o produto a processos de higienização, ou aplicá-lo do solo de forma restrita a certas plantações (por exemplo alimentos que tenham contacto com o solo). Segundo [7] a pasteurização do digerido até valores inferiores a 1 ovo Helminto/g ST foi alimentada com sucesso a partir da combustão do biogás produzido no processo da Digestão Mesófila.

Lamas Estabilizadas com Cal

As lamas estabilizadas com Cal são seguras para deposição no solo e podem ser usadas sem restrições, quando o processo é realizado corretamente. Segundo [38], a aplicação destas lamas melhora a textura do solo e a sua capacidade de retenção de água, pelo que atuam como um condicionador de solo. Como mencionado na seção 3.5.2, lamas estabilizadas com cal tendem a ter uma menor concentração de nutrientes (ainda que na forma orgânica) quando comparadas a outros processos que produzam condicionadores de solo (por exemplo compostagem), sugerindo que o seu valor agrícola é mais reduzido em comparação a outras opções de valorização. Por outro lado, a sua aplicação é relevante em solos ácidos, visto o pH das lamas tratadas ser elevado e atuar como um corretor de pH.

Char

O *char* é o produto final da carbonização, com uma textura parecida com carvão, que devido às altas temperaturas do processo, é uma matéria estabilizada e livre de patogénicos, podendo ser aplicado sem restrições relativas a esta matéria. Segundo [43], atua como um condicionador de solo, aumentando a sua capacidade de retenção de água e promovendo a libertação lenta de nutrientes. Adicionalmente, devido ao seu pH alcalino, deve ser aplicado em solos ácidos.

A sua comercialização é maioritariamente no setor energético, no entanto, a possível comercialização no setor agrícola pode ser benéfica do ponto de vista logístico da operação, como escoamento de excedentes, satisfação de picos de procura, entre outros.

Lamas tratadas em Leitos Plantados

As lamas tratadas em leitos plantados exibem características semelhantes ao composto maturado [5]. Contudo, não é garantido que a carga patogénica do produto final permita o seu uso agrícola sem restrições pelo que, deve ser considerada a aplicação de processos de higienização.

Lamas tratadas em Armazenamento Prolongado

Lamas tratadas em Armazenamento Prolongado, geralmente após processos de redução de teor de humidade e já com alguns níveis de estabilização, são classificadas como condicionadores de solo. Para uso agrícola, caso não sejam aplicados outros processos de tratamento, é aconselhável altos tempos de retenção nas instalações, para privilegiar a redução da carga patogénica e fenómenos naturais de estabilização aeróbica, devendo as lamas, idealmente, serem misturadas para estimular o arejamento.

Ainda assim, devido à menor quantidade de estudos realizados na área, especialmente na aplicação a LF, é aconselhável uma alta monitorização do produto final e a existência de um processo “*backup*” (por exemplo reservas de Cal, se o tipo de solo o permitir) caso os níveis pretendidos de patogénicos / estabilização não sejam atingidos.

Lamas Desidratadas

As lamas desidratadas, geralmente em leitos de secagem, podem ser classificadas como um condicionador de solo. Apesar de terem algum valor agrícola, a qualidade do produto final é inferior quando comparado aos produtos finais acima descritos devido ao facto de a matéria ser pseudo-estabilizada (compostos orgânicos maioritariamente em estruturas complexas) e de não existir uma redução considerável da carga patogénica. Adicionalmente, estes fatores tornam pouco provável que sejam cumpridos os *standards* de qualidade pretendidos para a comercialização no setor agrícola, sendo, provavelmente necessária a aplicação de níveis adicionais de tratamento.

Por outro lado, deve ser considerada a sua deposição no solo (valorização sem comercialização), em áreas não-agrícolas, sendo recomendado o método de “Valas de Entrincheiramento” para reduzir o possível contacto humano e a atração de vetores de doenças. A redução do teor de humidade está associada a várias vantagens neste método de deposição, em comparação com a deposição de lamas não-tratadas, tais como, redução dos custos de transporte e de deposição, e aumento da área elegível de deposição atendendo à redução de fenómenos de infiltração de escorrências ou drenados contaminados (ver Anexo XII).

Lamas Não-Tratadas

As lamas não-tratadas podem ser classificadas como um condicionador de solo e apresentam limitações de deposição semelhantes às lamas tratadas em leitos de secagem. No entanto, geralmente, com maior magnitude (menor nível estabilização e maior carga patogénica), custos de transporte/deposição superiores, associados ao seu maior volume, e com mais restrições na seleção da área de deposição (ver Anexo XII). De forma geral, a sua deposição apenas deve ser considerada em áreas não-agrícolas pelo método “Valas de Entrincheiramento” (valorização sem comercialização).

4.3.3 Valorização Energética

4.3.3.1 Descrição e Relevância

A Valorização Energética das lamas tem por objetivo tirar partido do seu poder calorífico para a produção de combustíveis, geralmente, com vista à sua comercialização.

Em países de baixo/médio PIB, de forma geral, o uso de combustíveis sólidos, como madeira, carvão e outros tipos de biomassa, para atividades domésticas e industriais é recorrente [22]. Estima-se que 2,4 bilhões de pessoas dependem destes tipos de combustível para fonte de energia, existindo zonas onde o consumo doméstico dos mesmos é superior a 90% [31, 52]. Um dos exemplos é o Uganda onde, do total de energia consumida pela população, 78,6% advém de madeira, 5,6% de carvão e 4,7% de resíduos agrícolas, enquanto derivados de petróleo e eletricidade compõem apenas 9,7% e 1,4%, respectivamente [31]. Adicionalmente, o crescimento dos núcleos urbanos destes países prevê um aumento do uso dos combustíveis sólidos [52].

Para satisfazer as necessidades energéticas das populações, em cima mencionadas, são relatados fenômenos de deflorestação severa que têm impactes negativos nos ecossistemas locais e até mesmo numa escala global, atendendo às alterações climáticas. O *World Economic Forum*, em 2020, estima que 50% da madeira extraída das florestas, a nível mundial, é para uso de combustível.

Neste contexto, surge a importância da valorização energética das lamas em países de baixo/médio PIB. Como é possível ver na Figura 4-3, a utilização de LF e lamas de ETAR como fonte de energia é pertinente uma vez que o seu poder calorífico é comparável com outros tipos de biomassa.

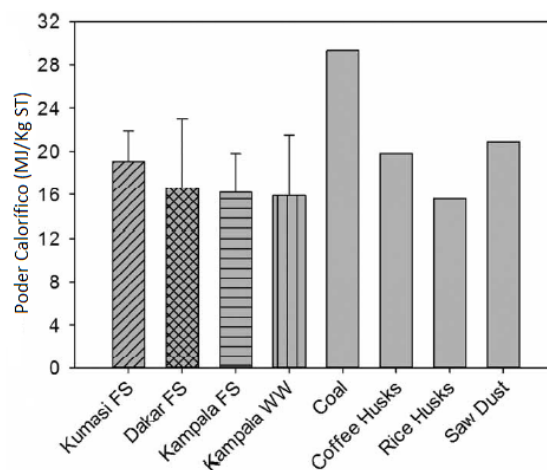


Figura 4-3: Comparação do poder calorífico de LF (de 3 cidades distintas) com outros tipos de biomassa.

Por isso, a valorização energética das lamas pode não só mitigar falhas diretamente relacionadas com as suas redes de gestão, como também fenômenos de deflorestação, proteção de ecossistemas, emissões de CO_2 , entre outros. Adicionalmente, segundo [30], estes métodos de valorização têm potencial de gerar mais receitas quando comparados à valorização agrícola.

4.3.3.2 Produtos Derivados de Lamas Fecais para Valorização Energética

Combustíveis Sólidos Carbonizados

Os combustíveis carbonizados resultam da carbonização de lamas, sendo a matéria que fica no reator após o processo - *char*. Como mencionado na secção 3.8.1, a sua concentração patogénicos é, geralmente, nula, no entanto o seu poder calorífico pode ser relativamente baixo. Como tal, é desejável a Co-Carbonização com outros tipos de biomassa adequados e/ou o enriquecimento do produto final com outras matérias, idealmente resíduos (como pó de carvão). Para tal, a mistura é, geralmente, compactada na forma de briquetes ou *pellets*, facilitando a sua comercialização.

Um dos exemplos é a compactação de *char* de LF com carbono vegetal, geralmente à base de madeira. A Figura 4-4 exhibe os resultados de um estudo feito por [28], em que foi determinado o valor do poder calorífico para vários rácios de mistura.

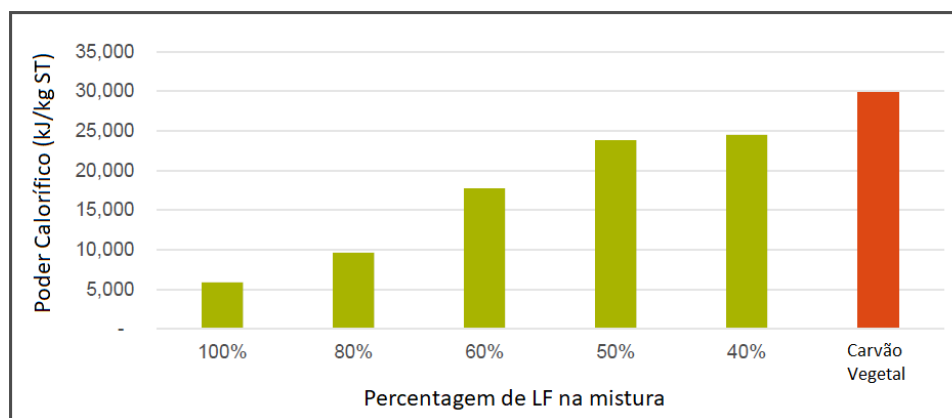


Figura 4-4: Poder calorífico em função da percentagem de mistura de Lamas Fecais com Carvão Vegetal, adaptado de [28].

Do ponto de vista da qualidade do combustível e do impacto ambiental, a combustão de *char* de LF revela-se menos benéfica quando comparada a LF “simplesmente” desidratadas [22]. No entanto, a carbonização pode assumir relevância em zonas onde é pretendido um produto carbonizado, tanto no setor doméstico, como no industrial. Um dos exemplos é na co-combustão com carvão a altas temperaturas, para fins de produção de eletricidade, aço ou vidro [22], considerando que as fornalhas estão, geralmente, projetadas para este tipo de combustíveis.

Por outro lado, o autor de [28] sugere, que o uso doméstico do *char* de lamas pode ser estimulado devido à sua combustão ser mais duradoura quando comparada a carvão mineral. O mesmo autor estima que, apesar da sua ignição demorar por norma 20 minutos e o seu poder calorífico ser inferior, os briquetes carbonizados são uma opção economicamente mais eficiente que o carvão (4,4 vezes), relativamente à duração da combustão. Nas condições do estudo, 26 USD de carvão no Uganda, traduziram-se numa combustão de aproximadamente 48 horas e, em comparação 26 USD de briquetes derivados de LF, traduziram-se em 210 horas de combustão.

Combustíveis Sólidos Não-Carbonizados

Os combustíveis sólidos não-carbonizados são, geralmente, compostos por lamas desidratadas, uma vez que a sua combustão é autossuficiente para teores de ST > 50-70% [20]. Contudo, é desejável que tenham valores a rondar os 90% para a combustão ser mais eficiente [22].

Como mencionado na secção 3.9, uma prática recorrente é a compactação de LF em briquetes ou *pellets* com outras matérias, com o intuito de enriquecer o produto (como por exemplo pó de carvão) e posterior secagem passiva até valores a rondar os 90% ST. Apesar de as lamas não sofrerem processos de estabilização, o autor de [77] relata que para estas gamas de teores de ST, existe uma grande redução/eliminação de odores.

Este tipo de combustível (enriquecido ou não) pode assumir um papel relevante no setor energético, em países de baixo/médio PIB, considerando que, geralmente, a maioria das populações depende de combustíveis sólidos. Relativamente a atividades industriais, segundo [29], com base no poder calorífico, as LF desidratadas revelam-se competitivas com outros combustíveis usados. Adicionalmente, foi comprovado em escala piloto, pelo autor de [30], que é possível aquecer fornos alimentados com LF desidratadas (teor de ST a rondar os 90%) até temperaturas de 1015°C, e manter temperaturas de 800°C, cumprindo assim requisitos de várias indústrias, tais como as de produção de tijolos e regeneração de óleo.

Um dos desafios relacionados com estes métodos de deposição, é o facto de desidratação das lamas até 90% ST, não garantir a higienização do produto (a menos que seja aplicado tratamento térmico). Apesar de não existirem regulações aplicadas ao tema [36], é relevante a higienização do mesmo

devido ao possível contacto (manuseamento) com as pessoas. Este fator pode assumir menor relevância em aplicações Industriais.

Na secção 4.3.3.3 é apresentado um caso de estudo, da Sanivation, relacionado com este tipo de valorização.

Biogás

O biogás é um dos produtos da Digestão Anaeróbica das lamas, prontamente combustível e é considerado uma fonte de energia de qualidade, no estado gasoso. A sua comercialização pode assumir relevância para atividades comerciais ou municipais, no entanto é pouco provável no setor doméstico uma vez que, em países de baixo/médio PIB, o uso de combustíveis sólidos é predominante. No entanto, a procura do produto deve ser analisada caso-a-caso. Por outro lado, como mencionado em 4.3.2.4, a combustão do biogás pode ser usada internamente da ETLF para a alimentar pasteurização do digerido, com o intuito de promover a sua comercialização no setor agrícola [7].

Outra possível forma de valorização do biogás, é a sua conversão em eletricidade, estando, no entanto, associada a custos capitais e operacionais superiores, derivados do processo de conversão [47]. A eletricidade gerada pode ser usada internamente na ETLF ou comercializada, devendo a viabilidade do processo ser analisada caso-a-caso. Um fator que pode ser impactante nesta temática, é o facto do ponto 7.1 dos ODS ter como proposta o fornecimento de eletricidade sustentável a toda a população até 2030, que pode tornar esta prática mais relevante e atrativa para a subsídios e financiamentos externos.

4.3.3.3 Caso de Estudo – Sanivation

A Sanivation é uma empresa social, sediada no Quênia, muito ativa na área da gestão de LF em países de baixo/médio PIB. Um dos seus projetos é a valorização energética de LF, para a produção de briquetes, num campo de refugiados em Kakuma, Quênia.

A Sanivation oferece um serviço que começa por melhorar as condições de saneamento básico da população aderente. É instalada uma sanita com um sistema de separação de urina, onde as LF são armazenadas num compartimento e a urina escoada para uma latrina de infiltração [18]. As sanitas são instaladas nas casas das famílias e (normalmente com um uso privado), acima do solo para facilitar a sua recolha e mitigar impactos resultantes da escavação de uma latrina e possível contaminação de níveis freáticos.

As lamas são recolhidas, normalmente 2 vezes por semana, pela Sanivation, e transportadas para as suas instalações onde existe uma ETLF. O número de sanitas instaladas à data do documento [17] era de 500.

Na linha de tratamento, as lamas são tratadas termicamente por um sistema que utiliza a radiação solar para aquecer as mesmas a temperaturas a rondar os 65 °C por mais de 3 horas. A capacidade do sistema é de 2 toneladas de LF por dia [17]. Um dos fatores que torna o tratamento eficiente é o facto das lamas terem um alto teor de sólidos, devido à pouca entrada de águas pretas e cinzentas no compartimento de armazenamento.

As lamas tratadas são trituradas e posteriormente usadas na produção de briquetes, maioritariamente com a função de *binder*, para conferir estrutura à mistura de outros materiais resíduos ricos em carbono, como pó de carvão, resíduos agrícolas e *proposis* carbonizada (uma espécie de árvore invasiva no este de África). É adicionada água à mistura para conferir a consistência desejada para a compactação dos briquetes, sendo, posteriormente, desidratados ao sol por uma duração a rondar os 2-3 dias (Figura 4-5). Antes de entrarem no mercado, existe um controle de qualidade dos mesmos.



Figura 4-5: Parte da linha de tratamento de uma unidade de produção de briquetes (esquerda) e secagem solar dos briquetes (Direita) [18].

A qualidade do produto final é comparável com outros combustíveis sólidos usado em países de baixo/médio PIB, sendo até mesmo superior em alguns indicadores, como mostra a Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Comparação do poder calorífico, tempo de combustão e emissões, entre carvão, madeira e briquetes da Sanivation.

	Unidade	Carvão	Madeira	Briquetes Sanivation
Poder Calorífico	MJ/kg	29	15	22
Tempo de Combustão	Horas	3	1	4,5
Emissões (CO_2)	ppm	118	NA	82
Emissões (PM 2,5)	ppm	213	NA	196

O esquema de negócio da Sanivation envolve cobrar uma taxa de saneamento aos utilizadores, pelo serviço e equipamento, a rondar os 2 USD por mês. A outra forma de receita é a venda dos briquetes. Para tal, foi feito um estudo de mercado e realizadas entrevistas a potenciais compradores sobre a sua visão do produto.

Em Kakuma, a receita da empresa não foi suficiente para cobrir os gastos, sendo o saldo negativo a rondar os 122 USD/(sanita*ano). Contudo, é importante mencionar dois fatores:

- **Escala do Projeto:** Devido a ser um projeto de pequena escala, vários processos podem ser otimizados para reduzir os custos (como por exemplo a venda e a distribuição). É também relevante realçar o facto do valor ambientalista e social, que o projeto promove, não ser quantificado nos custos.
- **Aterro Sanitário:** Estimativas da Sanivation apontam o custo da deposição em aterro como sendo 100 USD/(sanita*ano).

Na referência [17 e 18] é possível consultar informações mais detalhadas sobre o modelo económico e a componente técnica do projeto.

4.4 Aterro Sanitário

4.4.1 Descrição

A deposição em aterro sanitário é um método que, quando bem aplicado, envolve uma deposição final segura das lamas. Esta prática pode ser definida como o enterro planeado das lamas, em locais apropriados para o efeito [1], geralmente numa zona previamente escavada e impermeabilizada, onde

as lamas são dispostas e posteriormente cobertas por uma camada de solo, com cerca de 35 cm, que diminui a emissão de maus odores e presença de moscas [10].

Um dos aspetos mais importantes na gestão do aterro sanitário é garantir que não existe contaminação do ambiente em seu redor. As principais fontes de contaminação a ter em conta são: infiltração de fluidos para o solo e consequente contaminação de águas subterrâneas ou até mesmo de águas superficiais (principais contaminantes são nutrientes, metais pesados, CQO, entre outros); emissões de gases voláteis nocivos para a atmosfera (como gases efeito estufa, gases nocivos para os ecossistemas e maus odores); e partículas de dimensão reduzida transportadas pelo vento [56]. Adicionalmente, a implementação de aterros sanitários tem um impacto negativo em termos paisagistas e no valor das terras e na utilização de espaço.

Idealmente, o nível de controle dos impactos mencionados, nos aterros sanitários, deve ser ajustado ao tipo de resíduos que irão receber. Por exemplo, o nível de cuidados a ter com resíduos potencialmente perigosos (como resíduos hospitalares) é superior aos cuidados que se devem ter com resíduos “normais” (como lixo municipal). Como tal, os aterros devem ser classificados consoante o seu nível de mitigação de impactos e, por outro lado, os resíduos a serem encaminhados, devem ser classificados consoante os potenciais impactos que podem causar.

Nas referências [59, 60, 61, 62] é descrita a legislação aplicada à deposição de resíduos em aterro sanitário, na África do Sul. Considerando que na maior parte dos países de baixo/médio PIB, é verificada a inexistência de legislação dedicada à gestão de resíduos, incluindo LF, a adoção do caso da África do Sul como referência é pertinente. De acordo com a mesma, os resíduos são classificados como não tóxicos (resíduos normais) ou tóxicos (numa escala de 1 - extremamente perigoso - a 4 - pouco perigoso) e os aterros consoante o seu grau de proteção (G – Aterro “Normal”, H:h – aterro com alguns cuidados especiais, H:H – Aterros com cuidados especiais) [60]. Resíduos classificados como: “não-tóxicos”, devem ser encaminhados para aterros “normais”; “tóxicos” de nível 3 ou 4, devem ser encaminhados para aterros H:h ou H:H; e “extremamente tóxicos” de nível 1 ou 2, devem ser encaminhados para aterros H:H [59].

4.4.2 Deposição de Lamas em Aterro Sanitário

A legislação da África do Sul é direcionada a lamas de ETAR, no entanto, foi considerado pertinente a sua aplicação a LF. Segundo [79], as lamas são classificadas como um resíduo pouco tóxico, geralmente de nível 3 ou 4, devido ao facto de poderem ter constituintes tóxicos na sua composição (como mercúrio), no entanto em concentrações reduzidas. Como tal, devem ser encaminhadas para aterros com cuidados especiais H:h ou H:H. Em casos excecionais, se for provado que as lamas não vão gerar drenados contaminados, podem ser dispostas em aterros G.

É importante perceber que a deposição em aterro está associada a uma taxa de deposição (geralmente cobrada por tonelada de resíduos) que é tanto maior quanto maior forem os cuidados requeridos. Por exemplo, o custo de deposição é, geralmente, superior nos aterros H:H em comparação com os (H:h), que por sua vez é superior aos aterros (G). Como tal, é desejável a deposição de lamas em aterros com menores cuidados, para diminuir as taxas de deposição, sempre garantindo que a qualidade das lamas é adequada ao nível do aterro sanitário.

Por outro lado, é desejável que as lamas tenham um alto teor de ST, para minimizar os custos da operação, considerando que: volumes menores traduzem-se em menores taxas de deposição e em custos de transporte mais reduzidos; diminuem/eliminam a ocorrência de drenados contaminados que pode permitir que as lamas sejam encaminhadas para aterros (G). Adicionalmente, segundo [79], a maior parte dos aterros requer um teor de ST superior a 20%.

Deve, também, ser considerada a possibilidade da incineração ou co-incineração das lamas, considerando que são relatadas reduções de volume na ordem dos 90% do valor original. Adicionalmente, as cinzas resultantes do processo são, geralmente, consideradas como um resíduo “normal” e podem ser dispostas em aterros (G). No entanto, no caso co-incineração, com outros resíduos potencialmente perigosos, apesar de o risco ser minimizado, a sua classificação deve ser reavaliada de acordo com normas descritas no documento [59].

Por outro lado, é importante perceber que os aterros sanitários, em países de baixo/médio PIB, geralmente, revelam deficiências ou são inexistentes, sendo recorrente a deposição dos resíduos em lixeiras (Figura 4-6). Um estudo, realizado pelos autores de [57] em 31 aterros sanitários em 13 países da África Subsariana, revela que em 80% dos casos é realizado pouco/nenhum controle dos potenciais impactos negativos (como emissão de gases nocivos, escorrências poluentes, entre outros). Tais práticas tornam a deposição em aterro sanitário insegura.



Figura 4-6: Lixeira a "céu aberto" na zona Sul de África (imagem retirada do site das Nações Unidas em janeiro de 2022).

Um dos exemplos é o caso relatado pelos autores de [58], em que foi analisada a qualidade da água de um poço que abastecia duas povoações rurais perto de um aterro sanitário em Abidjan, na costa do Marfim. Os resultados revelaram que a água tinha concentrações inseguras de agentes patogénicos (de acordo com as normas da OMS) e era uma potencial causa de doenças relacionadas com diarreia nas povoações. Como mencionado, em países de baixo/médio PIB, é também recorrente a deposição de lamas em lixeiras, que consistem em locais, geralmente, escolhidos sem qualquer planeamento, não impermeabilizados e sem cobertura para eventuais fenómenos de precipitação que promove a formação de volumes adicionais de drenados contaminados.

4.5 Aplicabilidade dos métodos

4.5.1 Princípios

Os métodos de deposição final de lamas descritos neste capítulo, podem ser agrupados nas seguintes categorias: Comercialização de Produtos Derivados (Valorização Energética ou Valorização Agrícola); Deposição no solo (valorização sem comercialização); e Deposição em Aterro Sanitário.

Apesar do biogás, proveniente da digestão anaeróbica, poder ser utilizado internamente, diretamente ou sob a forma de eletricidade, o método foi considerado de “comercialização”, pois foi admitido que os custos do processo pressuponham a comercialização do digerido (pelo menos).

Idealmente, na tomada de decisão do método de deposição a aplicar, todas as alternativas devem ser consideradas. Ainda assim, com base na informação recolhida ao longo do capítulo, foi estabelecida

uma hierarquia entre os métodos, atendendo aos respetivos benefícios nas dimensões ambiental e socio-económica, numa visão de gestão de resíduos a longo-prazo: 1) Devem ser considerados em primeiro lugar os métodos que envolvem a comercialização de produtos derivados, estimulando uma economia circular; 2) Métodos que envolvem a deposição no solo (valorização sem comercialização) devem ser considerados em segundo; 3) Deposição em aterro sanitário deve ser considerada em último lugar.

Apesar da preferência de aplicação dos métodos de comercialização versus a deposição no solo não ser clara na literatura, este princípio foi considerado pertinente com base na informação exposta no decorrer da presente secção.

Adicionalmente, na aplicação de qualquer método que pressuponha o tratamento de lamas e, conseqüentemente, a construção de uma ETLF, deve ser tida em conta a temática da centralização/descentralização [33, 43]. Apesar da convenção comum de que estações centralizadas se traduzem em custos de tratamento e deposição mais reduzidos por kg de ST, atendendo às características dos sistemas de Saneamento “*On Site*”, esta condição nem sempre é verificada. Isto deve-se ao facto de os custos de transporte de lamas, entre os compartimentos e a ETLF, se “sobrepor” à redução de custos associada pelo processamento desse fluxo adicional. Nestas situações, deve ser ponderada a construção de várias ETLF, de modo que estes dois fatores sejam otimizados.

Por outro lado, devem ser considerados os seguintes fatores:

- **Área de Implementação:** Atendendo a que os processos de tratamento baseados em mecanismos naturais (menores custos de implementação e operação) estão associados a elevados requisitos de área, é pouco provável que sejam satisfeitos por uma ETLF centralizada.
- **Diversificação dos métodos de Deposição:** Assumindo que são identificadas oportunidades de comercialização para diferentes produtos derivados de lamas (por exemplo composto e briquetes), pode ser benéfico a construção de duas (ou mais) ETLF, associadas a esquemas de tratamento diferentes.

A temática da centralização versus descentralização é abordada em mais detalhe no Anexo XIII.

4.5.2 Aplicabilidade de métodos que pressupõem a comercialização de produtos derivados

Os métodos que pressupõem a comercialização de produtos derivados de lamas, tanto na valorização energética como na valorização agrícola, estão, geralmente associados a esquemas de tratamento mais complexos, com vista a uma qualidade superior das lamas e conseqüente maior valor de mercado. Neste contexto, estes métodos devem ser aplicados quando as receitas da comercialização dos produtos, possível atração de financiamentos externos e impactos positivos previstos no contexto ambiental e socio-económico a longo prazo, justifiquem o investimento em custos adicionais (associados aos níveis de tratamento superiores, distribuição do produto, entre outros). É importante perceber que esta é uma visão generalista do problema, considerando que a avaliação da viabilidade dos métodos e da sua posterior comparação, é um processo complexo que deve ser analisado caso-a-caso.

Para potenciar o sucesso destes métodos, existem certas condições de mercado que devem ser averiguadas:

- **Existência de Mercado:** É fundamental garantir a existência de mercado para os produtos derivados de lamas (oferta e procura) e identificar quais as oportunidades de valorização existentes. Um bom exemplo é o facto de a valorização energética das lamas poder produzir produtos com diferentes características (briquetes carbonizados ou não-carbonizados, biogás e eletricidade). Neste caso, é importante perceber qual a dimensão do mercado para estes

produtos, quais as tecnologias de combustão ou uso energético utilizadas pelos potenciais compradores e qual o preço/qualidade dos produtos concorrentes.

- **Aceitabilidade do Produto:** Tradicionalmente, em muitas zonas do globo, existe o dogma de que a utilização de produtos derivados de excreta humana representam um perigo para a saúde pública (apesar de terem sido submetidos a processos de tratamento que os tornem seguros). Como tal, para a comercialização dos mesmos, é importante averiguar junto das comunidades a sua aceitabilidade do produto. Este fator toma maior expressão para aplicações de valorização agrícola, visto existir “entrada” direta na rede alimentar. Os autores de [65, 66] concluíram que a certificação dos produtos pelas entidades reguladoras é um fator relevante. Por outro lado, na valorização energética, especialmente em aplicações industriais, a aceitabilidade do produto é, geralmente, um fator menos impactante.
- **Qualidade do Produto:** Para a comercialização dos produtos derivados de lamas ser bem-sucedida, é necessário que tenham uma qualidade comparável (idealmente superior) aos produtos concorrentes no mercado. Muitas vezes, dependendo do método de tratamento aplicado, são incluídos processos de higienização e de compactação com aditivos, no esquema de tratamento, com o intuito de melhorar a qualidade do produto final. Adicionalmente, a mesma deve estar em conformidade com o contexto legal do local de aplicação.

Do ponto de vista de gestão do esquema de negócio, é altamente desejável a venda dos produtos derivados de lamas a atividades comerciais ou industriais, devido ao facto de serem potenciais compradores de grandes quantidades de produto de forma consistente, do fator “aceitabilidade do produto” assumir menor relevância e da rede de distribuição ser simplificada [22]. Adicionalmente, em aplicações industriais existe maior probabilidade de haver controle e monitorização de possíveis problemas tais como exposição a patogénicos, tratamento de efluentes gasosos (no caso da combustão de combustíveis sólidos), entre outros.

4.5.3 Aplicabilidade da deposição no solo (valorização sem comercialização)

A prática de deposição no solo, sem comercialização, geralmente, pressupõe a deposição de lamas cujo valor de mercado antecipava que não fossem cobertas frações significativas dos custos da operação (geralmente lamas provenientes de leitos de secagem ou não-tratadas). No entanto, devido aos menores níveis de tratamento, os custos associados a esta etapa são, geralmente, inferiores.

A maior dificuldade na sua aplicação está associada à seleção de um local elegível de deposição, uma vez que não é garantido que as lamas estejam estabilizadas e tenham concentrações seguras de patogénicos [80]. Desta forma, é necessário garantir que não existam contaminações de corpos de água e contacto direto/indireto com Humanos, através de várias restrições (Anexo XII) associadas à seleção do local de deposição, ao método de aplicação das lamas no solo, entre outros. Neste contexto, a deposição no solo está, geralmente, associada a custos adicionais de deposição, atendendo à necessidade de interdição da área de aplicação, deposição das lamas pelo método “Valas de Enrincheiramento” (descrito na secção 4.3.2.3), entre outros.

Em casos excecionais, pode ser vantajosa a aplicação de níveis de tratamento adicional, com o intuito de eliminar/reduzir a necessidade de aplicar as medidas de segurança descritas. Esta situação apenas deve ser considerada quando o aumento dos custos de tratamento é justificado pela redução dos custos de deposição. Por motivos de simplificação foi assumido que para este efeito, apenas devem ser considerados os seguintes métodos de tratamento:

- **Estabilização Alcalina:** método de fácil implementação a ser considerado em zonas onde o acesso à Cal é facilitado/barato e as características do solo o permitem (pH).
- **Leitos de Secagem Plantados:** método de fácil implementação com custos comparáveis aos leitos de secagem.
- **Armazenamento Prolongado:** método de fácil implementação e baixos custos.

A deposição de lamas no solo pode assumir relevância em situações rurais ou semi-rurais de pequena média escala, em que o volume de lamas a ser processado é mais reduzido e é provável a existência de áreas elegíveis de deposição em proporções significativas. Em grandes núcleos urbanos onde o volume de lamas a serem dispostas é elevado e a existência de locais elegíveis é reduzida ou associada a elevados custos de transporte, é pouco provável que este método seja viável para a deposição de frações significativas das lamas geradas.

Por outro lado, a Deposição no Solo pode ser indicada para reabilitação de zonas florestais ou de produção de madeira que, devido ao cariz não agrícola das plantações, não é exigida uma elevada qualidade no produto final. Desta forma, é possível fornecer matéria orgânica ao solo e nutrientes às plantas (respeitando as taxas agronómicas) com a aplicação de lamas com níveis de tratamento inferiores. Adicionalmente, este método solo pode assumir relevância em situações temporárias até que cadeias de gestão definitivas que culminem na comercialização sejam estabelecidas.

Como mencionado, foi considerado na presente dissertação, que a aplicação a Deposição no Solo (apesar de valorizar as lamas) apenas deva ser considerada quando a comercialização de produtos derivados de lamas não é viável. Isto deve-se ao facto da aplicação de lamas não estabilizadas e/ou higienizadas no solo estar associada à restrição do acesso público e de animais à zona de deposição, que a longo prazo, especialmente em grande escala, poderão ter impactes sociais e ambientais negativos. Adicionalmente, este método exige, geralmente, altos níveis de monitorização (por exemplo a água subterrânea) que no contexto de países de baixo/médio PIB pode representar um desafio. Por outro lado, nos casos em que na Deposição no Solo é benéfica a aplicação de níveis de tratamento adicional e consequente produção de um produto com qualidade superior, deve primeiro ser considerada a comercialização do mesmo visto, existir um retorno económico direto. Neste contexto, foi considerado preferível assegurar cadeias de gestão que fomentem uma economia circular e que, simultaneamente, garantam a estabilização/higienização do produto final.

4.5.4 Aplicabilidade da deposição em Aterro Sanitário

A deposição em aterro sanitário é um método que não valoriza as lamas e como tal, a sua aplicação a longo prazo, geralmente, revela-se menos benéfica no contexto ambiental e socio-económico, quando comparada aos métodos que envolvam valorização. Desta forma, apenas deve ser considerada como método de deposição temporário, até que redes de gestão definitivas que valorizem as lamas sejam estabelecidas. Caso estes métodos não sejam viáveis, deve ser identificado o fator limitante e esforços devem ser feitos para a sua implementação, tais como educação do consumidor (aumentar a aceitabilidade dos produtos derivados de lamas), atração de financiamentos externos e/ou subsídios aos atores envolvidos, entre outros.

Nas situações em que a deposição em aterro seja expectável, deve ser garantido que: 1) as instalações tenham capacidade suficiente para receber as lamas, no horizonte de projeto; 2) as instalações estão preparadas, a nível de controlo de impactes (escorrências, odores, entre outros), para receber resíduos potencialmente contaminados.

Se a condição 1) não for verificada, deve ser considerada a expansão do aterro sanitário, ou a construção de um novo, dependendo da opção que se revele mais viável.

Se a condição 2) não for verificada, por exemplo no caso da deposição em lixeiras, o local de deposição deve ser reabilitado ou construído um aterro sanitário “de raiz”, dependo da opção que se revelar mais viável. Enquanto não exista um local adequado de deposição, esforços devem ser feitos para reter as lamas nas interfaces (evitando, claro, situações de transborde), nas ETAR ou ETLF, ou em outra instalação identificada que retenha as lamas até que o aterro sanitário esteja operacional.

5. Sistema de Apoio à Decisão para a Seleção de Soluções de Tratamento e Deposição de Lamas

5.1 Objetivos

Este capítulo tem por fundamento a construção de uma árvore-de-decisão onde é sugerido um esquema de processamento (tratamento e/ou deposição final) de LF e/ou lamas de ETAR, para os seguintes cenários:

Cenário 1) - Inexistência de qualquer infraestrutura encarregue pelo processamento das lamas (tratamento e deposição). Exemplos deste cenário, constituem situações em que as lamas são recolhidas dos compartimentos, porém: são descarregadas ilegalmente na natureza sem qualquer planeamento; vendidas a um custo muito reduzido ou cedidas a agricultores (em negócios informais com as entidades de recolha e transporte); entre outros.

Cenário 2) - Existe uma infraestrutura encarregue pelo processamento das lamas, no entanto o seu tratamento e/ou deposição final é deficiente. Exemplos deste cenário são: a qualidade do produto final é inadequada para o método de deposição final aplicado; as lamas tratadas são dispostas em aterro sanitário, no entanto existem oportunidades de valorização inexploradas; não existe um método planeado que garanta a deposição final de parte ou totalidade das lamas e como tal, estas acumulam-se nas estações de tratamento (muito comum em sistemas de lagoas e leitos de secagem plantados, em países de baixo/médio PIB); entre outros.

Adicionalmente, tendo em conta o esquema de processamento, é pretendido averiguar a necessidade de construção de uma ETLF e/ou o tratamento das lamas em infraestruturas existentes.

5.2 Metodologia e Critérios

O método de seleção apresentado no presente capítulo é baseado na informação exposta ao longo do documento, maioritariamente através de revisão da literatura, em que foram apurados quais os métodos de tratamento e de deposição de lamas adequados para países de baixo/médio PIB e quais os fatores que devem ser considerados para a sua aplicação, de acordo com os objetivos delimitados na secção 1.3.

O método de decisão baseia-se num esquema “*Top-Down*”, pelo que são considerados os métodos de deposição a aplicar, antes de considerar os possíveis níveis de tratamento. Este raciocínio foi considerado pertinente, uma vez que a aplicação dos métodos de deposição está dependente de certas condições iniciais (secção 4.5). Um bom exemplo desta premissa é no estudo da aplicação de métodos de comercialização, dever ser garantida existência de mercado e aceitabilidade de produto, antes de serem ponderadas e comparadas as possíveis alternativas de tratamento a aplicar às lamas.

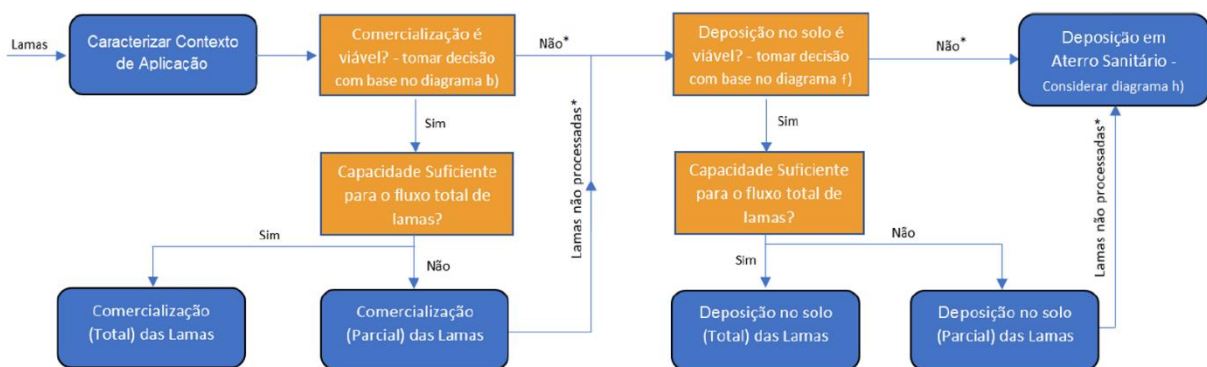
Como mencionado na secção 4.5.1, apesar do facto de que todos os métodos de deposição devam ser avaliados e comparados, pelas razões mencionadas na mesma secção, foi estabelecida uma hierarquia entre os métodos de deposição: 1) métodos que envolvem a comercialização de produtos derivados devem ser considerados primeiro; 2) métodos que envolvem a deposição no solo devem ser considerados em segundo; 3) deposição em aterro sanitário deve ser considerada em último lugar.

O método começa por caracterizar o contexto de aplicação, seguido do estudo da viabilidade da aplicação dos métodos que envolvem comercialização de produtos derivados. Caso seja perspectivada a viabilidade, estes devem ser aplicados à fração de lamas que satisfaça esta condição. Na eventualidade da capacidade de processamento destes métodos não ser suficiente para absorver o fluxo total de lamas, para a fração não processada, deve ser estudada a viabilidade da aplicação de

métodos que envolvem deposição no solo. De forma análoga, caso a capacidade perspectivada destes métodos não seja suficiente para absorver o fluxo de lamas considerado, para a fração não processada, deve ser considerada a deposição em aterro.

Uma boa simplificação deste raciocínio é o exemplo de uma cidade que “produza” 150 m³ de lamas/dia em que, após a identificação de oportunidades de comercialização e estudo da viabilidade da aplicação respetivos métodos de tratamento, foi projetada uma capacidade de processamento (a operar de forma viável) de 50 m³ lamas/dia para a produção de briquetes não-carbonizados e 50 m³ de lamas/dia para a produção de composto. Supondo que não existam mais oportunidades de comercialização e que a deposição no solo se revela inviável, o fluxo restante de 50 m³/dia deve ser encaminhado para aterro sanitário.

Sempre que a capacidade de processamento de um método com um nível hierárquico mais elevado não é suficiente para o fluxo total de lamas, deve ser identificado o seu fator limitante e esforços devem ser feitos para o reduzir/eliminar. A Figura 5-1, Diagrama a), exhibe esquematicamente o raciocínio do método.



* Deve ser identificado o fator limitante e esforços devem ser feitos para o reduzir/eliminar.

Figura 5-1: Diagrama a) - Método de Deposição a Aplicar.

Tendo em conta a complexidade do tema e com o intuito de facilitar a interpretação do leitor, foi considerado inadequado a apresentação do método num único diagrama, pelo que serão apresentadas várias árvores-de-decisão. Assim, o estudo da viabilidade dos métodos de comercialização, deposição no solo e aterro sanitário, são apresentados nas secções 5.4, 5.5 e 5.6, respetivamente. A temática da caracterização do contexto de aplicação é explorada no capítulo 5.3

Devido ao cariz académico do presente documento e ao facto de ser dirigido para fases iniciais do planeamento, não foram tidos em conta fatores relevantes para a seleção de métodos de tratamento e deposição de lamas, como por exemplo: envolvimento dos *stakeholders*, estratégias de comercialização de produto, seleção do local de implementação, atração de financiamentos externos, entre outros. Estas simplificações são descritas em mais detalhe na secção 1.3.

5.3 Caracterização do Contexto de Aplicação

O planeamento de sistemas de tratamento e deposição final de lamas deve seguir uma metodologia lógica. Deve ser evitado o desenvolvimento e a implementação de soluções sem a identificação prévia dos problemas existentes, das suas causas e dos fatores relevantes no contexto físico, social e económico. O contexto de aplicação é determinante na escolha das potenciais soluções de tratamento e deposição final das lamas. Na estruturação do plano, deve existir um entendimento deste contexto

local, de forma que seja distinguido quais as soluções que possam ser adequadas das que possam ser problemáticas.

Idealmente, apenas deve ser recolhida informação relevante no âmbito do(s) problema(s) identificado(s) e das suas causas. É, no entanto, importante que o planeamento seja um processo dinâmico, em que a informação relevante vai ficando mais evidente à medida que a solução é estruturada [46]. No âmbito da área de trabalho da presente dissertação, os principais pontos que, geralmente, são necessários apurar são:

Quantidade e Qualidade de Lamas: Caracterização do estado do saneamento no local de implementação, em que deve ser recolhida informação realista e representativa das características e quantidade de lamas a serem processadas. Adicionalmente, para além da situação “atual”, deve ser estudada a situação no horizonte de projeto, através de fenómenos tais como crescimento/ decréscimo da população, mudanças significativas no tipo de interface a servir a população, variação prevista no número de compartimentos legalmente esvaziados, entre outros.

Clima: Como mencionado no capítulo 3, o clima da região pode ser um fator determinante na escolha dos métodos a aplicar (por exemplo nos leitos de secagem, ou digestão anaeróbica). Assim, deve ser feita uma caracterização climática na região de aplicação.

Infraestruturas Existentes: Deve ser analisado a existência de infraestruturas que possam ser relevantes no contexto do tratamento de lamas. Caso existam é relevante apurar se estão a operar à sua capacidade máxima, se existe possibilidade de expansão e quais as características requeridas para as lamas serem compatíveis.

Área de Implementação: A área de implementação pode ser um fator determinante na escolha dos métodos a aplicar na construção de uma ETLF (por exemplo leitos de secagem versus desidratação mecânica) e como tal, deve ser estudada.

Competências Técnicas da Equipa Técnica: É necessário garantir que as competências da equipa de operação e manutenção da ETLF não constituam um fator limitante na implementação de certos processos de tratamento e/ou deposição.

Fluxos/Disponibilidade de Outras Matérias Relevantes: Como mencionado no capítulo 3, a inclusão de outros resíduos e/ou matérias na gestão de lamas pode ser relevante/determinante para o seu sucesso. Neste contexto, é relevante averiguar a sua disponibilidade e as suas características. Exemplos são resíduos municipais sólidos, resíduos agrícolas, pó de carvão, serradura, entre outros.

Planos Municipais Existentes: A existência de planos municipais no âmbito das temáticas abordadas ao longo da dissertação pode ser relevante na possível atração de financiamento e/ou subsídios aos atores envolvidos.

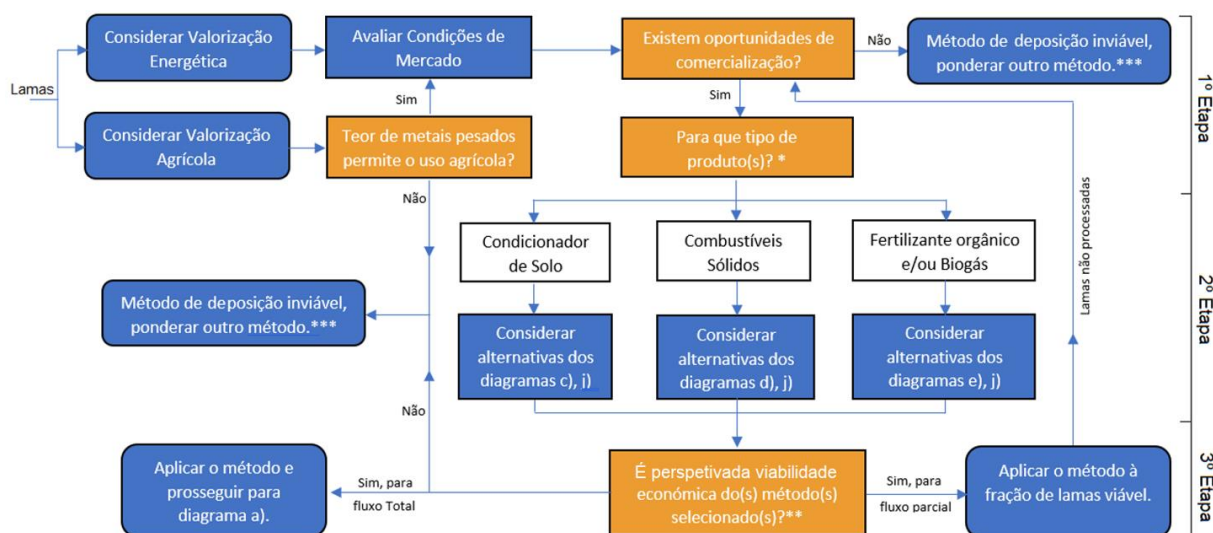
Panorama Legal: Legislação aplicada aos vários métodos de deposição final das lamas (componente sólida), qualidade do efluente resultante das escorrências (componente líquida) antes da descarga no meio recetor e outros possíveis fluxos de resíduos ou matérias que possam ser relevantes para a gestão de lamas.

Existem outros fatores que são determinantes para o planeamento de uma intervenção na área do saneamento em países de baixo/médio PIB, no entanto tendo em conta os objetivos da presente dissertação foi considerado pertinente a exclusão dos mesmos. Exemplos são estudos mais pormenorizados do local de implementação da ETLF e/ou local de deposição (acessibilidade, localização, entre outros), informação mais detalhada sobre fatores relevantes nos custos da operação (custo da mão-de-obra, eletricidade, metro quadrado para implementação), entre outros.

5.4 Estudo da Viabilidade e Aplicação dos Métodos de Comercialização

5.4.1 Diagrama Geral de Decisão

Diagrama a ser usado no estudo da viabilidade dos métodos de comercialização de produtos derivados de lamas, devendo ser percorrido em paralelo para a valorização energética e para a valorização agrícola. A explicação mais pormenorizada das etapas é descrita no decorrer da secção.



* Definir qualidade de produto final pretendida.

** Selecionar o método com maior custo-benefício, caso mais do que um se perspetive viável.

*** Prosseguir para o diagrama a), caso já não possam existir mais oportunidades de comercialização.

Figura 5-2: Diagrama b) - Estudo da Viabilidade dos Métodos de Comercialização.

O estudo da viabilidade deve seguir as seguintes etapas:

1ª Etapa – Avaliação das Condições Iniciais

Garantir que são verificadas as condições iniciais para a aplicação destes métodos, isto é, verificadas as condições de mercado, descritas na secção 4.5, e garantir que não existem contaminações de metais pesados que proíbam a aplicação agrícola, sendo que:

- Caso as condições não sejam verificadas tanto para a valorização agrícola, como para a energética, os métodos de comercialização devem ser considerados inviáveis e deve ser prosseguida a análise do diagrama a).
- Caso as condições sejam verificadas, deve ser definida a qualidade de produto final pretendida, tendo por base as condições de mercado averiguadas e o contexto legal do local de aplicação ou regulações tomadas como referência no caso da inexistência das mesmas.

2ª Etapa – Consideração das Alternativas

Nesta etapa é pretendido identificar quais as alternativas que devem ser consideradas, atendendo aos seguintes pontos:

- **Níveis de Tratamento a Aplicar:** Geralmente, é necessário/vantajoso submeter as lamas a processos de tratamento antes da sua comercialização (por exemplo processos de redução de teor de humidade, estabilização, entre outros). Neste contexto, é pretendida identificação dos métodos de tratamento que devem ser considerados, para atingir a qualidade de produto final pretendida. Existem alguns métodos que devem ser imediatamente excluídos, caso não sejam

verificadas condições para a sua aplicação, como por exemplo na co-compostagem, caso não sejam identificados fluxos relevantes de outros resíduos ou matérias para a mistura com as lamas.

- **Construção de ETLF e/ou tratamento de Infraestruturas existentes:** Face aos níveis de tratamento a aplicar, deve ser averiguada a necessidade de construção de uma ETLF e/ou do tratamento em infraestruturas existentes.

O estudo destes dois pontos deve ser realizado em simultâneo, com o intuito de identificar quais as alternativas que devem ser consideradas para a aplicação do método de deposição em estudo.

Um bom exemplo da aplicação desta etapa é: no âmbito da comercialização de lamas como condicionador de solo e atendendo à qualidade de produto final pretendida e contexto de aplicação, devem ser considerados: 1) Co-Compostagem das lamas com resíduos municipais sólidos numa infraestrutura existente, sendo necessária a construção de uma ETLF para pré-tratar e reduzir o teor de humidade das lamas em Leitões de Secagem; 2) tratamento em Leitões de Secagem Plantados e posterior higienização, em Armazenamento Prolongado, sendo necessária a construção de uma ETLF; ou 3) redução do teor de humidade em Leitões de Secagem e Estabilização Alcalina, sendo necessária a construção de uma ETLF.

Como descrito no capítulo 4, os produtos finais identificados para a comercialização de produtos derivados foram: condicionadores de solo e fertilizante orgânico, para a valorização agrícola, e combustíveis sólidos e biogás (que pode ser convertido em eletricidade), para a valorização energética. As categorias “fertilizante orgânico” e “biogás”, foram agrupadas uma vez que têm origem no mesmo processo, Digestão Anaeróbica.

Devido a questões de espaço e para facilitar a leitura da árvore-de-decisão, os métodos de tratamento a considerar para cada tipo de produto são apresentados em diagramas em separado, na secção 5.4.2.

Pelas mesmas razões do ponto anterior e devido ao facto de ser comum aos vários métodos de Comercialização, Deposição no Solo e Deposição em Aterro Sanitário, o diagrama alusivo à avaliação da necessidade construção de ETLF e/ou tratamento em infraestruturas existentes, é apresentado num diagrama em separado, diagrama f), apresentado na secção 5.7.1.

3ª Etapa – Viabilidade Económica e Comparação das Alternativas

Esta etapa tem por objetivo a comparação do custo-benefício das alternativas identificadas na etapa 2, idealmente tendo em conta as dimensões ambiental e socio-económica. Deve também ser analisada a viabilidade económica da operação, tendo em conta os seus custos associados (esquema de tratamento previsto, custos de deposição, custos de transporte, entre outros) e as possíveis entradas de capital (receitas de comercialização, financiamentos internos e externos, entre outros). É importante nesta etapa, garantir que o diagrama foi percorrido em paralelo para a valorização energética e agrícola, para garantir que todas as alternativas são consideradas. Para as alternativas que preveem a construção de uma ETLF, neste ponto, devem ser consideradas as questões abordadas na temática “centralização/descentralização”, descritas na secção 4.5.1.

O processo de comparação das alternativas é muito complexo, devido ao elevado número de variáveis envolvidas na tomada de decisão. Assim, por simplificação académica e atendendo à falta de informação disponível na literatura sobre esta matéria, a sua comparação direta foi excluída da árvore-de-decisão. Este processo deve ser realizado pelo planeador, caso-a-caso, com uma visão de gestão de resíduos a longo prazo e tendo em conta o contexto de aplicação. Fatores relevantes para este processo, a ter em conta em fases iniciais do planeamento, tais como, aplicabilidade dos métodos, qualidade do produto final e possíveis impactes positivos adicionais, encontram-se descritos nas respetivas secções dos capítulos 3 e 4.

É importante perceber que no estudo da viabilidade económica e financeira das alternativas, o principal objetivo é garantir a cobertura dos custos operacionais. O investimento inicial, requerido por estas intervenções, é, geralmente, encarado como “fundo perdido”, sendo suportado pelo município ou o governo central. Neste processo, ainda que complexo, é também importante contabilizar as externalidades, resultantes dos impactes adicionais nas dimensões ambiental e socio-económica.

Após o estudo, caso nenhuma das alternativas se perspetivar viável, deve ser considerado outro método de deposição. Porém, caso um ou mais das alternativas se antever viável, o método de deposição em análise deve ser aplicado, através da alternativa que exiba a relação custo-benefício mais favorável.

Na eventualidade da capacidade de processamento do método a ser aplicado não ser suficiente para absorver o fluxo de lamas total da intervenção, o método deve ser aplicado à “fração viável”, sendo posteriormente reavaliada a viabilidade dos métodos para a fração de lamas não-processada. Um bom exemplo desta premissa é o estudo da viabilidade de métodos de comercialização numa cidade que tenha um fluxo de lamas a ser processado de $50 \text{ m}^3/\text{dia}$. Foi apurado que para certos esquemas de tratamento, baseados em co-compostagem, leitos plantados, e briquetes não-carbonizados, todos associados à construção de uma ou mais ETLF, existe viabilidade para o processamento de $50 \text{ m}^3/\text{dia}$, $10 \text{ m}^3/\text{dia}$ e $10 \text{ m}^3/\text{dia}$, respetivamente. Assumindo que o método de briquetes não-carbonizados exibe a relação custo-benefício mais favorável, deve ser aplicado. Para o restante fluxo de $40 \text{ m}^3/\text{dia}$ não-processado deve ser reavaliado qual o método com maior custo-benefício e aplicá-lo. Este processo deve ser realizado de forma análoga, até que todas as oportunidades de comercialização sejam satisfeitas.

Este raciocínio não inclui o possível cenário de “a aplicação de um método representar a inviabilização de outro”, devido a relações complexas entre si, por exemplo relacionadas com a concorrência por um possível local privilegiado de implementação. Neste contexto, idealmente, devem ser avaliadas as possíveis permutações de aplicação dos métodos e aplicada a combinação que exibe a relação custo-benefício mais favorável. Na presente dissertação, foi tomado o outro raciocínio por motivos de simplificação académica.

5.4.2 Diagramas dos Processos a Considerar

Nesta secção, são apresentados os diagramas dos processos de tratamento a considerar que permitem a “transformação” das lamas nos produtos que satisfazem as oportunidades de comercialização identificadas.

Por simplificação académica, estes diagramas devem ser percorridos em paralelo pois apenas têm o intuito de indicar os processos que devem ser considerados e não a construção de esquemas de tratamento. Esta simplificação foi considerada pertinente, devido ao elevado número de permutações possíveis e à complexidade envolvida na comparação direta dos métodos, aliada à falta de informação presente na literatura nesta temática.

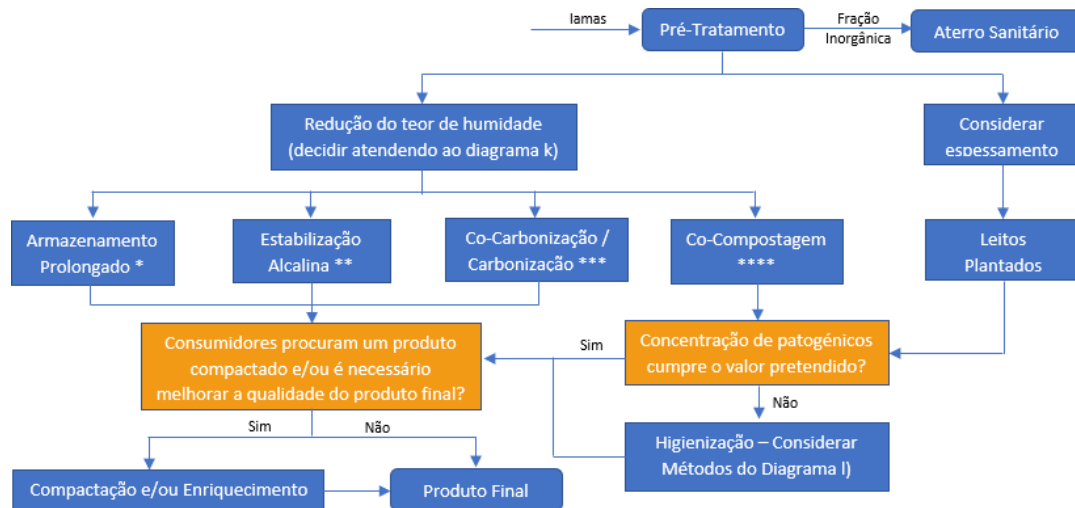
A decisão deve ser tomada com base na análise do contexto de aplicação caso-a-caso, tendo sido, no entanto, identificada informação relevante (para fases iniciais do planeamento) em prol da aplicabilidade dos métodos de tratamento e da qualidade do produto final. Pontos considerados relevantes são apresentados nesta secção, pelo que a restante informação recolhida encontra-se descrita em detalhe nas respetivas secções dos capítulos 3 e 4.

Adicionalmente, os métodos referentes à redução do teor de humidade e higienização das lamas, são apresentados em separado, nas secções 5.7.2 e 5.7.3, respetivamente, visto serem comuns a vários diagramas.

5.4.2.1 Diagrama c) – Condicionador de Solo

O diagrama c) exhibe os possíveis métodos de tratamento identificados quando é pretendida a comercialização de produtos derivados de lamas como condicionadores de solo, no setor agrícola.

O tratamento em leitos plantados foi separado dos restantes métodos de redução de teor de humidade, devido a estar associado a fenómenos de estabilização. Esta decisão é justificada em mais detalhe na secção 5.7.2.



* Devido à menor investigação sobre o método, é recomendado que exista uma reserva de Cal na ETLF, caso não sejam garantidos os níveis de estabilização/ patogénicos pretendidos.

** Deve ser garantido que o pH dos solos permite a aplicação de lamas com cal.

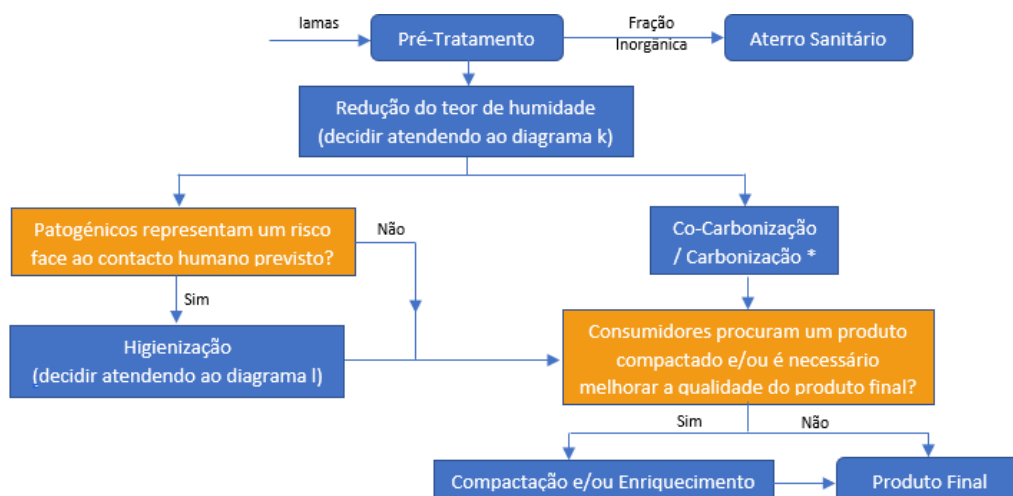
*** Produto também pode ser comercializado no setor energético.

**** Deve ser garantida a acessibilidade a outras matérias (idealmente resíduos) para realizar a Co-Compostagem.

Figura 5-3: Diagrama c) - Métodos de Tratamento a considerar na comercialização de condicionador de solo.

5.4.2.2 Diagrama d) – Combustíveis sólidos

O diagrama d) exhibe os possíveis métodos de tratamento identificados quando é pretendida a comercialização de produtos derivados de lamas como combustíveis sólidos, sendo estes a produção de combustíveis não-carbonizados (lamas desidratadas) versus combustíveis carbonizados.

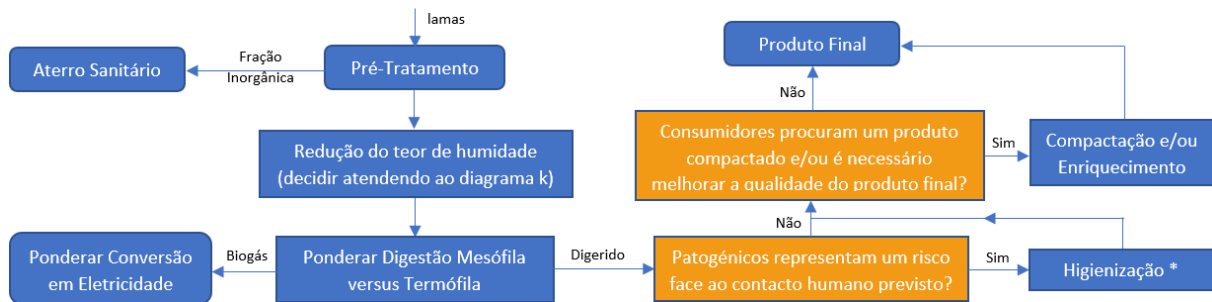


* Produto também pode ser comercializado no setor agrícola.

Figura 5-4: Diagrama d) - Métodos de tratamento a considerar na comercialização de lamas como combustíveis sólidos.

5.4.2.3 Diagrama e) – Fertilizante Orgânico/Biogás

O diagrama e) exhibe os possíveis métodos de tratamento identificados quando é pretendida a comercialização de produtos derivados de lamas como fertilizantes e/ou biogás/eletricidade.



* Considerar métodos do diagrama l).

Figura 5-5: Diagrama e) - Métodos de Tratamento a considerar na comercialização de biogás e/ou fertilizante orgânico.

5.5 Estudo da Viabilidade e Aplicação de Deposição no Solo

5.5.1 Diagrama Geral de Decisão

O estudo da viabilidade dos métodos de Deposição no Solo segue etapas análogas ao dos métodos de comercialização, descritos em detalhe na secção 5.4.

1º Etapa – Avaliação das Condições Iniciais

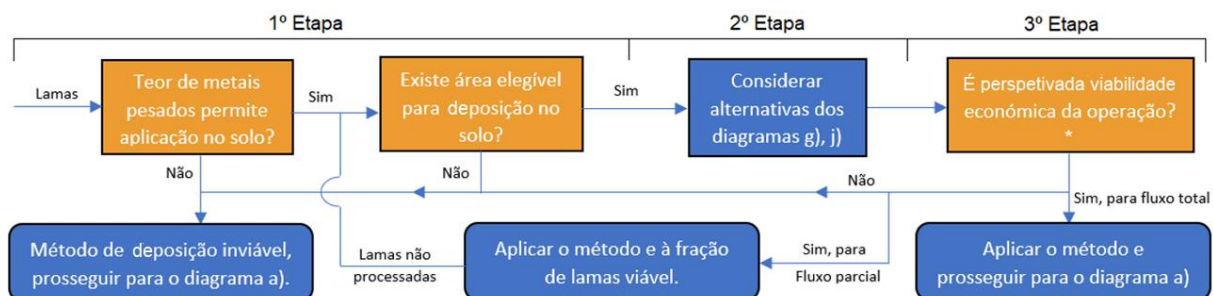
Inicialmente, deve ser garantido que o teor de metais pesados das lamas não limita a deposição no solo. Posteriormente deve ser avaliada a existência de área elegível de deposição (ver secção 4.5.3 e Anexo XII) tendo em conta o contexto legal/ regulações tomadas como referência.

2º Etapa – Consideração das Alternativas

Os possíveis métodos de tratamento a aplicar encontram-se descritos no diagrama f), na secção 5.5.2, devendo ser analisado em simultâneo com o diagrama j), onde é avaliada a necessidade de construção de uma ETLF e/ou tratamento em infraestruturas existentes, descrito na secção 5.7.1.

3º Etapa – Viabilidade Económica e Comparação das Alternativas

Os métodos considerados devem ser comparados relativamente ao seu custo-benefício e deve ser averiguada a viabilidade económica da operação. Caso seja perspectivada viabilidade, o método deve ser aplicado à fração viável.



* Selecionar o método com maior custo-benefício, caso mais do que um se revele viável.

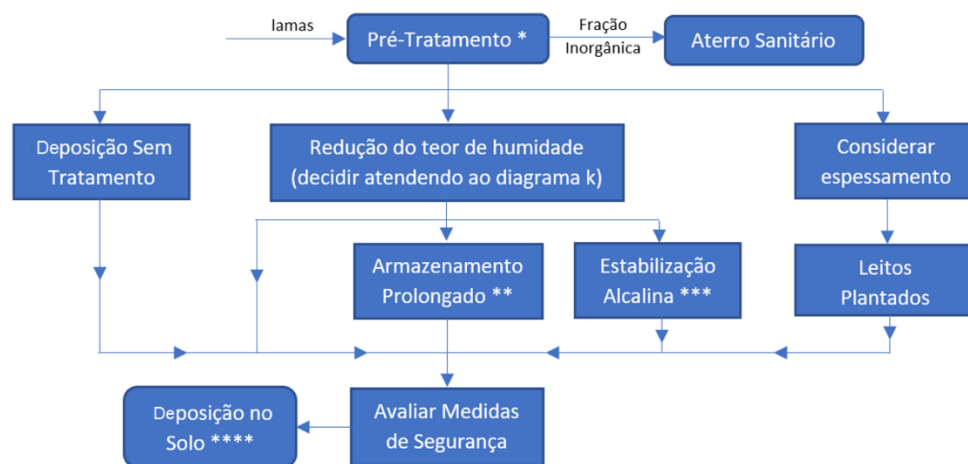
Figura 5-6: Diagrama f) - Estudo da Viabilidade dos Métodos de Deposição no Solo.

5.5.2 Métodos de Tratamentos a Considerar

Para além dos tratamentos a considerar, devem ser definidas as medidas de segurança de deposição, atendendo às características das lamas e o contexto legal/ regulações tomadas como referência. Exemplos são: vedação da área de aplicação, deposição das lamas usando o método de “Valas de Entrincheiramento”, entre outras.

Como mencionado na secção 4.5.3, os leitos plantados, estabilização alcalina e armazenamento prolongado eliminam potencialmente a necessidade de aplicação de lamas sobre o método “Valas de Entrincheiramento”, devendo apenas ser aplicados quando o aumento de custos de tratamento é justificado pela redução dos custos de deposição.

Adicionalmente, o diagrama alusivo aos métodos de redução de teor de humidade, é apresentado na secção 5.7.2. Como mencionado, o tratamento em leitos plantados foi apresentado em separado.



* Caso as lamas sejam dispostas sem tratamento, esforços devem ser feitos na recolha das lamas dos compartimentos e/ou na deposição das lamas para a remoção de sólidos grosseiros.

** Devido à menor investigação sobre o método, é recomendado que exista uma reserva de Cal na ETLF, caso não sejam garantidos os níveis de estabilização/ patogénicos pretendidos.

*** Deve ser garantido que o pH dos solos permite a aplicação de lamas com cal.

**** Devem ser consideradas as taxas agronómicas, descritas na secção 4.3.3.2.

Figura 5-7: Diagrama g) - Métodos de tratamento a considerar na deposição de lamas no solo.

5.6 Estudo da Viabilidade e Aplicação da Deposição em Aterro Sanitário

5.6.1 Diagrama Geral de Decisão

O estudo da viabilidade dos métodos de Deposição em Aterro Sanitário segue etapas análogas aos métodos de comercialização, descritos em detalhe na secção 5.4.

1ª Etapa – Avaliação das Condições Iniciais

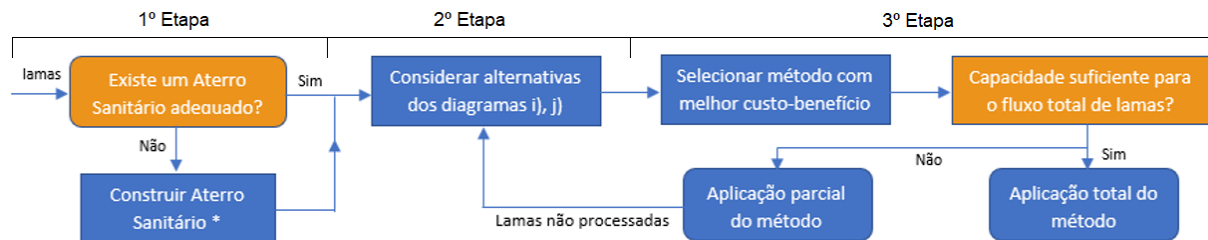
Deve ser garantida a existência de um aterro sanitário adequado para receber as lamas (consultar a secção 4.4). Caso não exista, deve ser planeada a construção do mesmo e durante o processo, esforços devem ser feitos para reter as lamas nos compartimentos (sem comprometer a saúde pública) e/ou na ETLF.

2ª Etapa – Consideração das Alternativas

Os possíveis métodos de tratamento a aplicar encontram-se descritos no diagrama h), apresentado na secção 5.6.2. Os mesmos devem ser analisados em simultâneo com o diagrama g), onde é avaliada a necessidade de construção de uma ETLF e/ou tratamento em infraestruturas existentes, descrito na secção 5.7.1.

3ª Etapa – Viabilidade Económica e Comparação das Alternativas

Os métodos considerados devem ser comparados relativamente ao seu custo-benefício e deve ser averiguada a viabilidade económica da operação. Caso seja perspectivada viabilidade, o método deve ser aplicado à fração viável.



* Durante a construção, esforços devem ser feitos para reter as lamas nos compartimentos (sem comprometer a saúde pública) e/ou na ETLF.

Figura 5-8: Diagrama h) - Diagrama Geral de decisão da deposição em Aterro Sanitário.

5.6.2 Métodos de Tratamento a Considerar

O diagrama i) exhibe os possíveis métodos de tratamento identificados para a deposição em aterro sanitário: deposição direta (sem tratamento); redução do teor de humidade; ou redução do teor de humidade e posterior incineração.

O diagrama alusivo aos métodos de redução de teor de humidade, é apresentado na secção 5.7.2



* Não é necessário caso as lamas sejam diretamente encaminhadas para o aterro sanitário.

Figura 5-9: Diagrama i) - Métodos de tratamento a considerar na deposição de lamas em Aterro Sanitário.

5.7 Diagramas Complementares

5.7.1 Avaliação da Necessidade da Construção de Novas Infraestruturas

O diagrama apresentado na presente secção deve ser considerado na 2ª Etapa – “Consideração das Alternativas”, do estudo da viabilidade dos métodos de deposição, com o intuito de estabelecer a necessidade de construção de uma ETLF e/ou tratamento em infraestruturas adequadas. Pelo termo

“adequadas”, entende-se infraestruturas que: 1) consigam processar lamas, tendo em conta as suas características; 2) não estejam a operar na sua capacidade máxima, ou, se estiverem, a sua expansão é benéfica do ponto de vista económico; 3) tenham uma localização adequada, tendo em conta possíveis custos adicionais de transporte versus o benefício económico da sua utilização.

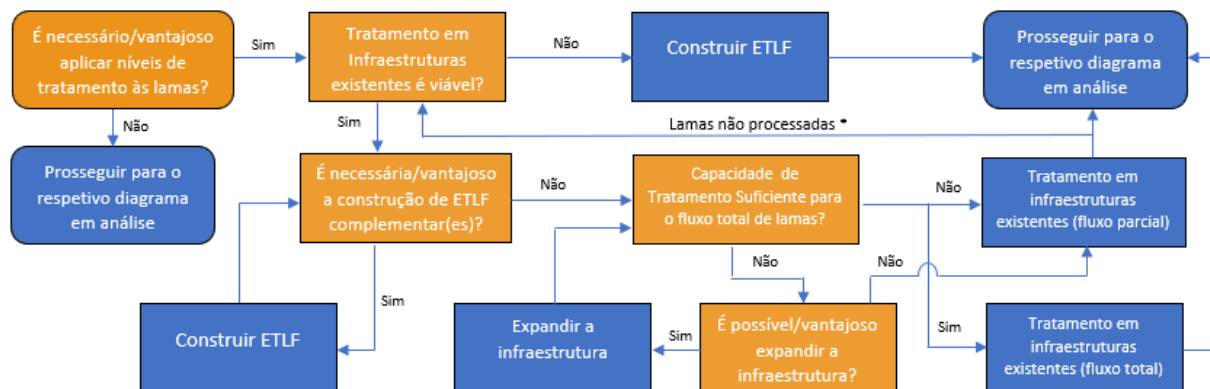
Como mencionado na secção 3.11, as ETAR foram identificadas como infraestruturas possivelmente relevantes no co-tratamento das LF, uma vez que estas podem ser incluídas na sua fase de tratamento sólida, por exemplo em processos de redução de teor de humidade ou até mesmo outros níveis de tratamento, e/ou na fase de tratamento líquida.

Adicionalmente, foram identificadas as seguintes infraestruturas potencialmente relevantes:

- Estações de Co-Compostagem, reatores de biogás (co-digestão), centrais de carbonização (co-pirólise), quando é planeada a comercialização de produtos derivados de lamas.
- Centrais de incineração, quando é planeada a deposição em aterro sanitário.

Caso existam infraestruturas adequadas, pode ser necessário a construção de uma ETLF complementar, para o “pré-tratamento” das lamas (por exemplo redução do teor de humidade para Co-Compostagem numa infraestrutura existente), “pós-tratamento” (por exemplo Co-Compostagem após redução do teor de humidade numa ETAR existente).

Caso a capacidade dos sistemas de tratamento nestas infraestruturas não for suficiente para o fluxo total de lamas, a fração não processada deve ser associada a uma alternativa diferente. Esta distinção é relevante para a consideração das alternativas, visto a viabilidade de um método poder estar fortemente dependente do tratamento em infraestruturas existentes. Um bom exemplo é a incineração.



* Esta fração deve estar associada a uma alternativa diferente da fração que foi tratada em infraestruturas existentes.

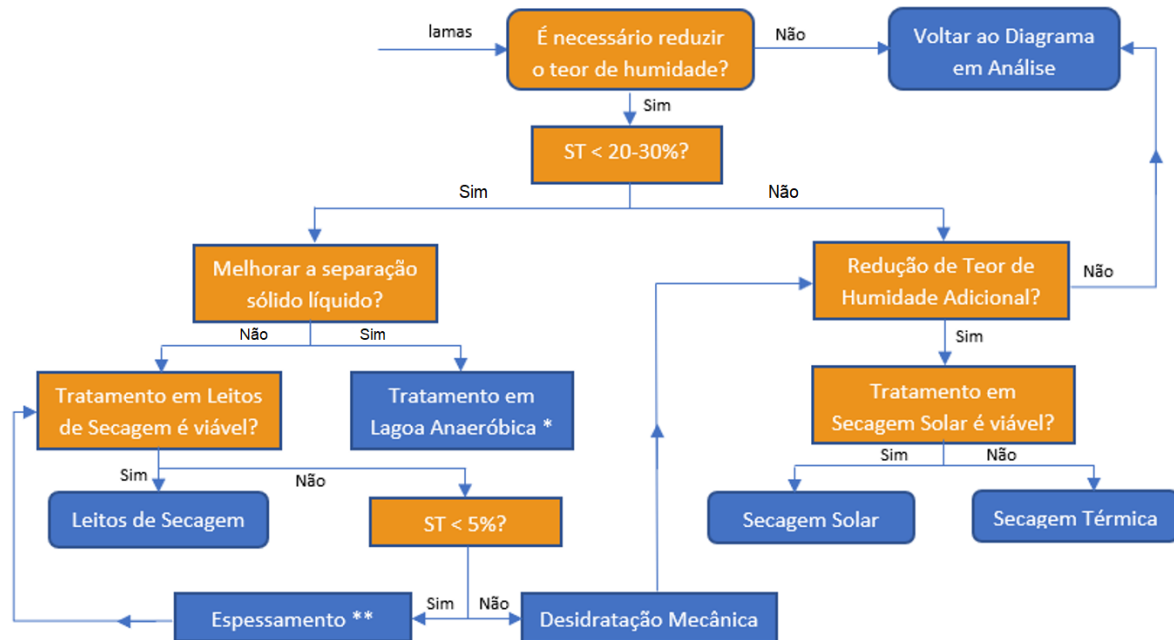
Figura 5-10: Diagrama j) - Avaliação da necessidade de construção de uma ETLF e/ou tratamento em infraestruturas existentes.

De uma forma simplista, o intuito deste ponto é avaliar qual o custo capital que esta associado a cada alternativa a ser considerada.

5.7.2 Seleção de Métodos de Redução do Teor de Humidade

Nesta secção é apresentado o diagrama da tomada de decisão na seleção dos processos de redução do teor de humidade. Foi considerado pertinente a apresentação deste diagrama numa secção em separado, para evitar que o mesmo seja repetido, uma vez que deve ser considerado em vários métodos de tratamento.

Atendendo à informação existente na literatura e à maior facilidade de comparação de métodos concorrentes, este diagrama tem como intuito indicar que processos devem ser aplicados, para reduzir o teor de humidade das lamas até ao valor pretendido. Neste processo foi dada prioridade aos métodos naturais, devido à maior facilidade de implementação e custos de operação mais reduzidos. Informações mais pormenorizadas dos métodos encontram-se descritas na secção 3.4.



* Tratamento não é necessário caso seja possível a mistura das lamas frescas com lamas digeridas.

** Caso seja aplicada desidratação mecânica deve ser considerado condicionamento.

Figura 5-11: Diagrama k) – Seleção de processos de redução de teor de humidade.

Apesar de na secção 3.4 dos processos de redução do teor de humidade serem mencionados os leitos de secagem plantados não foram contemplados neste diagrama uma vez que, devido aos processos de estabilização, ao contrário dos leitos de secagem: estão associados a uma redução do poder calorífico das lamas e por isso, não devem ser considerados na valorização energética; não requerem um aumento da capacidade de separação sólido-líquido de lamas frescas. Neste contexto, os leitos de secagem plantados foram contemplados em separado, sendo considerado um método de redução de teor de humidade + estabilização de lamas.

Relativamente ao condicionamento de lamas, devido à falta de informação na literatura, não é considerado no âmbito dos métodos naturais, pelo que apenas foi considerado nos métodos de desidratação mecânica.

Na construção do diagrama, foi considerado relevante distinguir dois valores críticos de teor de ST:

- 20 - 30% ST: Lamas com valores superiores não têm concentrações significativas de água-livre e intersticial, pelo que apenas devem ser considerados métodos designados para a remoção de água de superfície e intracelular.
- 5% ST: Lamas com valores superiores não têm concentrações significativas de água-livre, pelo que não devem ser considerados processos que sejam designados para a sua remoção (espessamento).

5.7.3 Estudo da Aplicação de Métodos de Higienização

Nesta secção é apresentado o diagrama dos processos de higienização a serem considerados. À semelhança do diagrama anterior, foi considerado pertinente a apresentação deste diagrama numa secção em separado, para evitar que o mesmo seja repetido, uma vez que deve ser considerado em vários métodos de tratamento.

Apesar do método “estabilização alcalina” ser tradicionalmente encarado como um método de estabilização, devido à sua fácil implementação e inúmeros estudos realizados à dosagem necessária para eliminar a carga patogénica, deve também ser encarado como um método de higienização.

Atendendo à informação na literatura, os métodos indicados no diagrama não foram diretamente comparados, devendo o planeador tomar a decisão com base na análise do contexto de aplicação, caso-a-caso, e tendo em conta os seguintes fatores.

A aplicação da estabilização alcalina é pouco provável revelar-se vantajosa na valorização energética visto reduzir o poder calorífico das lamas. Adicionalmente, na valorização agrícola, existem poucos estudos relacionados com a qualidade do produto final na utilização deste método com o intuito de higienizar e não estabilizar as lamas (por exemplo aplicar cal a lamas compostadas). Neste contexto, recomenda-se que seja considerado em último lugar.

Existem estudos bem definidos sobre a pasteurização das lamas, sendo este um método eficaz para ambos os métodos de valorização. No entanto, está associado a custos operacionais superiores atendendo à necessidade de fonte de energia externa.

O armazenamento prolongado é teoricamente o método associado a custos operacionais inferiores (por basear-se em mecanismos naturais), no entanto a informação existente na literatura não permite que exista uma comparação direta com os outros métodos considerados. Isto deve-se ao facto de ser pouco claro quais condições necessárias de armazenamento (por exemplo, temperatura ambiente, e tempo de tratamento) para atingir uma certa redução de patogénicos, apesar de existirem indicações da OMS expostas em [77]. Assim, é recomendado que na sua aplicação exista uma reserva de Cal na eventualidade do tratamento não cumprir os requisitos pretendidos. Por outro lado, os altos tempos de retenção (na ordem dos anos) sugerem níveis de estabilização das lamas e consequente diminuição do poder calorífico, sendo que estes fenómenos requerem mais investigação.

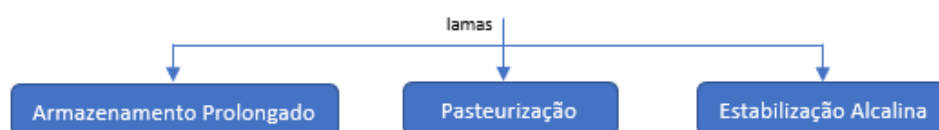


Figura 5-12: Diagrama I) - Processos de higienização a serem considerados.

6. Aplicação do Método a Casos Práticos

6.1 Objetivos e Metodologia

O presente capítulo tem por objetivo a aplicação do método apresentado no capítulo 5, a dois casos práticos – Cidade de Tete, Moçambique e Cidade do Tarrafal, Ilha de Santiago, Cabo Verde – com o intuito de sugerir um ou mais esquemas de tratamento e deposição final a aplicar às lamas geradas.

É importante realçar que os casos de estudo abordados, apenas exibem um valor exemplificativo da aplicação do método, pelo que não foram explorados com o devido rigor exigido pelas intervenções na área do saneamento.

Neste contexto, e devido ao cariz académico do presente documento, irão ser assumidas as seguintes premissas com o intuito de simplificar o problema:

- Não existem contaminações significativas de metais pesados nas lamas.
- As capitações de 270 e 280 litros/hab/ano, associadas à taxa de acumulação de lamas, foram adotadas para fossas sépticas e latrinas, respetivamente [82]. Para latrinas com separação de urina (LSU) “a seco”, foi considerado o valor de 139 litros/hab/ano, baseado em [85], devendo estar situadas à superfície ou elevadas, para facilitar a recolha das lamas.
- As fossas sépticas são descarregadas de 3 em 3 anos, originando lamas digeridas. Por outro lado, ambas as latrinas são descarregadas frequentemente, originando lamas frescas.
- O teor de ST das lamas é de 1%, 3% e 40% para as fossas sépticas, latrinas e LSU, respetivamente.
- 50% das latrinas não são descarregadas, sendo encerradas e substituídas, atendendo à disponibilidade de espaço.
- A distribuição temporal da recolha de lamas, origina volumes diários a ser processados aproximadamente constantes.
- O fator “competências da equipa técnica” não foi considerado como sendo um fator limitante.

Adicionalmente, com o mesmo propósito, irão ser assumidas outras premissas ao longo do capítulo.

6.2 Caso 1 – Cidade de Tete, Moçambique

6.2.1 Caracterização do contexto de Aplicação

A cidade de Tete é localizada em Moçambique, na província de Tete, situada nas margens do rio Zambeze, perfazendo uma área de aproximadamente 287 km² [75].

Evolução Populacional e Características e Quantidade de Lamas Geradas

A tabela 6-1 exibe um estudo populacional baseado nas estimativas expostas em [85], para os anos de 2021, 2036 e 2051.

Tabela 6-1: Evolução populacional da cidade de Tete, para o horizonte de projeto.

População	2021	2036	2051
Hab	253 322	331 072	391 852

Relativamente à qualidade de saneamento são relatadas várias deficiências na gestão de LF e de lamas de ETAR, entre as quais: a grande maioria da população residente (cerca de 80%) ter práticas de defecação “a céu aberto” ou o armazenamento de excreta em recipientes improvisados, como sacos de plástico, e posterior queima e/ou transporte conjunto por camiões para uma lixeira; cerca de 8% da população é servida por interfaces de Saneamento “On Site” no entanto não é garantida a

deposição segura das lamas; e cerca 9% da população é servida por um sistema de drenagem que culmina na descarga direta, sem tratamento, dos efluentes residuais domésticos para o meio recetor.

Apesar dos estágios de armazenamento e transporte de lamas revelarem deficiências aparentes, a intervenção nos mesmos não foi considerada, devido ao facto de estar excluída do âmbito dos objetivos da presente dissertação. Assim, por motivos de simplificação, no planeamento do sistema de tratamento e deposição das lamas, foram assumidos os seguintes pontos:

- As lamas encaminhadas para o sistema de drenagem, cobrindo 10% da população, não são consideradas, na presente intervenção.
- Frações de 15%, 15% e 60% da população é servida por fossas sépticas, latrinas, LSU, respetivamente.

A tabela 6-2 resume os fluxos de lamas a serem processados, tendo em conta os fatores assumidos.

Tabela 6-2: Projeção para os fluxos de lamas a ser processados, no horizonte de projeto.

Interface	Capitação (l/hab/ano)	População servida (%)	2036 (m^3 /dia)	2051 (m^3 /dia)
Fossa Séptica	280	15	38,1	45,1
Latrina	270	15	18,4	21,7
LSU	139	60	60,5	71,6
Total	-	90	117	138,4

Outros Aspetos Relevantes

- A cidade de Tete é caracterizada por um clima semiárido com uma temperatura média superior a 25 °C e precipitação média de 500 mm anual [75], sugerindo a aplicação de métodos de desidratação naturais e digestão anaeróbica.
- Moçambique não tem legislação aplicada à Gestão de LF, pelo que foram tomadas as recomendações da OMS e legislação da África do Sul como referência.
- Foi identificada como infraestrutura existente potencialmente relevante, a central elétrica, em Moatize, com uma capacidade de 1200 MW através da queima de carvão [83].
- A indústria extrativa de carvão (em Moatize) assume grande relevância no distrito da cidade de Tete [75], pelo que, o pó de carvão foi identificado como sendo um resíduo relevante na possível inclusão na gestão de LF.
- Segundo [75], a cidade de Tete tem uma taxa de recolha de resíduos municipais sólidos a rondar 65%, tendo sido assumindo uma fração orgânica na ordem dos 60%, como sugerido pelo autor de [12], em países de baixo/médio PIB. Desta forma, os fluxos destes resíduos, com vista ao co-tratamento com as LF, não foram considerados um fator limitante.

6.2.2 Estudo da Viabilidade dos Métodos de Comercialização

Após uma análise do documento – Avaliação Ambiental Estratégica, Plano Multisectorial Plano Especial de Ordenamento Territorial do Vale do Zambeze e Modelo Digital de Suporte a Decisões, redigido por Ministério da Economia e Finanças, Agencia de Desenvolvimento do Vale do Zambeze e Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural [75], foram identificados os seguintes pontos relevantes: É reconhecido que as falhas na Gestão de Lamas e Resíduos Municipais Sólidos causam impactes negativos nos ecossistemas na saúde pública; devem ser estimuladas novas abordagens para o saneamento em zonas urbanas e rurais; deve ser estimulado o uso de composto orgânico; redução do consumo de biomassa lenhosa e de combustíveis fósseis; e estimular a exploração de novas tecnologias associadas à valorização energética derivadas de biomassa renovável devem ser

exploradas. Estes pontos identificados, sugerem a possível atração de financiamentos e subsídios aos atores envolvidos em práticas de valorização energética e agrícola.

Por outro lado, foram identificados os seguintes pontos:

- Segundo [75], a agricultura representa um papel de relevo no desenvolvimento económico da região, sendo pressuposto que existe procura para aditivos do solo derivados de LF.
- 95% dos agregados familiares de Moçambique dependem de biomassa como fonte de combustível [83], sendo pressuposto que existe procura de combustíveis sólidos derivados de LF (com qualidade comparável aos tipos de biomassa usados frequentemente).
- A região da cidade de Tete representa um papel relevante na produção de eletricidade a nível nacional, através da queima de carvão [75, 83], pelo que foi assumido compatibilidade com LF carbonizadas.

Recomendações para a comercialização de produtos

Tendo em conta o contexto de aplicação e para efeitos de simplificação académica (tendo sido excluída a enumeração e comparação das alternativas) foram assumidos como “viáveis” os seguintes métodos de comercialização:

- Comercialização de briquetes não-carbonizados (higienizados) de lamas provenientes de LSU, exigindo a construção de uma ETLF, a operar com pré-tratamento, Pasteurização, Compactação com enriquecimento com pó de carvão e Secagem Solar até valores a rondar os 90% ST, com uma capacidade de suportar um fluxo de 20 m^3 lamas /dia.
- Comercialização industrial de briquetes carbonizados para fins de produção energética, a partir de lamas provenientes de LSU, exigindo a construção de uma ETLF, a operar com pré-tratamento, Leitos de Secagem Solar e Carbonização, com a capacidade de suportar um fluxo de lamas 40 m^3 lamas/dia.
- Comercialização de condicionador de solo, de LF (provenientes de fossas sépticas e latrinas, num rácio 2:1), sendo necessária a construção de uma ETLF a operar com pré-tratamento, Tanques de Espessamento, Leitos de Secagem e Co-Compostagem com resíduos municipais sólidos (fração orgânica), com uma capacidade de 20 m^3 lamas/dia.

Os métodos de comercialização têm uma capacidade de processar a totalidade do fluxo de lamas provenientes de LSU até 2036, e uma capacidade de processamento parcial, das lamas provenientes de fossas sépticas e latrinas, 20 m^3 /dia versus 56,5 m^3 /dia, em 2036. Para os restantes 36,5 m^3 /dia devem ser avaliadas as oportunidades de deposição no solo. Foi assumido que a falta de procura de produto é o fator limitante, devendo ser elaboradas estratégias para a estimular.

6.2.3 Estudo da Viabilidade de Métodos de Deposição no Solo

Foi assumido que não foram identificadas oportunidades de deposição no solo, em prol da inexistência de áreas elegíveis para o efeito. Uma das razões é o facto da zona da cidade de Tete ser suscetível a inundações [75].

6.2.4 Estudo da Viabilidade de Aplicação de Deposição em Aterro Sanitário

A zona da cidade de Tete não dispõe de um aterro sanitário apropriado para a deposição de resíduos, pelo que apenas foi identificada uma lixeira, a cerca de 7km da cidade [75].

Recomendações: Esforços devem ser feitos para reter as lamas com destino a aterro, nos compartimentos e na ETLF, sem comprometer a saúde pública, e deve ser rapidamente iniciada a construção de um aterro sanitário adequado. Quando o mesmo estiver operacional, as lamas devem ser desidratadas nas instalações da ETLF de Co-Compostagem, nos tanques de espessamento e leitos de secagem, e encaminhadas para o aterro sanitário.

6.3 Caso Prático 2 – Tarrafal, Cabo Verde

6.3.1 Caracterização do Contexto de Aplicação

A cidade do Tarrafal e o aglomerado de Chão Bom, são situados na costa noroeste na ilha de Santiago Cabo Verde.

Evolução Populacional e Características e Quantidade de Lamas Geradas

Baseado nas estimativas expostas em [86], a população do Tarrafal e Chão Bom em 2021 é de 6656 e 5166 habitantes, respetivamente, que com base numa tendência decrescente da população, foi assumido, de forma conservativa, que o número de habitantes se irá manter constante no horizonte de projeto.

A cidade do Tarrafal e povoação do Chão Bom são servidas por um sistema de Saneamento Convencional, com uma cobertura de 60% da população, que encaminha os efluentes residuais para uma ETAR com a seguinte configuração: gradagem, parshall (apenas para o efluente proveniente da cidade do Tarrafal), duas lagoas anaeróbias, duas lagoas facultativas, duas lagoas de maturação, microfiltração e desinfecção. A fase sólida conta com seis leitos de secagem, que se encontram, porém, fora de funcionamento devido ao facto de nunca ter sido realizado remoção de lamas das lagoas [86]. Baseado no estudo relatado pelo autor de [84], a acumulação de lamas nas lagoas foi considerada 350 l/hab/ano.

Adicionalmente, e por motivos de simplificação académica, foi considerado que a restante população é servida por interfaces de Saneamento “On Site”, com a seguinte cobertura: 10% fossas sépticas e 30% latrinas com descarga, em relação ao total da população.

A tabela 6-3 resume os fluxos de lamas a serem processados, tendo em conta os fatores assumidos.

Tabela 6-3: Projeção para os fluxos de lamas a ser processados, no horizonte de projeto.

Sistema	Capitação (l/hab/ano)	População servida (%)	Fluxo (m^3 /dia)
ETAR	350	60	6,80
Latrina	270	30	1,31
Fossa Séptica	280	10	0,91
Total	-	100	9,02

Outros Aspetos Relevantes

- Segundo [87], a ilha de Santiago é caracterizada por um clima semi-árido, com temperaturas médias superiores a 25°C e com a precipitação concentrada num curto espaço de tempo anual, sendo irregular ou nula.
- Cabo Verde não tem legislação aplicada à Gestão de LF e de ETAR, pelo que foram tomadas as recomendações da OMS e a legislação da África do Sul como referência.
- Para além da ETAR, já mencionada, não foram identificadas outras infraestruturas que possam ser relevantes no processamento das lamas.
- Foi assumido que existem fluxos significativos de resíduos agrícolas e resíduos municipais sólidos (fração orgânica, que segundo [12] representa cerca de 60%, em países de baixo/médio PIB).

6.3.2 Estudo da Viabilidade dos Métodos de Comercialização

Consta no plano de atividades e orçamento do Tarrafal a necessidade de intervenção na área de produção, armazenamento e distribuição de energia e no âmbito da recolha, tratamento e deposição dos resíduos sólidos gerados [89].

Por outro lado, foram identificados os seguintes pontos:

- Foi identificada uma elevada atividade agrícola, em volta da área da ETAR (Figura A-9 Anexo XIV), sendo assumido que existe procura de condicionadores de solo e fertilizantes orgânicos, também sustentada pela restante atividade agrícola do concelho.
- Segundo [88], Cabo Verde importa elevados volumes de gasóleo e fuelóleo para a produção de eletricidade (cerca de 26.7% e 7.1%, respetivamente, da oferta total de energia primária, em 2013). Por outro lado, o consumo doméstico, para a preparação de alimentos, é dominado por gás (sendo a maior parte importado) e lenha, que em 2010, representavam cerca de 70% e 25% do consumo total, respetivamente. Estes dados sugerem que existe procura de combustíveis sólidos e de biogás, para consumo direto ou para fins de produção de eletricidade.

Recomendações para comercialização de Produtos

Tendo em conta o contexto de aplicação e para efeitos de simplificação académica (tendo sido excluída a enumeração e comparação das alternativas), foram assumidos como “viáveis” os seguintes métodos de comercialização:

Para as lamas de ETAR, considerando que as instalações dispõem de duas lagoas anaeróbicas (associadas à retenção de lamas), foi assumido que a melhor solução envolve o uso alternado das mesmas, em ciclos de dois anos. No final de cada ciclo, a fase líquida da lagoa em operação deve ser encaminhada para a outra lagoa, e as lamas devem ser removidas das lagoas e encaminhadas para leitos de secagem. Este processo deve ser realizado no início da época seca, e pode demorar até 3 meses, deixando a fração de lamas não recolhida inicialmente a desidratar no fundo da lagoa, tendo em conta o clima propício da região. A linha de tratamento sólida deve ser reabilitada, devendo funcionar com o esquema: Leitos de Secagem, onde as lamas são desidratadas até valores a rondar os 20-30% e posteriormente encaminhadas para uma instalação impermeabilizada e coberta onde serão armazenadas no mínimo durante 1,5 anos. Tendo em conta o tempo de retenção na lagoa e nas instalações de armazenamento prolongado, nas condições de temperatura média local, o produto final perspectiva-se estável e higienizado, sendo posteriormente comercializado como condicionador de solo. A qualidade do produto final deve, no entanto, ser monitorizada, devendo as instalações conter reservas de cal, para a eventualidade dos requisitos de qualidade não serem cumpridos. Foi assumido que a procura da região tem capacidade para absorver a totalidade do produto gerado.

Relativamente às lamas provenientes das fossas sépticas e latrinas, foi assumida que a melhor solução envolve a sua Digestão Anaeróbica, desidratação em Leitos de Secagem e posterior higienização em Armazenamento Prolongado. Este esquema está associado à expansão da fase sólida da ETAR, tendo em conta a sua localização estratégica entre os dois núcleos abastecidos (Figura A-10 Anexo XIV) e proximidade com zonas agrícolas. O biogás gerado no processo deve ser convertido em eletricidade para uso interno da planta e o digerido higienizado deve ser comercializado como fertilizante orgânico. Foi assumido que a procura da região tem capacidade para absorver a totalidade do fertilizante gerado e que, apesar da pequena escala do reator ($1,22 \text{ m}^3/\text{dia}$), não existem problemas na geração de eletricidade.

Considerando que os métodos de comercialização satisfazem o fluxo total das lamas, não é necessário o estudo dos restantes métodos.

Foi, no entanto, identificada a inexistência de um aterro sanitário adequado na zona de implementação, sendo recomendada a inicialização de projetos para a sua construção, com o intuito de evitar impactos negativos associados à gestão de resíduos.

7. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

O Saneamento “*On Site*”, associado a soluções descentralizadas, assume um papel relevante no fornecimento de saneamento melhorado às populações, em países de baixo/médio PIB. No entanto, para que este tipo de sistemas tenha um desempenho comparável ao Saneamento Convencional, é requerida a implementação de redes de gestão que englobam o armazenamento, transporte (incluindo recolha), tratamento e deposição final das LF.

A gestão de LF, em países de baixo/médio PIB, apresenta diversas deficiências que resultam em impactes negativos no meio ambiente e na saúde pública. Prevê-se que a pressão nestes sistemas seja crescente, atendendo aos elevados custos do Saneamento Convencional, ao crescimento urbano verificado nestes países e às metas delimitadas no ponto 6 dos ODS, entre as quais a abolição de práticas de defecação “a céu aberto”. Por outro lado, nos poucos casos em que ETAR foram implementadas em países de baixo/médio PIB, são relatadas falhas na maior parte, geralmente, associadas a uma deposição deficiente da parte sólida (lamas), resultando na sua acumulação excessiva nos órgãos.

No âmbito da presente dissertação, foram averiguadas, através da revisão de literatura, formas adequadas de tratar e depor as lamas, em países de baixo/médio PIB, que ajudem a colmatar as falhas identificadas, especialmente de cariz económico, no sentido de promover a viabilidade da operação, e de cariz técnico e organizacional, com o intuito de sugerir ao planeador diferentes formas de processamento adequadas.

Apesar de serem tradicionalmente encaradas como um resíduo, foi concluído que as lamas têm características/constituintes que, após certos níveis de tratamento, podem culminar na sua valorização, que pode contribuir para a viabilidade económica da operação através de:

- **Comercialização:** receita direta da venda de produtos derivados de lamas.
- **Estímulos Externos:** atração de financiamento externo e/ou subsídios aos atores envolvidos, atendendo ao estímulo de uma economia circular e/ou de impactes adicionais nas dimensões ambiental e socio-económica.

Os métodos de valorização identificados foram:

- **comercialização de produtos derivados no setor energético:** é tirado partido do seu poder calorífico para a produção de combustíveis sólidos ou biogás que pode ser convertido em eletricidade. Este método assume especial relevância devido à substituição do uso de madeira como combustível, que está associada a fenómenos de deflorestação severa.
- **comercialização de produtos derivados no setor agrícola:** é tirado partido da concentração de nutrientes e de matéria orgânica das lamas, a partir da aplicação de fertilizantes orgânicos e de condicionadores de solo, respetivamente. Este método assume especial relevância devido à substituição de fertilizantes inorgânicos e da reposição de matéria orgânica nos solos, para colmatar fenómenos de erosão.
- **Deposição no solo:** as lamas são dispostas no solo, geralmente, não agrícola, sendo um método que não constitui comercialização, porém associado aos benefícios descritos no método anterior.

Caso estes métodos não se projetem viáveis, deve ser ponderada a deposição em aterro sanitário, atendendo que é um método que não valoriza as lamas e como tal, os seus impactes nas dimensões ambiental e socio-económica, preveem-se, de forma geral, negativos a longo prazo. Foi, no entanto, identificado que este tipo de deposição, em países de baixo/médio PIB, está fortemente associado à

prática de encaminhar as lamas para lixeiras ou aterros sanitários que não se revelam preparadas para receber resíduos com as características das lamas, traduzindo-se em impactes negativos.

Para todos os métodos mencionados é, geralmente, necessário/vantajoso aplicar níveis de tratamento às lamas, sendo os processos de redução de teor de humidade comum a todos, principalmente devido à sua relevância na redução do seu volume e conseqüente redução dos custos de transporte, tratamento e deposição.

Caso seja pretendida a comercialização de produtos derivados é, geralmente, necessária a aplicação de níveis de tratamento adicional, como estabilização e/ou higienização. Foi também concluído que a inclusão de outros resíduos nas redes gestão de lamas, pode ser um impulsionador para implementação de cadeias de saneamento baseadas numa economia circular. Adicionalmente, em muitos casos, em países de baixo/médio PIB, a gestão destes resíduos também se revela deficiente, permitindo desta forma criar uma dinâmica simbiótica que promove a mitigação de impactes.

Foi elaborado um método de decisão, com o intuito de sugerir ao planeador de uma intervenção na área do saneamento em países de baixo/médio PIB, quais os métodos de tratamento e deposição que devem ser considerados, privilegiando os que envolvem a comercialização de produtos, seguidos da deposição no solo.

Com o intuito de reduzir os custos da operação, concluiu-se que o tratamento em infra-estruturas existentes pode ser um fator determinante na escolha dos métodos de tratamento. Por outro lado, quando é necessária a construção de uma ETLF, a escala da operação deve ser otimizada, atendendo aos elevados custos de transporte associados a estações muito centralizadas. Neste contexto, pode ser preferível a implementação de um maior número de ETLF com uma escala de operação inferior.

Considerando que existem vários esquemas de tratamento possíveis, atendendo à qualidade de produto final pretendida, deve ser feita uma análise que compare o custo-benefício das alternativas possíveis, incluindo as dimensões ambiental e socio-económica com uma visão de gestão de resíduos a longo prazo. Apesar de este ser um processo complexo que deve ser avaliado caso-a-caso, foi concluído que a informação presente na literatura em relação a esta matéria é muitas vezes insuficiente para a comparação de métodos concorrentes e identificação de variáveis relevantes/fatores-chave. Neste contexto, são perspetivadas as seguintes áreas para trabalho futuro, com o intuito de auxiliar a tomada de decisão destas intervenções:

- Encorajamento de publicações e relatórios da experiência da implementação e operação de ETLF existentes, para promover o desenvolvimento de métodos de decisão empíricos;
- Estudos e relatos relacionados com o impacte das externalidades na viabilidade económica;
- Comparação direta da qualidade do produto final, do ponto de vista agrícola, das várias combinações possíveis de tratamento que originam condicionadores de solo;
- Uso de combustíveis sólidos derivados de lamas para a geração de calor e/ou eletricidade;
- Estudos/aplicação em grande escala de Leitões de Secagem Plantados e Compactação de LF.
- Comparação direta entre os custos, em USD por kg ST, ao tratamento em Leitões Plantados e de Tanques de Espessamento versus Lagoas de Espessamento.
- Avaliação do custo-benefício da aplicação de Leitões de Secagem versus Secagem Solar para LF semi-sólidas. A partir de qual valor de % ST é vantajosa a aplicação da Secagem Solar e quais os fatores relevantes?
- Estudos mais detalhados da redução da carga patogénica no Armazenamento Prolongado e do seu impacto no nível de estabilização e no seu poder calorífico das lamas.
- Estudos/re relatos sobre a capacidade de processamento dos métodos de Deposição no Solo;
- Estabelecimento de regulações dirigidas ao tratamento e deposição de LF, especialmente na comercialização de combustíveis sólidos.

Referências Bibliográficas

- [1] - US EPA SLUDGE 1979
- [2] – *Screens and Grit Removal Coarse* "Wastewater Technology Fact Sheet" EPA US
- [3] - Andreoli, C. V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). *Sludge treatment and disposal*. IWA publishing.
- [4] - Spellman, F. R. (2003). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. CRC press.
- [5] - Strande, L., & Brdjanovic, D. (Eds.). (2014). *Faecal sludge management: Systems approach for implementation and operation*. IWA publishing.
- [6] - Ferreira F, Slides Instalações de Tratamento
- [7] - Forbis-Stokes, A. A., O'Meara, P. F., Mugo, W., Simiyu, G. M., & Deshusses, M. A. (2016). On-site fecal sludge treatment with the anaerobic digestion pasteurization latrine. *Environmental engineering science*, 33(11), 898-906.
- [8] - Wang, L. K., Hung, Y. T., & Shammass, N. K. (Eds.). (2005). *Physicochemical treatment processes* (Vol. 4). Totowa, NJ: Humana Press.
- [9] - Nikiema, J., & Cofie, O. O. (2014). Technological options for safe resource recovery from fecal sludge.
- [10] - Metcalf & Eddy, Burton, F. L., Stensel, H. D., & Tchobanoglous, G. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw Hill
- [11] - Kelessidis, A., & Stasinakis, A. S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste management*, 32(6), 1186-1195.
- [12] - Cofie, O., Nikiema, J., Impraim, R., Adamtey, N., Paul, J., & Koné, D. (2016). *Co-composting of solid waste and fecal sludge for nutrient and organic matter recovery* (Vol. 3). IWMI.
- [13] - Samolada, M. C., & Zabaniotou, A. A. (2014). Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste management*, 34(2), 411-420.
- [14] - Velkushanova, K., Brdjanovic, D., Koottatep, T., Strande, L., Buckley, C., & Ronteltap, M. (2021). *Methods for faecal sludge analysis*. IWA Publishing.
- [15] - Muspratt, A. M., Nakato, T., Niwagaba, C., Dione, H., Kang, J., Stupin, L., ... & Strande, L. (2014). Fuel potential of faecal sludge: calorific value results from Uganda, Ghana and Senegal. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 4(2), 223-230.
- [16] - Narayana, D. (2020). *Co-treatment of Septage and Faecal Sludge in Sewage Treatment Facilities*. IWA Publishing.
- [17] – Parker, J., Hakspiel D., Andrew F., Emily Woods. Waste-to-Value Sanitation in Kakuma Refugee Camp. Sanivation
- [18] - Parker, J., Hakspiel D., Andrew F. Container-based Toilets with Solid Fuel Briquetts as Reuse Product. Sanivation

- [19] - Seck, A., Gold, M., Niang, S., Mbéguéré, M., Diop, C., & Strande, L. (2015). Faecal sludge drying beds: increasing drying rates for fuel resource recovery in Sub-Saharan Africa. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 5(1), 72-80.
- [20] - Hao, X., Chen, Q., van Loosdrecht, M. C., Li, J., & Jiang, H. (2020). Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion. *Water research*, 170, 115298.
- [21] - Ciešlik, B. M., Namieśnik, J., & Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 90, 1-15.
- [22] - Andriessen, N., Ward, B. J., & Strande, L. (2019). To char or not to char? Review of technologies to produce solid fuels for resource recovery from faecal sludge. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 9(2), 210-224.
- [23] - Nikiema, J., Impraim, R., Cofie, O., Nartey, E., Jayathilake, N., Thiel, F., & Drechsel, P. RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 15.
- [24] - Gilbert, J., Ricci-Jürgensen, M., & Ramola, A. (2020). Benefits of compost and anaerobic digestate; when applied to soil. ISWA.
- [25] - Oksanen, J., Pöykiö, R., & Dahl, O. (2021). Comparison of Untreated, Lime-Stabilized and Composted Wastewater Sludges from a Pulp, Board and Paper Mill Integrate as a Fertilizer Product. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 47-58.
- [26] - McConville, J. R., Kvarnström, E., Nordin, A. C., Jönsson, H., & Niwagaba, C. B. (2020). Structured Approach for Comparison of Treatment Options for Nutrient-Recovery From Fecal Sludge. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 36.
- [27] - Gebreeyessus, G. D., & Jenicek, P. (2016). Thermophilic versus mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge: a comparative review. *Bioengineering*, 3(2), 15.
- [28] – Lugali Y. (2019) *Making Briquettes from Faecal Sludge* Water Research Comission
- [29] - Gold, M., Niang, S., Niwagaba, C., Eder, G., Muspratt, A. M., Diop, P. S., & Strande, L. (2014). Results from FaME (Faecal Management Enterprises)-can dried faecal sludge fuel the sanitation service chain?.
- [30] – Gold, M., Ddiba, D. I. W., Seck, A., Sekigongo, P., Diene, A., Diaw, S., ... & Strande, L. (2017). Faecal sludge as a solid industrial fuel: a pilot-scale study. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 7(2), 243-251.
- [31] - Atwijukye, O., Kulabako, R., Niwagaba, C., & Sugden, S. (2018). Low cost faecal sludge dewatering and carbonisation for production of fuel briquettes.
- [32] – Zabaleta I., Bulant N., Pfyffer B., Rohr M., Ivumbi E., Mwamlima P., Rajabu H.M., Zurbrugg C. *Pyrolysis of Biowaste in Low to Middle Income Settings*. Eawag Publishing
- [33] - Ingallinella, A. M., Sanguinetti, G., Koottatep, T., Montangero, A., & Strauss, M. (2002). The challenge of faecal sludge management in urban areas-strategies, regulations and treatment options. *Water Science and Technology*, 46(10), 285-294.
- [34] - Christodoulou, A., & Stamatelatou, K. (2016). Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Science and Technology*, 73(3), 453-462.
- [35] - Snyman, H. G. (2007). Management of wastewater and faecal sludge in Southern Africa. *Water Practice and Technology*, 2(4).
- [36] - Nikiema, J., Impraim, R., Cofie, O., Nartey, E., Jayathilake, N., Thiel, F., & Drechsel, P. RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 14.

- [37] - Nikiema, J., Impraim, R., Cofie, O., Nartey, E., Jayathilake, N., Thiel, F., & Drechsel, P. RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 6.
- [38] - Zewde, A. A., Li, Z., & Xiaoqin, Z. (2021). Improved and promising fecal sludge sanitizing methods: treatment of fecal sludge using resource recovery technologies. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 11(3), 335-349.
- [39] - Steiner, M., Montangero, A., Koné, D., & Strauss, M. (2002). Economic aspects of low-cost faecal sludge management. *Estimation of collection, haulage, treatment and disposal/reuse cost, EAWAG/SANDEC*.
- [40] - Kengne, I. M., Dodane, P. H., Akoa, A., & Koné, D. (2009). Vertical-flow constructed wetlands as sustainable sanitation approach for faecal sludge dewatering in developing countries. *Desalination*, 248(1-3), 291-297.
- [41] - Koné, D., & Strauss, M. (2004, September). Low-cost options for treating faecal sludges (FS) in developing countries—Challenges and performance. In *9th International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control and to the 6th International IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilisation Ponds, Avignon, France* (Vol. 27).
- [42] - Dodane, P. H., Mbéguéré, M., & Koné, D. (2009). Technico-Financial Optimisation of Unplanted Drying Beds. *Sandec News n, 10*.
- [43] - Tayler, K. (2018). *Faecal Sludge and Septage Treatment: A Guide for Low and Middle Income Countries*. Practical Action Publishing.
- [44] - Vögeli, Y. (2014). *Anaerobic digestion of biowaste in developing countries: Practical information and case studies*. Eawag-Sandec.
- [45] - Soyngbe, A. A., Olayinka, O., Bamgbose, O., & Adetunji, M. T. (2019). Effective management of faecal sludge through co-digestion for biogas generation. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(6), 1159-1168.
- [46] - Klingel, F., Montangero, A., Koné, D., & Strauss, M. (2002). Fecal sludge management in developing countries. *A planning manual. EAWAG: Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology SANDEC: Department for Water and Sanitation in Developing Countries*.
- [47] - Semiyaga, S., Okure, M. A., Niwagaba, C. B., Katukiza, A. Y., & Kansime, F. (2015). Decentralized options for faecal sludge management in urban slum areas of Sub-Saharan Africa: A review of technologies, practices and end-uses. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 109-119.
- [48] - Peal, A., Evans, B., Blackett, I., & Hawkes, P. (2015). A review of fecal sludge management in 12 cities. *World Bank Final Report*.
- [49] - Puchajda, B., & Oleszkiewicz, J. (2008). Impact of sludge thickening on energy recovery from anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 57(3), 395-401.
- [50] – Josiene M., Figoli A., Langergraber G., Weissenbabcher N. (2014). *Wastewater Treatment practices in Africa – Experiences from Seven Countries*.
- [51] - Shikun, C., Lei, Z., Mingyue, Z., Xue, B., Zifu, L., & Mang, H. P. (2017). Assessment of two faecal sludge treatment plants in urban areas: Case study in Beijing. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3), 237-245.
- [52] - Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., & Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859.

- [53] - Cofie, O., Kone, D., Rothenberger, S., Moser, D., & Zubruegg, C. (2009). Co-composting of faecal sludge and organic solid waste for agriculture: Process dynamics. *Water research*, 43(18), 4665-4675.
- [54] - Studer, F., Tukahirwa, S., Nantambi, S., Arnheiter, R., Bleuler, M., Getkate, W., ... & Strande, L. (2016). Energy recovery with faecal sludge fuels in Kampala, Uganda. *Sandec news*, 17(10).
- [55] - Koné, D., Cofie, O., Zurbrügg, C., Gallizzi, K., Moser, D., Drescher, S., & Strauss, M. (2007). Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates. *Water research*, 41(19), 4397-4402.
- [56] - Danthurebandara, M., Van Passel, S., Nelen, D., Tielemans, Y., & Van Acker, K. (2012). Environmental and socio-economic impacts of landfills. *Linnaeus Eco-Tech*, 2012, 40-52.
- [57] - Idowu, I. A., Atherton, W., Hashim, K., Kot, P., Alkhaddar, R., Alo, B. I., & Shaw, A. (2019). An analyses of the status of landfill classification systems in developing countries: Sub Saharan Africa landfill experiences. *Waste Management*, 87, 761-771.
- [58] - Coulibaly, L. Evaluation of Water and Sanitation Situation of Rural Area near Landfill, Abidjan.
- [59] - South Africa. Department of Water Affairs and Forestry, & Bredenhann, L. (1998). MINIMUM REQUIREMENTS FOR THE HANDLING, CLASSIFICATION AND DISPOSAL OF HAZARDOUS WASTE.
- [60] – South Africa. Department of Water Affairs and Forestry, & Bredenhann, L. (1998). *Minimum requirements for waste disposal by landfill*. The Department.
- [61] - Molewa, B. E. (2013). National Environmental Management: Waste Act (59/2008): approval of an integrated industry waste tyre management plan of the recycling and economic development initiative of South Africa. *South African National Department of Environmental Affairs*, 569, 35927. R 635
- [62] - Molewa, B. E. (2013). National Environmental Management: Waste Act (59/2008): approval of an integrated industry waste tyre management plan of the recycling and economic development initiative of South Africa. *South African National Department of Environmental Affairs*, 569, 35927. R 636
- [63] - Ngo, T. (2020). Pyrolysis in fecal sludge treatment.
- [64] - Nikiema, J., Impraim, R., Cofie, O., Nartey, E., Jayathilake, N., Thiel, F., & Drechsel, P. RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 17.
- [65] - Danso, G. K., Otoo, M., Ekere, W., Ddungu, S., & Madurangi, G. (2017). Market feasibility of faecal sludge and municipal solid waste-based compost as measured by farmers' willingness-to-pay for product attributes: Evidence from Kampala, Uganda. *Resources*, 6(3), 31.
- [66] - Mallory, A., Holm, R., & Parker, A. (2020). A review of the financial value of faecal sludge reuse in low-income countries. *Sustainability*, 12(20), 8334.
- [67] - Getahun, S., Septien, S., Mata, J., Somorin, T., Mabbett, I., & Buckley, C. (2020). Drying characteristics of faecal sludge from different on-site sanitation facilities. *Journal of environmental management*, 261, 110267.
- [68] - Tran, T., Hong, L. T. A., Kieu, N. T. T., Le, D. A., Tuong, L. Q., & Tan, L. V. (2020, December). Study on septic sludge utilization to coordinate with agricultural wastes to produce compost fertilizer. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 991, No. 1, p. 012089). IOP Publishing.

- [69] - Sonko, E. H. M., Mbéguéré, M., Diop, C., Niang, S., & Strande, L. (2014). Effect of hydraulic loading frequency on performance of planted drying beds for the treatment of faecal sludge. *Journal of water, sanitation and hygiene for development*, 4(4), 633-641.
- [70] – Gold, M., Cunningham, M., Bleuler, M., Arnheiter, R., Schönborn, A., Niwagaba, C., & Strande, L. (2018). Operating parameters for three resource recovery options from slow-pyrolysis of faecal sludge. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 8(4), 707-717.
- [71] - Gold, M., Niwagaba, C., Studer, F., Getkate, W., Babu, M., & Strande, L. (2015). Production of Pellets and Electricity from Faecal Sludge. *Sandec Water and Sanitation in Developing Countries. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. ISSN, 1420-5572.*
- [72] - Ward, B. J., Gold, M., Turyasiima, D., Studer, F., Getkate, W., Maiteki, J. M., ... & Strande, L. (2017). SEEK (Sludge to Energy Enterprises in Kampala): co-processing faecal sludge for fuel production.
- [73] - Naidoo, D., Archer, C. E., Septien, S., Appleton, C. C., & Buckley, C. A. (2020). Inactivation of *Ascaris* for thermal treatment and drying applications in faecal sludge. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 10(2), 209-218.
- [74] - Taweesan, A., Koottatep, T., & Polprasert, C. (2015). Effective faecal sludge management measures for on-site sanitation systems. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 5(3), 483-492.
- [75] - Ministério da Economia e Finanças, Agência de Desenvolvimento do Vale do Zambeze e Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural (2015). Avaliação Ambiental Estratégica, Plano Multissetorial Plano Especial de Ordenamento Territorial do Vale do Zambeze e Modelo Digital de Suporte a Decisões.
- [76] - Singh, S., Mohan, R.R., Rathi, S., Raju, N.J., (2017). Technology options for faecal sludge management in developing countries: Benefits and revenue from reuse. *Environmental Technology & Innovation*
- [77] - World Health Organization. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater* (Vol. 2). World Health Organization.
- [78] – South African Republic, Water Affairs and Forestry Department (2006) Guidelines for the Utilisation and Disposal of Wastewater Sludge Volume 2: Requirements for the agricultural use of wastewater sludge.
- [79] - South African Republic, Water Affairs and Forestry Department (2006) Guidelines for the Utilisation and Disposal of Wastewater Sludge Volume 3: Requirements for the on-site and off-site disposal of sludge
- [80] – institute for sustainable Futures (INS) Deep row entrenchment. Asia and. Africa. CASE STUDY 7
- [81] - Still, D., Louton, B., Bakare, B., Taylor, C., Foxon, K. M., & Lorentz, S. A. (2012). *Investigating the Potential of Deep Row Entrenchment of Pit Latrine and Waste Water Sludges for Forestry and Land Rehabilitation Purposes: Report to the Water Research Commission.* Water Research Commission.
- [82] - Strande, L., Schoebitz, L., Bischoff, F., Ddiba, D., Okello, F., Englund, M., ... & Niwagaba, C. B. (2018). Methods to reliably estimate faecal sludge quantities and qualities for the design of treatment technologies and management solutions. *Journal of environmental management*, 223, 898-907.
- [83] – Energias Renováveis em Moçambique – Relatório Nacional do Ponto de Situação (Outubro 2017)

- [84] - Von Sperling, M. (2007). *Waste stabilisation ponds*. IWA publishing.
- [85] – Elaboração de Termos de Referência para o Projeto Executivo de saneamento da cidade de Tete 3º RELATÓRIO DE PROGRESSO (2016)
- [86] - elaboração de Termos de Referência para o Projeto Executivo de saneamento da cidade do Tarrafal de Santiago e povoação do Chão Bom.
- [87] – Câmara Municipal do Tarrafal de Santiago – Enquadramento da Ilha de Santiago.
- [88] – Ministério do Turismo, Indústria e Energia de Cabo Verde – Relatório base para Cabo Verde.
- [89] - Câmara Municipal do Tarrafal de Santiago – Plano de Atividade e Orçamento (2021).
- [90] - Robert, G., Jennings, A., Samuel, R., & Reymond, P. (2018). *Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies*. German WASH Network.
- [91] – Câmara Municipal do Tarrafal de Santiago (2011) – Plano de Desenvolvimento Urbano de Chão Bom.

ANEXOS

Anexo I – Tipos de Interface de Utilização (Compartimentos)

Apesar de não ser diretamente a área de trabalho, é relevante distinguir as interfaces de Saneamento “On Site” mais utilizadas, uma vez que é um fator determinante nas características das lamas. As tecnologias podem ser divididas nas categorias “a seco” ou “com água”, consoante a quantidade de água que dá entrada nos compartimentos.

Tecnologias “a seco”

- **Latrina Simples:** É a forma mais básica e barata de saneamento “no local”. É um sistema a seco onde o utilizador deposita a excreta diretamente para um compartimento (geralmente enterrado), apenas coberto por uma laje. Tem as desvantagens de maus odores e proliferação de insetos [6].
- **Latrina Melhorada:** É uma latrina simples, contudo com um sistema de ventilação no compartimento que garante ventilação e conseqüente eliminação de maus odores [6].
- **Latrina com Separação de Urina (LSU):** É uma latrina, geralmente melhorada, onde a urina e as fezes são coletadas em diferentes compartimentos.
- **Fossa Alternativa:** É um sistema composto por dois compartimentos, com um uso similar a uma latrina simples, contudo com o objetivo de fazer composto através da excreta. Um dos compartimentos é usado para a coleção da excreta, enquanto o outro faz o processo de compostagem. No final do ciclo, eles trocam a sua função [6].

Tecnologias “com água”

- **Latrina com descarga:** É uma latrina, geralmente sifonada, onde há uma descarga de água para efeitos de autoclismo.
- **Fossa Séptica:** Reservatório que recebe efluentes residuais produzidos. De todas as tecnologias “On Site”, as fossas sépticas são a que recebem efluentes com características mais semelhantes aos do Saneamento Convencional. Devido a ter um caudal de saída, o volume é constante na fossa. Um dos objetivos do sistema é fazer uma separação sólido-líquido do afluente, que resulta numa deposição de LF no fundo do tanque. Geralmente, forma-se também uma camada de espumas (composta por gorduras e outros materiais) na sua parte superior. Devido ao facto de se criarem condições anaeróbicas, há uma digestão das lamas e conseqüente estabilização das mesmas. É requerida uma unidade complementar de tratamento das do efluente de saída, a jusante [6].
- **Poço de Lixiviação:** São sistemas parecidos a fossas sépticas, contudo os limites do reservatório não são impermeáveis, pelo que ocorrem fenómenos de infiltração.

Anexo II – Principais falhas na Gestão de Lamas Fecais

Regulações e Monitorização

- O foco dos *policy-makers* continua a ser o Saneamento Convencional e como tal, é verificada a Inexistência de regulações aplicadas à gestão de LF. Adicionalmente, o nível de monitorização é pouco/nenhum.

Transporte

- São relatados casos em que os camiões de recolha não têm acesso aos compartimentos (por exemplo, devido a ruas estreitas).
- Distância entre os compartimentos e a ETLF é muito grande e os custos de transporte são muitas vezes proibitivos.
- Existem casos onde as LF são recolhidas, no entanto são descarregadas ilegalmente no meio ambiente ou vendidas em negócios informais entre as entidades de recolha (muitas vezes empresas privadas) e agricultores locais. Este fenómeno acontece maioritariamente devido à inexistência de locais apropriados para o tratamento das lamas. Adicionalmente, o autor de [47] relata que nos casos de remoção manual das lamas, os agentes responsáveis são muitas vezes recompensados monetariamente pelo volume de lamas recolhidas e não pelo volume de lamas descarregadas em ETLF.

Técnicos

- Falta de conhecimento técnico na operação e manutenção das ETLF. Estas falhas muitas vezes resultam em baixas eficiências de tratamento e/ou na acumulação excessiva de lamas nas ETLF. Segundo [46] esta é uma das maiores causas para que as ETLF em países de baixo/médio PIB falhem.

Sociais e Culturais

- A qualidade das lamas é, em parte, determinada pela matéria que dá entrada nos compartimentos. Como tal, zonas onde exista o hábito de colocar papeis, produtos menstruais, fraldas e até mesmo detergentes e outros químicos pode piorar a qualidade das lamas e dificultar os processos de deposição.
- Comunidades onde existe uma baixa aceitabilidade de produtos derivados de LF que tornam o processo comercialização dos mesmos inviável.

Nota: Para além das falhas descritas neste anexo, falhas relacionadas com as estruturas institucionais/organizacionais e falhas de cariz económicas têm um grande impacto na Gestão de LF. Devido à sua relevância, tendo em conta os objetivos da presente dissertação, são descritas na secção 1.2.

Anexo III – Exemplos de Patogénicos nas Lamas e respetivas Doenças/Sintomas

Tabela A-1: Exemplos de Patogénicos e repetitivas doenças e sintomas, adaptado de [77].

Grupo	Patogénico	Doença e Sintomas
Bactéria	Aeromonas spp.	Enterite
	Campylobacter jejuni/coli	Campilobacteriose - Diarreia, Dor abdominal, febre, náusea, artrite; síndrome Guillain-Barré
	Escherichia coli	Enterite
	Plesiomonas shigelloides	Enterite
	Salmonella typhi/paratyphi	Febre Tifoide - Enxaqueca, Febre, anorexia
	Salmonella spp.	Salmonelose - diarreia, febre, dor abdominal
	Shigella spp.	Shigelose - vômitos, diarreia com sangue, febre; Síndrome Reiter
	Vibro cholerae	Cólera - Diarreia líquida, podendo ser letal caso não tratada.
	Yersinia spp.	yersiniose - febre, dores abdominais, diarreia, dores nas articulações.
Vírus	Enteric adenovirus	Enterite
	Astrovirus	Enterite
	Calicivirus	Enterite
	Coxsackievirus	Enterite, doenças respiratórias, meningite
	Echovirus	Meningite acética, encefalite
	Enterovirus tipos 68-71	Meningite, encefalite, paralisia
	Hepatite A vírus	Hepatite - febre, anorexia, náusea, desconforto abdominal
	Hepatite E vírus	Hepatite
	Poliovirus	poliomielite - febre, náusea, vômitos, enxaqueca, paralisia
	Rotavirus	Enterite
Protozoa	cryptosporidium parvum	criptópolis - Diarreia líquida, dores abdominais
	cyclospora cayetanensis	amebíase diarreia, dores abdominais, febre
	Giardia intestinalis	Giardíase - diarreia, dores abdominais, perda de peso
Helmintos	Ascaris humbricoides	Ascaridíase - febre, enterite, doenças pulmonares
	Taenia solium/saginata	Teníase
	Trichuris trichiura	Tricuríase - diarreia
	Aneylostoma duodenale	Comichão, Coceira, anemia, deficiência de proteína
	Shchistosoma spp.	Esquistossomose

Anexo IV - Variabilidade das Características de Lamas Fecais a Macro Escala

Origem

Lamas provenientes de habitações residenciais podem ter características muito diferentes de atividades industriais e comerciais. Muitas vezes estas estão associadas a concentrações de substâncias tóxicas nas lamas.

Fatores Técnicos

- **Tipo de Tecnologia:** O tipo de tecnologia aplicada refere-se ao impacto que diferentes tecnologias de saneamento “*On Site*” têm na qualidade das lamas. Sistemas “a secos” tendem a produzir lamas com maiores concentrações de ST, CQO, nutrientes e Patogénicos, devido à fraca diluição. O contrário é verificado para sistemas húmidos onde existe entrada de águas cinzentas, como fossas sépticas. Adicionalmente, tecnologias em que exista separação de urina e fezes, produzem lamas com menor concentração de nutrientes.
- **Qualidade da Construção:** A qualidade da construção também tem influência, pois pode por exemplo determinar a ocorrência de infiltrações, que pode afetar o teor de humidade e a concentração de poluentes.
- **Frequência de Recolha:** A frequência de recolha das lamas pode ser relevante, uma vez que as lamas contêm matéria instável (orgânica) que é estabilizada com o passar do tempo [4]. Como tal, maiores frequências de recolha (lamas mais frescas), tendem a ter baixos graus de estabilização. O contrário é verificado para menores frequências de recolha. Este fenómeno é comum em fossas sépticas em que as frequências de recolha são, geralmente, na ordem dos anos e como tal, as lamas recolhidas relevam um certo grau de estabilização (devido à existência de condições anaeróbias). Adicionalmente, a concentração de agentes patogénicos tende a decrescer com o aumento da idade das lamas [47].

Fatores Demográficos

- **Número de Utilizadores:** Em zonas urbanas de alta densidade populacional, a taxa de enchimento dos compartimentos é alta, o que se traduz numa maior frequência de recolha e por sua vez a graus de estabilização reduzidos nas lamas.
- **Ordenado médio da população:** zonas mais pobres podem estar associadas a um menor uso de água (e conseqüente menor diluição de águas pretas e cinzentas) e a consumo alimentar diferente (geralmente com menos proteína) que tem impacto na qualidade e quantidade de lamas geradas.

Fatores Ambientais

Fatores como geologia, topográfica, clima e águas subterrâneas podem ter impacto na qualidade das lamas [14]. Estes fatores podem determinar infiltrações e conseqüente aumento do teor de humidade. Solos arenosos são mais permeáveis e facilitando a existência destes fenómenos. Contrariamente, solos argilosos são mais impermeáveis.

Anexo V – Desidratação Até 90% ST em Leitos de Secagem

O autor de [19] realizou um estudo na ETLF de Cambérène, em Dakar, Senegal, que consistiu na desidratação de lamas até 90% ST em leitos de secagem, em diferentes condições. As lamas, provenientes maioritariamente de fossas sépticas, tinham um teor de ST inicial baixo, a rondar os 0,5%. A montante dos leitos de secagem, foram submetidas a processos de gradagem e homogeneização, e espessadas em espessadores gravíticos até valores a rondar os 5,1% ST. O estudo foi realizado durante 9 meses, em escala piloto, nas seguintes condições:

- Construídas estufas com 1.5m de altura em alguns leitos, com duas aberturas para efeitos de ventilação;
- Aplicadas duas cargas de sólidos diferentes nos leitos de secagem, 100 e 150 Kg ST/(m² *ano);
- Realizados 5 sets de experiências na época seca e 2 na época da chuva;
- Testadas diferentes frequências de mistura das lamas nos leitos.

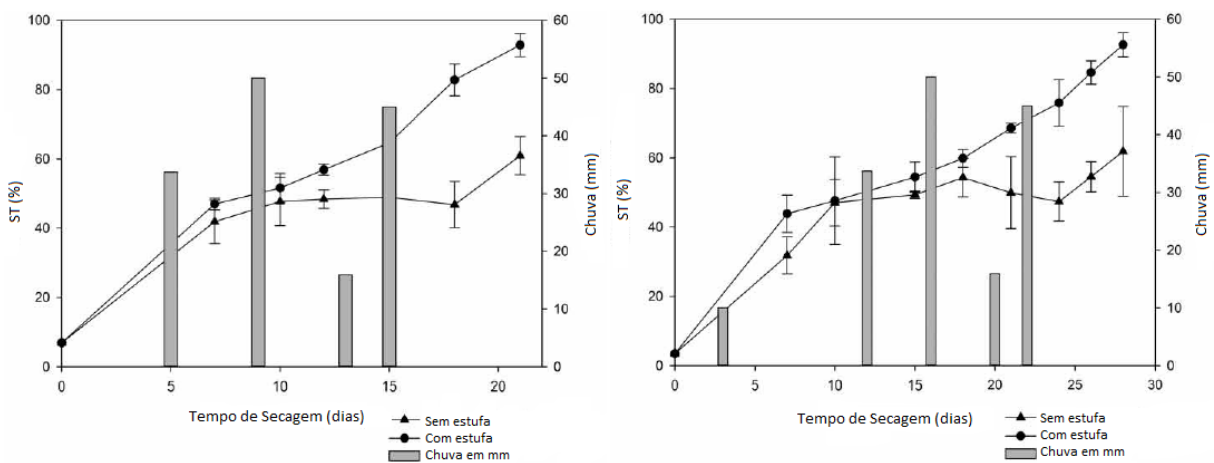


Figura A-1: Resultados para a época com chuva para 100 e 150 Kg ST/(m² *ano), na esquerda e direita, respetivamente.

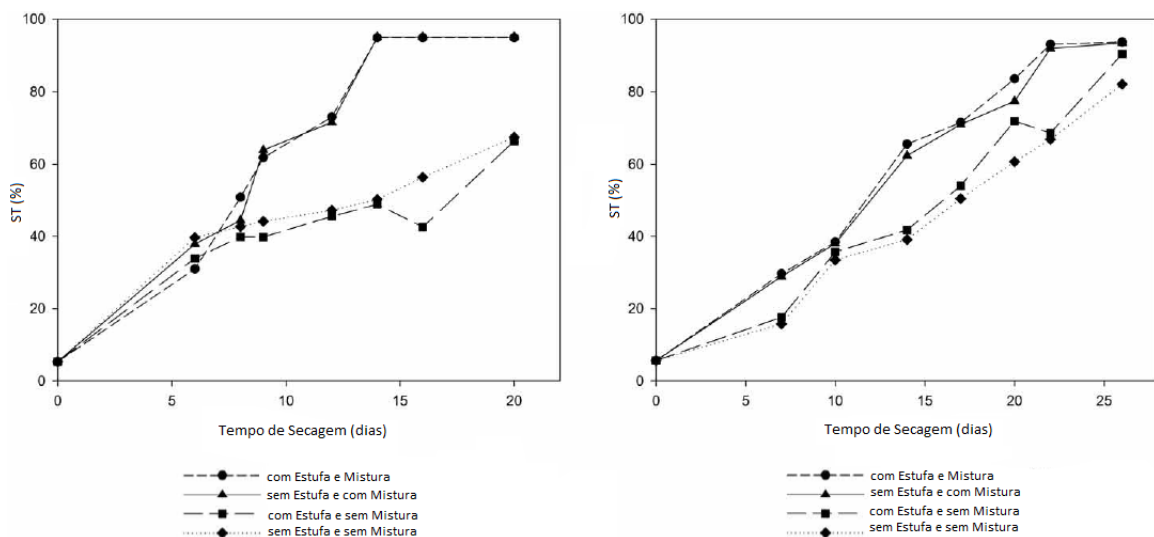


Figura A-2: Resultados para a época seca para 100 e 150 Kg ST/(m² *ano), na esquerda e direita, respetivamente.

O estudo conclui que é possível, no local de aplicação, a desidratação até 90% ST na época seca e da chuva. A mistura das lamas teve um impacto positivo na redução dos ciclos de secagem, no entanto as estufas apenas se revelaram benéficas para efeitos de proteção de eventos de precipitação.

Anexo VI - Métodos de Desidratação Mecânica

Prensa de Parafuso

A prensa de parafuso é uma máquina composta por um tambor cilíndrico e com uma superfície interior porosa. No eixo central do sistema, existe um parafuso com hélices com o mesmo diâmetro do tambor, que ao rodar força as lamas a “percorrer” o sistema. Contudo, o parafuso tem uma zona interior que ao longo do comprimento da máquina, aumenta de diâmetro. Este design, faz com que as lamas percorram o sistema, porem sujeitas a um gradiente de pressão crescente. Em alguns casos, a máquina é inclinada.

As lamas são, geralmente, condicionadas com um polímero (processo descrito na secção 3.4.4), a montante, e alimentados numa extremidade do sistema. Uma vez dentro do mesmo, as lamas “passam” por duas zonas: 1) Zona de espessamento - são espessadas numa zona inicial onde a pressão imposta pelo parafuso é mínima/nula e a água-livre escoar pelas porosidades das paredes (fenómeno estimulado pelo movimento das hélices do parafuso); 2) Zona de espessamento/ desidratação - O diâmetro crescente do parafuso aumenta a pressão imposta nas lamas, que “obriga” parte da água presente nas mesmas a escoar pelas porosidades.

Prensa de Filtro de Banda

A Prensa de Filtro de Banda é uma máquina composta que espessa e desidrata as lamas através de gravidade e de pressão aplicada por bandas. No sistema, as lamas são movidas por um tapete rolante que as submete a diferentes zonas de tratamento. Geralmente, o processo é dividido em 3 estágios:

- **Condicionamento:** As lamas são condicionadas para promover a separação sólido-líquido, geralmente, pela adição de um polímero. Este estágio não é obrigatório, especialmente para lamas digeridas [9]. No entanto, é usualmente aplicado em lamas frescas ou caso seja requerido um alto teor de ST nas lamas tratadas;
- **Zona de drenagem gravítica:** As lamas são submetidas a um processo de espessamento gravítico, no qual é removida a maior parte da “água livre”;
- **Zona de compressão:** As lamas espessadas são submetidas a uma força compressiva, geralmente criada por duas bandas porosas. A pressão aplicada “força a água a sair” das lamas. As lamas desidratadas são posteriormente removidas da banda com um raspador. Geralmente, existem duas zonas diferentes neste estágio: zona de baixa pressão e zona de alta pressão.

Os filtros de banda podem ser operados em condições diferentes (valor da pressão aplicada ou o espessamento ser assistido por um sistema a vácuo) que resultam em bolos com diferentes concentrações de ST. Geralmente, maiores eficiências de tratamento traduzem-se em custos operacionais superiores. O produto final depende também de outros fatores tais como, a velocidade e porosidade da banda, características das lamas e condicionamento [10].

Anexo VII – Digestão Anaeróbica (Estágios e Condições)

Estágios Do Processo

Podem ser distinguidos três principais estágios no processo:

- **Hidrólise:** Enzimas convertem compostos orgânicos, como proteínas, lípidos e celulose, em compostos solúveis, como álcoois, ácidos gordos, amónia e dióxido de carbono [3].
 - **Produção de Ácido:** Microrganismos convertem os compostos solúveis em ácidos acético e propiónico, hidrogénio, dióxido de carbono e outros ácidos orgânicos [3].
 - **Produção de Metano:** Um grupo de organismos forma metano a partir de hidrogénio e dióxido de carbono e outro a partir de acetatos [3].
-

Condições no Reator (exceto temperatura)

pH

Os valores ideais de pH no reator são entre 6,5-7,5. No entanto, dependendo do estágio da digestão podem ocorrer algumas flutuações.

Caso o valor do pH da alimentação seja muito ácido é, geralmente, adicionada lima ou bicarbonato de sódio. A lima tem a vantagem de ser, de forma geral, mais barata, no entanto, em grandes quantidades pode resultar em fenómenos de entupimento devido à precipitação.

Rácio C:N

Os rácios ótimos de C:N no reator são entre 16-25. Valores mais altos podem traduzir-se em numa menor produção de biogás. Por outro lado, valores mais baixos podem estimular a acumulação de amónia no reator e uma subida no pH para valores superiores a 8,5. Estas condições são tóxicas para os microrganismos que realizam a digestão e como tal, devem ser evitadas.

Carga Orgânica

A carga orgânica é um parâmetro importante em sistemas contínuos. Cargas elevadas podem despoletar reações que sobem os valores de pH no reator e causam os problemas acima descritos.

Para sistemas de digestão com sistema de mistura no reator, os valores são entre 4-8 kg de SV/m³. No entanto, para sistemas em que não existe mistura o valor deve ser inferior a 2 kg de SV/m³.

Tempo de Retenção Hidráulico (TRH)

Para sistemas de Digestão Mesófila o TRH é de 10-40 dias. Já os sistemas de Digestão Termófila são de poucos dias (geralmente 4 ou 5). Esta diferença deve-se ao facto das bactérias termófilas realizarem a digestão mais rapidamente.

Anexo VIII – Compostagem

A compostagem é regida por mecanismos naturais e de forma geral, podem ser distinguidos 3 estágios:

- **Ativação:** Crescimento de populações de bactérias e consequente consumo de compostos biodegradáveis (proteínas, açúcares, entre outros). Devido a reações catabólicas exotérmicas e à rápida taxa de crescimento das bactérias, é registada uma subida da temperatura neste estágio [5].
- **Arrefecimento:** Quando as temperaturas atingem a zona termófila (50°C – 70°C), são ativadas as bactérias termófilas que contribuem para a continuação da decomposição da matéria. A gama de valores de temperatura neste estágio, permite uma redução dos agentes patogénicos presentes [5].
- **Maturação:** Na terceira fase, é consumido o restante substrato que alimenta as populações bacterianas. Neste estágio, as concentrações de substrato tornam-se um fator limitante e como tal, a atividade bacteriana decresce e a temperatura desce até atingir valores do meio ambiente. Simultaneamente, fungos e actinomicetes degradam moléculas orgânicas recalcitrantes como celulose e lignina [5]. Quando bem aplicada, o resultado é matéria estabilizada.

Quando bem realizada e monitorizada, a compostagem, incluindo maturação, ronda, no mínimo, 6 a 8 semanas [5]. A Figura A-3 exhibe o perfil de temperatura e bactérias ativadas ao longo desse período.

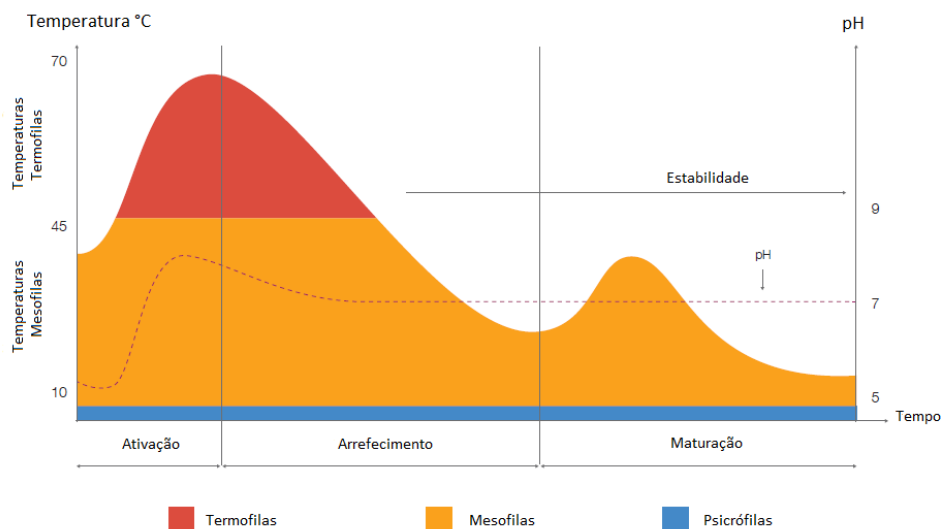


Figura A-3: perfil de temperatura e bactérias ativadas ao longo do período de compostagem, adaptado de [12].

Rácio C:N inicial

Foi observado, de forma empírica, que o rácio ótimo de C:N para o crescimento dos micróbios é de 25 a 35 [12]. Valores superiores podem traduzir-se num crescimento das populações micróbicas muito acentuado, que devido ao crescente consumo de oxigénio, podem gerar condições anaeróbicas [12].

Para além disso, valores de nitrogénio em excesso podem promover a sua libertação sob a forma de amónia [5].

Valores inferiores irão limitar o crescimento das populações microbiais, retardar o processo e traduzem-se em elevados valores de concentração de carbono no composto final. Isto pode gerar uma consequente diminuição de nitrogénio nos solos visto o carbono em excesso no composto “roubar” o nitrogénio dos solos.

O rácio C:N é dinâmico durante o processo visto que é convertido em CO₂. Como tal, o rácio C:N baixa tende a baixar no decorrer da compostagem e tende a assumir valores na ordem dos 10 no final [5].

Humidade

A humidade relativa deve ser mantida entre os 40 e 65% dado que é necessária para o crescimento dos organismos [12]. Contudo, valores superiores a 65% podem induzir condições anaeróbicas e lixiviação de nutrientes [5] e valores inferiores a 40% podem reduzir a atividade microbiana e levar ao decréscimo das populações microbianas [12].

Arejamento

Para manter o arejamento é aconselhável que os poros entre o material representem cerca de 20%. Para tal, é importante ter um material que seja de certa forma heterogéneo com diversas texturas. Idealmente, é também aconselhável uma concentração de oxigénio no ar superior a 10%. Para garantir o arejamento no processo vários métodos podem ser usados, dependendo do tipo de compostagem posto em prática (exemplos são o arejamento mecânico ou manual) [5].

Diâmetro das partículas e Porosidade

É aconselhável um diâmetro a rondar entre 1 a 2,5cm para métodos com aeração mecânica e de 5 a 10cm para métodos de aeração natural [12]. O diâmetro é um fator importante na determinação da porosidade e da área de contacto da mistura. Valores muito elevados podem resultar em perdas excessivas de calor no sistema, que pode fazer com que o pico de temperatura não atinja a zona termofilia [12]. Por outro lado, diâmetros elevados conduzem a uma área de contacto mais reduzida e consequentemente menos espaço útil para os microrganismos se desenvolverem [12]. No entanto, diâmetros médios muito baixos podem levar a uma baixa porosidade que possa comprometer o arejamento [12].



Figura A-4: Pilha de Co-Compostagem de LF com resíduos orgânicos [9].

Anexo IX - Resíduos Municipais Sólidos

Os resíduos municipais sólidos são definidos como os resíduos sólidos produzidos dentro de um município por atividades residenciais e pelos setores comercial e industrial em países com um PIB elevado, quando comparado com países de baixo/médio PIB, 1-2 kg/hab/dia e 0,4-0,8 kg/hab/dia, respetivamente, no entanto a sua fração orgânica tende a ser inferior (Figura 3-8), representando, em áreas urbanas cerca de 40-70% [12].

À semelhança da gestão de LF, a gestão dos resíduos municipais sólidos, em países de baixo/médio PIB, revela diversas deficiências, associadas a práticas de combustão direta sem qualquer planeamento ou descarga ilegal em zonas urbanas, florestais ou corpos de água. Um dos exemplos é o caso relatado pelo autor de [53], em que a deposição desmedida de resíduos municipais sólidos resultou no bloqueio de linhas de drenagem naturais.

O autor de [12], estima que, países de baixo/médio PIB, a taxa de recolha dos resíduos municipais sólidos é, geralmente, inferior a 50%, não sendo garantido neste valor a sua deposição segura. Estas falhas de gestão causam diversos impactes negativos na saúde pública e no ambiente (com tendência a serem agravados dado o aumento populacional verificado nestes países) tais como, contaminação de corpos de água, emissões de metano para atmosfera devido à digestão natural da fração orgânica, maus odores e atração de vetores de doenças, perturbação dos ecossistemas, entre outros [12 52].

À semelhança das LF, os resíduos municipais sólidos têm características que permitem a sua valorização, especialmente associadas à sua fração orgânica. Foram identificadas diversas hipóteses de co-tratamento com LF que se revelam benéficas, tanto para a eficiência do processo, como na mitigação das falhas de ambas as redes de gestão. Adicionalmente, é desejável que estes resíduos sejam processados em conjunto, uma vez que grandes taxas de produção de lamas são, provavelmente, acompanhadas por grandes taxas de produção de resíduos municipais sólidos, associadas a grandes núcleos urbanos. Os principais métodos de tratamento são co-compostagem, co-digestão anaeróbica e co-carbonização [12, 66].

Um dos maiores desafios da implementação destes sistemas de co-tratamento, deve-se ao facto de, geralmente, a fração orgânica e inorgânica dos resíduos municipais sólidos estar misturada, podendo ser o processo de separação complicado ou ser uma fonte de possíveis contaminações. Segundo [66], implementação de tecnologias novas que realizem esta separação de um modo mais eficiente e/ou ações que promovam a separação na origem, podem ser fatores chave para o impulsionamento do saneamento com uma economia circular.

Anexo X – Decantador Primário + Lamas Ativadas (ETAR)

Após os processos de pré-tratamento nas ETAR, o efluente residual é submetido a um processo de decantação, tratamento primário, sendo imposto um TRH que permite a que parte dos sólidos suspensos sedimentem no fundo do decantador, dando origem às lamas primárias. Na configuração descrita neste anexo, a fase líquida é encaminhada para a fase seguinte de tratamento, lamas ativadas.

A tecnologia de lamas ativadas é um método usado em ETAR para o tratamento secundário/ biológico de efluentes residuais de uma forma rápida e num espaço confinado. Pode também ser utilizado para o co-tratamento de LF, para a sua estabilização.

O Sistema tem várias configurações possíveis, no entanto é geralmente composto por três principais constituintes:

- **Tanque de Arejamento:** Tanque com um volume de líquido/lamas constante (porém com uma entrada e uma saída), onde estão presentes microrganismos. Estes, transformam a matéria orgânica dissolvida em CO_2 , H_2O , NH_3 , pequenas partículas de matéria orgânica estabilizada e mais células [5]. As partículas de matéria estabilizada agrupam-se e formam flocos sedimentáveis [5]. Visto que os microrganismos necessitam de oxigénio, o tanque é equipado com um sistema de arejamento que permite que uma maior população realize processo.
- **Decantador:** Os flocos de matéria orgânica estabilizada sedimentam no decantador – Lamas Biológicas.
- **Recirculação de Lamas:** Uma vez que os microrganismos utilizam a matéria orgânica para se reproduzirem, parte das lamas biológicas geradas no processo são recirculadas para o Tanque de Arejamento. Desta forma, é possível manter uma população ótima de microrganismos que torna o tratamento mais rápido e mais eficaz. O excesso de lamas produzidas é retirado do sistema.

A Figura A-5 mostra esquematicamente uma possível configuração do processo:

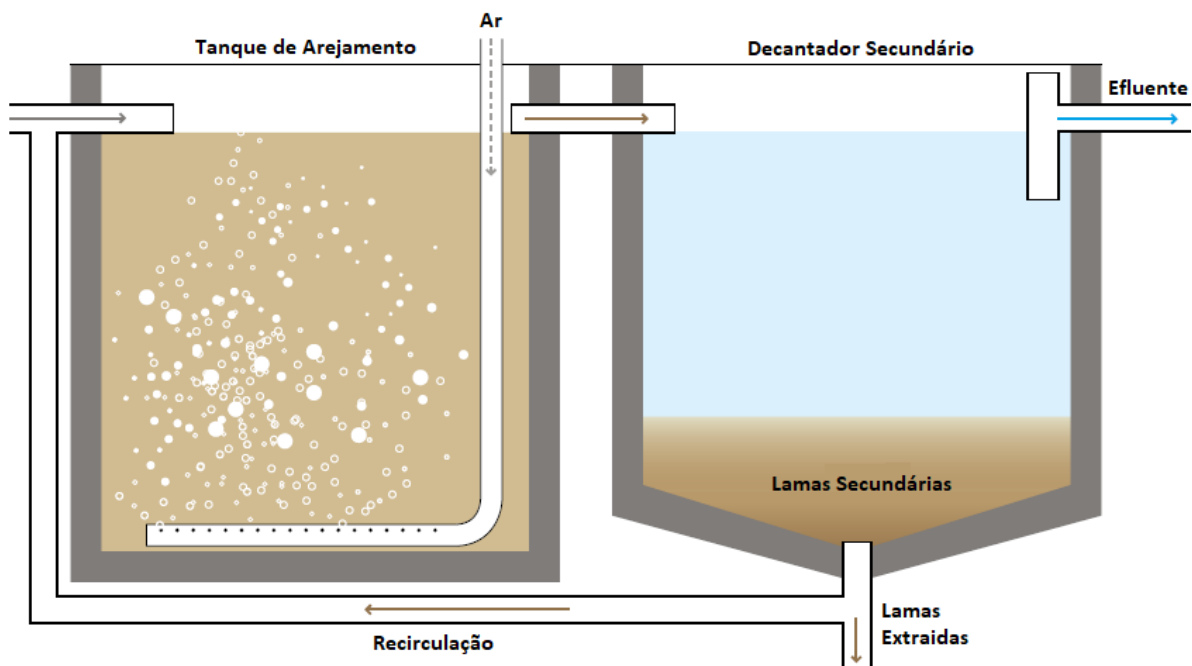


Figura A-5: Esquema do dos fluxos de matéria no processo de lamas ativadas, adaptado de [90].

Anexo XI – Lagoas de Estabilização

O Sistema de Lagoas é um método usado em ETAR, baseado em processos naturais que ocorrem em ecossistemas aquáticos, para o tratamento dos efluentes residuais. Contudo, também pode ser usado para o co-tratamento de LF, usado para a sua estabilização e espessamento [5].

O sistema é, geralmente, composto por três lagoas:

- **Lagoa Anaeróbica:** É a lagoa mais profunda das três. Nesta, ocorre a sedimentação de sólidos suspensos e conseqüente espessamento das lamas devido à carga hidráulica. Devido às condições anaeróbicas no fundo, as lamas sofrem digestão anaeróbia [5]. Estas lagoas não permitem, normalmente, o crescimento de algas [9].
- **Lagoa Facultativa:** Nesta lagoa, existem condições aeróbicas no topo, onde ocorre digestão aeróbia da matéria orgânica, e condições anaeróbicas no fundo, onde à semelhança da primeira lagoa, ocorre digestão anaeróbia da matéria. Normalmente as condições desta lagoa permitem o crescimento de populações de algas, que lhe conferem uma cor verde. Adicionalmente, ainda que menor, em comparação com a lagoa anaeróbica, também existe acumulação de lamas.
- **Lagoa de Maturação:** É a lagoa menos funda do sistema, regida por condições maioritariamente aeróbicas, devido ao fornecimento de oxigénio por difusão do ar ou fotossíntese de algas. Devido à baixa profundidade, há uma redução na carga de agentes patogénicos devido à exposição de radiação UV proveniente da luz solar [5].

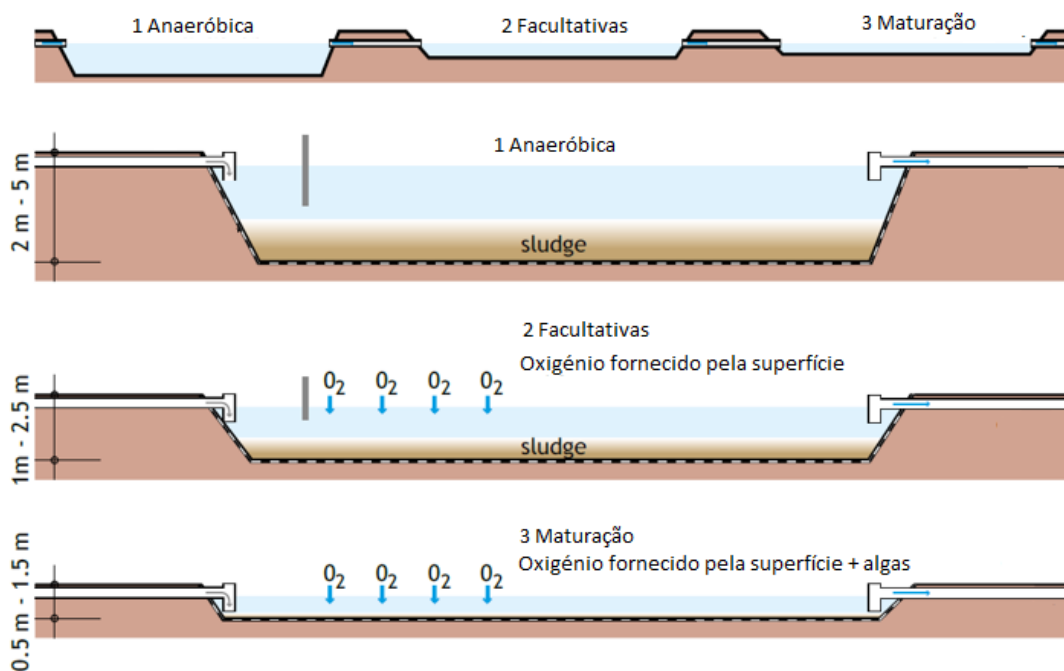


Figura A-6: Tipos de lagoas de estabilização e possível configuração do sistema, adaptado de [9].

As lagoas podem ser dispostas em série, Figura A-6, em paralelo, ou usadas individualmente, onde o tempo de retenção hidráulico é normalmente entre 20 a 60 dias [5]. As lamas depositam-se no fundo das lagoas como mostra a Figura A-6 e devem ser recolhidas periodicamente para manter o bom funcionamento do sistema (normalmente entre períodos de 3 a 5 anos) [9].

Anexo XII – Legislação África do Sul

A legislação apresentada neste anexo é baseada nos seguintes documentos:

- *Guidelines for the Utilization and Disposal of Wastewater Sludge (2006-2009) - Volumes 2 (Requirements for the Use in Agriculture [78]) & Volume 3 (Requirements for the On Site and Off Site Disposal of Sludge [79]).*
- Department of Water Affairs and Forestry (1998) - *Minimum Requirements for the handling, classification, and disposal of hazardous waste [59] & Minimum requirements for waste disposal by landfill [60].*

Apesar de os documentos (especialmente [78, 79]) serem dirigidos à deposição de lamas de ETAR, foi considerado relevante a sua aplicação à deposição de LF em países de baixo/médio PIB, uma vez que o contexto da África do Sul se assemelha ao mesmos e como tal, é pertinente ser usado como referência.

No documento [78] é sugerido classificar as lamas em 3 classes:

Tabela A-2: Classes das lamas, adaptado de [78].

Classe	Classificação		
Patogénicos	A	B	C
Estabilidade	1	2	3
Metais Pesados	a	b	c

As lamas classificadas com A1a têm o menor nível de restrições e lamas classificadas com C3c têm o maior nível de restrições aplicadas.

Patogénicos

Tabela A-3: Especificações das classes A,B e C, adaptado de [78].

Classe de Patogénicos (nº / gST)	A	B	C
Coliformes Fecais	< 10000	< 10 ⁷	> 10 ⁷
Ovos Helminthos (viáveis)	< 1	1 < x < 4	> 4

Estabilidade

Tabela A-4: Especificações das classes 1,2 e 3, adaptado de [78].

Classe	1	2	3
Requerimento	Satisfaz pelo menos 90% de uma das condições de estabilidade	Satisfaz pelo menos 75% de uma das condições de estabilidade	Não satisfaz nenhuma condição de estabilidade

Condições de estabilidade:

1. Redução do teor de SVT para pelo menos 38%;
2. Digestão Anaeróbica;

3. Digestão Aeróbica;
4. Cumprir certos requerimentos de CBO;
5. Processos aeróbicos com temperaturas superiores a 40 °C por pelo menos 14 dias (por exemplo compostagem);
6. Estabilização Alcalina;
7. Redução do teor de humidade de matéria para mistura de lamas primárias sem outro tipo de sólidos não estabilizados para pelo menos 25%;
8. Redução do teor de humidade de matéria para mistura de lamas primárias com lamas secundárias ou outro tipo de sólidos não estabilizados para pelo menos 10%.
9. Injeção das lamas numa camada não superficial do solo;
10. Deposição das lamas numa camada enterrada e posterior cobertura das mesmas com uma camada de solo.

Metais Pesados

Tabela A-5: Especificações das classes a, b, c, adaptado de [78].

Metais (mg/Kg)	a	b	c
Arsénio (As)	< 40	40 < x < 75	> 75
Cádmio (Cd)	< 40	40 < x < 85	> 85
Crómio (Cr)	< 1200	1200 < x < 3000	> 3000
Cobre (Cu)	< 1500	1500 < x < 4300	> 4300
Chumbo (Pb)	< 300	300 < x < 840	> 840
Mercúrio (Hg)	< 15	15 < x < 55	> 55
Níquel (Ni)	< 420	420	> 420
Zinco (Zn)	< 2800	2800 < x < 7500	> 7500

Restrições/Requisitos uso Agrícola

Patogénicos

Classe A

- Não existem restrições

Classe B

- Vegetais consumidos de forma crua são restritos.

Adicionalmente, devem ser tomadas as seguintes precauções:

- Alimentos que são consumidos “crus” e não exista contacto com o solo (por exemplo árvores de fruto), devem ser colhidos com um intervalo de pelo menos 30 dias após a aplicação das lamas.
- Alimentos em que exista contacto com o solo, devem ser cozidos e apenas devem ser colhidos com um intervalo de pelo menos 14 meses após a aplicação das lamas.
- Alimentos que crescem no interior do solo (por exemplo cenouras) e permaneçam no solo menos de quatro meses ou mais de quatro meses devem ser colhidos com um intervalo de 20 ou 34 meses, respetivamente, após a aplicação das lamas.
- A zona deve ser restrita ao público e a animais por 30 dias após a aplicação das lamas.

Classe C

- As lamas apenas são aplicáveis no solo caso a classificação da estabilidade seja 1 ou 2.
- Adicionalmente, alimentos que sejam consumidos “crus”, que cresçam com contacto no solo e/ou que cresçam no interior do solo são restritos.
- Alimentos que cresçam sem contacto com o solo (por exemplo árvores de fruto), devem ser colhidos com um intervalo de pelo menos 90 dias após a aplicação das lamas.
- A zona deve ser restrita ao público e a animais por 90 dias após a aplicação das lamas.

Estabilidade

Classe 1: Não existem restrições.

Classe 2: Deve ser avaliada a necessidade de tomar medidas adicionais.

Classe 3: Não são indicadas para deposição na superfície do solo. Importante realçar que a prática de dispor as lamas numa camada enterrada, confere classe de estabilidade 1 ou 2.

Metais Pesados

Classe a: Não existem restrições

Classe b: Deve ser avaliada a concentração de metais no solo.

Classe c: Lamas não devem ser usadas em zonas agrícolas.

Seleção do Local

- Distancia mínima de 5 metros aquíferos e de 200 metros de águas superficiais ou furos.
- Distancia mínima de 500 metros de habitações.
- Topografia (inclinação) não deve exceder um certo limite para prevenir fenómenos de erosão ou escoamento de lamas.

Restrições/Requisitos deposição em solo não-agrícola

Patogénicos

Classe A: Não existem restrições

Classe B: Monitorização de águas subterrâneas e superfícies deve incluir coliformes fecais.

Classe C; Monitorização de águas subterrâneas e superfícies deve incluir coliformes fecais e *E.Coli*.

Estabilidade

Classe 1: Não existem restrições.

Classe 2: Dependendo das medidas de redução de vetores adotadas, medidas adicionais podem ser necessárias.

Classe 3: Não é permitida deposição na superfície do solo.

Metais Pesados

Classe a: Não existem restrições.

Classe b: Existem tipos de solos restritos.

Classe c: Existem tipos de solos restritos e deve ser realizada monitorização frequente do solo e de águas subterrâneas.

Seleção do Local

- Não é permitida em zonas suscetíveis a inundações e de elevada atividade sísmica.
- Não é permitida em zonas cuja topografia (declive) possa originar fenómenos de escoamento de lamas (tendo em conta as suas características).
- Zonas com solo altamente permeável são restritivas; adicionalmente, o pH do solo deve ser mantido a níveis superiores a 6,5 limitar a mobilização de metais pesados.
- Zonas protegidas não são elegíveis
- Áreas onde os ventos locais direcionam para habitações.
- Distância mínima de 5 metros ou 10 metros de aquíferos caso sejam dispostas lamas desidratadas (teor de ST > 12%) ou lamas líquidas, respetivamente.
- Distância mínima de 400 metros de águas superficiais ou furos.
- O local deve ser restrito a público e a animais.

Deposição em Aterro Sanitário

Patogénicos

Classe A, B e C: Não existem restrições

Estabilidade

Classe 1: Não existem restrições.

Classe 2: Dependendo das medidas de redução de vetores tomada, medidas adicionais podem ser necessárias.

Classe 3: Não é permitida deposição na superfície do solo.

Metais Pesados

Classe a: Não existem restrições.

Classe b e c: Em aterros sanitários “normais” (G), existem restrições (por exemplo o principio da carga máxima d , descrito em detalhe em [79]). Em aterros com cuidados especiais (H:h ou H:H) não existem restrições.

Outras restrições

Caso seja pretendida a deposição em pilhas, não é permitido lamas com teores de ST < 20%. Adicionalmente, existem aterros que não aceitam lamas com teor inferior, com o intuito de minimizar drenados contaminados.

Existem outras restrições relacionadas com a motorização, tratamento de possíveis escorrências ou drenados, entre outros, que são descritos em detalhe em [59,60 e 79].

Anexo XIII – Centralização versus Descentralização

O tratamento de lamas em estações centralizadas está, geralmente, associado a um custo de tratamento por kg de ST inferior quando comparado com uma estação de menor escala, assumindo o mesmo esquema de tratamento. No entanto, dada a natureza dos sistemas de Saneamento “On Site” em que é necessário o transporte das LF entre os compartimentos e as ETLF, quanto maior for a escala da estação, maior será a área de cobertura do sistema e, conseqüentemente, maiores serão os custos de transporte associados, que, teoricamente, exibem um incremento crescente para cada interface descarregada e encaminhada para o mesmo. Neste contexto, é relevante ajustar a escala da ETLF a ser construída tendo em conta a otimização destes dois fatores (Figura A-7).

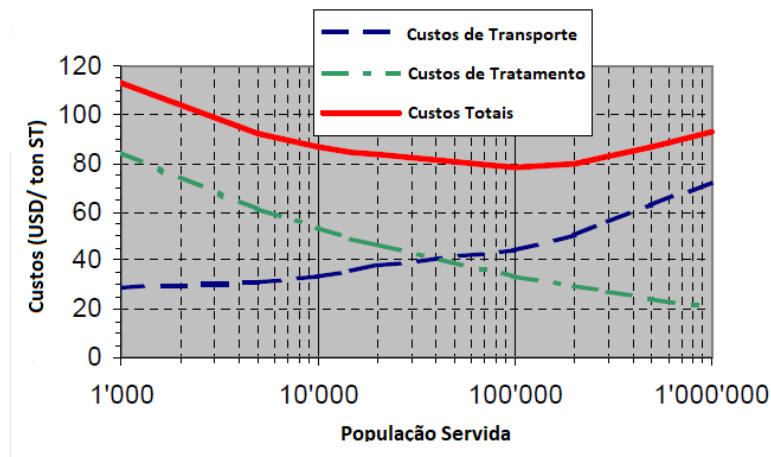


Figura A-7: Custos totais, de operação e transporte, em função da população servida, adaptado de [39].

Por outro lado, existem dois fatores adicionais que favorecem a descentralização das ETLF e devem ser considerados no planejamento da intervenção no sistema de saneamento:

- **Área de Implementação:** É pouco provável que a área de implementação de um local seja superior à soma das possíveis áreas de vários locais. Considerando que a maior parte dos processos de tratamento baseados em mecanismos naturais (leitos de secagem, secagem solar, compostagem, armazenamento prolongado, entre outros), associados a custos de implementação e operação inferiores, têm altos requisitos de área para a sua implementação, a descentralização das ETLF pode assumir um papel relevante na viabilidade econômica da gestão de LF.
- **Diversidade de Métodos:** Caso sejam identificadas oportunidades de comercialização para dois (ou mais) produtos diferentes, pode ser relevante a implementação de várias ETLF, associadas a esquemas de tratamento diferentes, com uma localização benéfica face ao método de comercialização aplicado, por exemplo custos de transporte reduzidos associados à comercialização e/ou da recepção de outros resíduos relevantes para o processo.

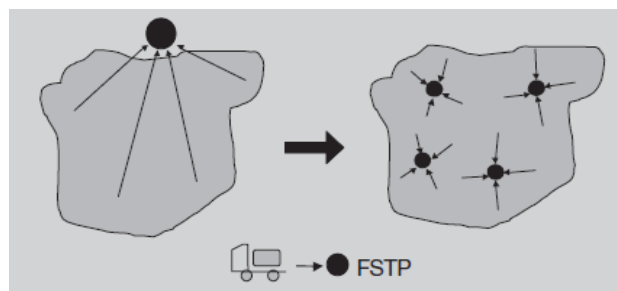


Figura A-8: Representação esquemática da centralização versus descentralização, adaptado de [39].

Anexo XIV - Caso Prático: Tarrafal, Cabo Verde

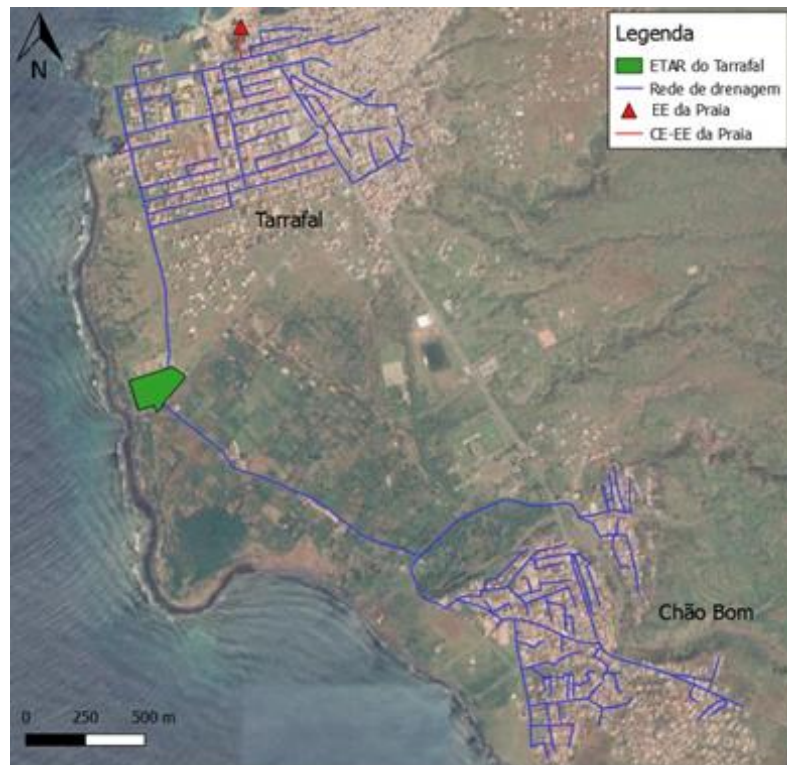


Figura A-9: Localização da cidade do Tarrafal de Santiago, povoação de Chão Bom e ETAR do Tarrafal [86].

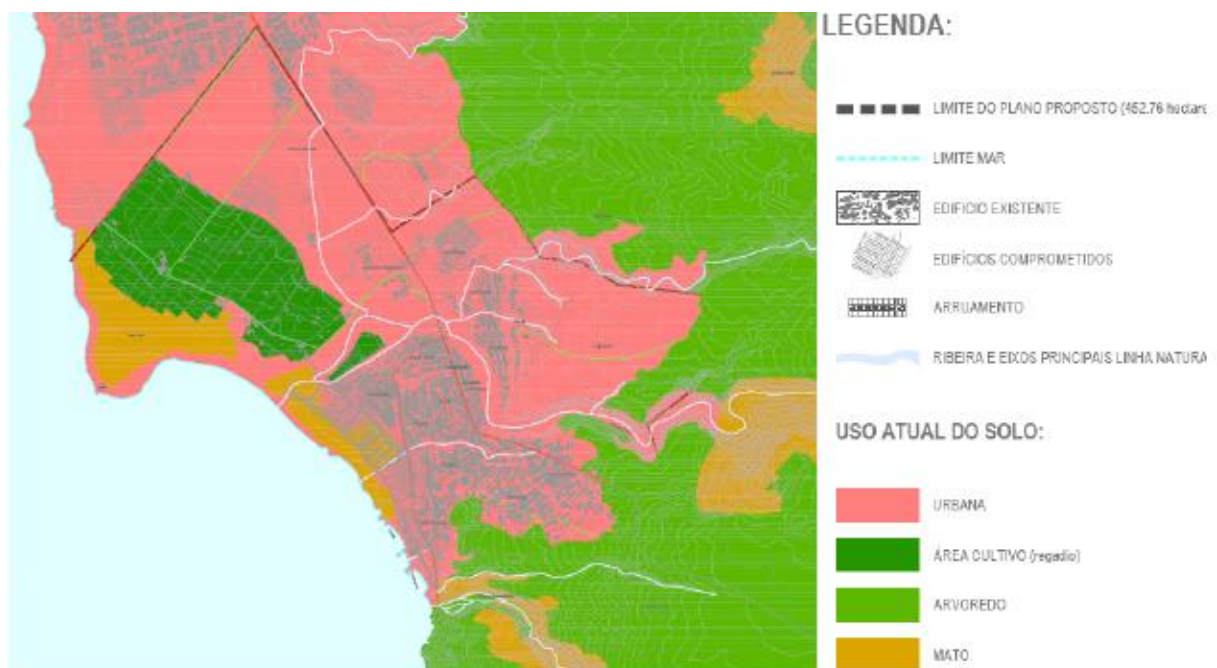


Figura A-10: Uso do solo na área de aplicação (não é fornecida escala pelo autor) [91].